

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**INFLUÊNCIA DA TURBULÊNCIA INTERMITENTE  
NA ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> NOTURNOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Diego Jatobá dos Santos**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

# **INFLUÊNCIA DA TURBULÊNCIA INTERMITENTE NA ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> NOTURNOS**

**Diego Jatobá dos Santos**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Micrometeorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Meteorologia**

**Orientador: Prof. Dr. Otávio Costa Acevedo**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2012**

Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Naturais e Exatas  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

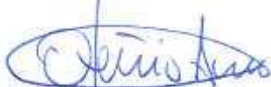
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**INFLUÊNCIA DA TURBULÊNCIA INTERMITENTE NA ESTIMATIVA  
DOS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> NOTURNO**

elaborada por  
**Diego Jatobá dos Santos**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Meteorologia**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Dr. Otávio Costa Acevedo**  
(Presidente/Orientador)



**Dr. Osvaldo Machado Rodrigues Cabral (EMBRAPA)**



**Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes (UFSM)**

Santa Maria, 05 de setembro de 2012.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original.

*Albert Einstein, físico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu grande **Deus**,  
pelas conquistas alcançadas e pela esperança em alcançar outras.

À minha avó **Osvaldina Jatobá dos Santos**,  
por seu amor, paciência e por ter sempre me incentivado a dedicar-me aos estudos,  
motivo pelo qual hoje já conquistei alguns dos meus objetivos.

Ao meu avô Nelson Pereira dos Santos,  
pelo seu exemplo de trabalho, força e superação.

À minha mãe Irene Jatobá dos Santos,  
pelo seu afeto e exemplo de determinação.

Aos meus irmãos Fabiana J. Santos, Douglas J. Santos e David J. Taveira,  
pelo carinho.

Aos meus tios, em especial, Edson A. Oliveira, Iraci J. Oliveira e Josefa J. Santos,  
pelo carinho e admiração que sempre me demonstraram.

À minha professora do ensino primário, Nadir de Souza Cabral Pinto,  
por sua maestria aplicada no meu primeiro estágio da educação escolar e  
acompanhamento no meu crescimento acadêmico.

À minha ex-orientadora de iniciação científica, professora Renata Gonçalves Aguiar,  
por ter me instruído com dedicação e competência nos meus primeiros passos dentro  
deste meio científico.

Aos professores que tive na Universidade Federal de Rondônia – UNIR / Ji-Paraná  
pelo apoio e ensinamentos ministrados com zelo.

Ao Dr. Leonardo J. Goncalves Aguiar,  
pela co-orientação na iniciação científica e amizade.

Aos amigos do Programa LBA, Alberto D. Webler, Josiane de Brito e Frederico T. Trindade,  
pela excelente convivência durante o período de iniciação científica.

Ao professor Otávio Costa Acevedo,  
pela oportunidade, orientação, incentivo e exemplo de profissionalismo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia,  
pelo conhecimento transmitido.

Aos amigos do curso de Graduação e Pós-Graduação em Meteorologia,  
pela convivência, amizade e troca de conhecimento.

A todos os amigos que conquistei durante o curso em Santa Maria,  
por terem amenizado a saudade de casa.

Aos membros da banca, Dr. Osvaldo Machado Rodrigues Cabral, Dr. Osvaldo Luiz Leal de  
Moraes e Dra. Débora Regina Roberti  
pelas contribuições.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria,  
pela oportunidade de estudo.

A CAPES,  
pelo suporte financeiro.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

**Muito obrigado!**

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia  
Universidade Federal de Santa Maria

### INFLUÊNCIA DA TURBULÊNCIA INTERMITENTE NA ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE CO<sub>2</sub> NOTURNOS

AUTOR: DIEGO JATOBÁ DOS SANTOS  
ORIENTADOR: OTÁVIO COSTA ACEVEDO  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 05 de setembro de 2012.

Dados de fluxos turbulentos noturnos são analisados, primeiramente, para dois sítios experimentais no Brasil e uma posterior expansão dessas análises é realizada para uma grande variedade de biomas, utilizando para tanto, um conjunto amplo de dados originados de mais de uma centena de estações de fluxos, espalhadas nas Américas e na Europa. A ênfase é dada aos aspectos importantes associados à ocorrência de turbulência intermitente e suas implicações para as estimativas de fluxos turbulentos noturnos de CO<sub>2</sub>. Fatores de intermitência (FI) dos fluxos de CO<sub>2</sub> e de calor sensível são definidos e quantificados para o conjunto de estações. Na maioria dos casos, houve concordância entre os comportamentos obtidos para o fluxo de CO<sub>2</sub> e de calor sensível, especialmente nas estações que na média apresentaram condições pouco intermitentes. Um número maior de estações apresentaram valores reduzidos de FI para fluxo de CO<sub>2</sub> do que para o de calor sensível. A intermitência dos fluxos de CO<sub>2</sub> se mostrou significativamente maior sobre estações de maior altura do dossel (florestas) do que sobre estações de savana ou agrícolas, enquanto que a mesma diferença é muito mais reduzida para os fluxos de calor sensível. Uma investigação da dependência dos fluxos de CO<sub>2</sub> em relação à variabilidade temporal de turbulência ao longo da noite foi realizada. O propósito principal da análise é identificar se há acúmulo de CO<sub>2</sub> em períodos pouco turbulentos e se este CO<sub>2</sub> acumulado afeta os fluxos em períodos subsequentes. Na imensa maioria das estações, se observou um padrão clássico de NEE diminuindo conforme  $u_*$  tende a zero. É hipótese do presente trabalho que o decréscimo de NEE em situações calmas não necessariamente indica fluxo não contabilizado pelo método da covariância dos vórtices, mas que este pode não ter sido propriamente capturado pelo termo de armazenamento, sendo posteriormente capturado pelo sensor em situações turbulentas subsequentes. Desta forma, o presente estudo tem como precípuo intento, contribuir no sentido de identificar um potencial problema na utilização das técnicas de correção de dados utilizadas para os períodos com pequena intensidade turbulenta. Especificamente, é importante analisar se os períodos que estão tendo seus dados substituídos não são sucedidos por outros em que houve excesso de fluxo, caracterizando, desta forma, uma correção excessiva. Os resultados indicam que há uma grande quantidade de estações para as quais os fluxos são independentes da variabilidade da intensidade turbulenta, havendo indicações que a redução observada em períodos calmos seja compensada em intervalos turbulentos. Nesses casos, é possível que correções comumente usadas para a correção de fluxos em condições calmas sejam excessivas.

**Palavras-chave:** Intermitência turbulenta. Fluxos de CO<sub>2</sub>. AmeriFlux. EuroFlux.

## **ABSTRACT**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia  
Universidade Federal de Santa Maria

### **INTERMITTENT TURBULENCE INFLUENCE ON NOCTURNAL CO<sub>2</sub> FLUX ESTIMATES**

AUTOR: DIEGO JATOBÁ DOS SANTOS  
ORIENTADOR: OTÁVIO COSTA ACEVEDO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 05 de setembro de 2012.

Nocturnal turbulent flux data are analysed, initially for two experimental sites in Brazil, and later for a large variety of biomes. In such case, a wide dataset, originated from more than a hundred flux stations scattered over Europe and the Americas is used. Emphasis is given to important aspects associated to the occurrence of intermittent turbulence and its implications for CO<sub>2</sub> nocturnal flux estimates. Intermittency factors (IF) for CO<sub>2</sub> and sensible heat fluxes are determined for the set of stations. In most cases, there was agreement between the results for CO<sub>2</sub> and sensible heat, specially for those stations that were less intermittent, on average. A larger number of stations showed low IF for CO<sub>2</sub> than for sensible heat fluxes. CO<sub>2</sub> flux intermittency was significantly larger over higher canopies than over savannas or crops, while the same difference is smaller for the sensible heat flux. An investigation on the CO<sub>2</sub> flux dependence on the temporal variability of the turbulence intensity is carried on. The main purpose of such an analysis is identifying whether there is CO<sub>2</sub> storage during low turbulence periods and if such accumulated CO<sub>2</sub> affects the fluxes in subsequent periods. In the vast majority of the stations, the classical pattern of NEE decreasing as  $u^*$  tends to zero is observed. The hypothesis of the present study is that such NEE decrease under calm situations does not necessarily imply on flux lost by the eddy covariance technique, but that it may have not been properly captured by the CO<sub>2</sub> storage term, being later measured in subsequent turbulent situations. Therefore, the present study has as the main goal identifying a potential problem in the correcting procedure commonly applied for low turbulent periods. Specifically, it is important to analyse whether the periods whose data are being replaced are not succeeded by others for which there is flux excess, characterizing, therefore, an excessive correction. Results indicate that there is a large quantity of stations for which the fluxes are independent on turbulence intensity variability, with evidences that the observed reduction during calm periods is compensated when it gets turbulent. In such cases, it is possible that corrections commonly used for calm conditions are, indeed, excessive.

**Keywords:** Turbulent intermittency. CO<sub>2</sub> fluxes. AmeriFlux. EuroFlux.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 -</b>	Balanço de massa de CO <sub>2</sub> em uma floresta. Nesta figura, $\chi_c$ é a densidade molar do carbono, $c_d$ a densidade molar do ar seco, L o comprimento do volume de controle, e $h_r$ se refere a altura .....	18
<b>Figura 1.2 -</b>	Distribuição continental das torres de fluxos das redes regionais, formando a rede global de fluxos (FLUXNET) .....	20
<b>Figura 1.3 -</b>	Evolução temporal da velocidade vertical turbulenta (painéis superiores) e do fluxo de calor sensível (painéis inferiores) para duas diferentes noites: uma caracterizada por turbulência intermitente (a), e a outra por turbulência bem desenvolvida (b) .....	25
<b>Figura 2.1 -</b>	Sítio São João do Triunfo. (a) vegetação próxima à torre micrometeorológica e, (b) sistema <i>Eddy Covariance</i> em primeiro plano, e, ao fundo, o topo da floresta .....	28
<b>Figura 2.2 -</b>	Sítio Santarém (km 67). (a) vegetação próxima a torre micrometeorológica e (b) torre micrometeorológica de 64 m de altura .....	29
<b>Figura 2.3 -</b>	Fração normalizada acumulativa do total do fluxo noturno como uma função da fração do tempo total requerida para encontrar o nível do fluxo. As diferentes curvas representam duas diferentes noites e os fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), de acordo com a legenda. A linha sólida horizontal em 0.5 representa a metade do total do fluxo noturno usada para definir o fator de intermitência. Dados de fluxos noturnos do sítio de São João .....	36
<b>Figura 3.1 -</b>	Evolução temporal da velocidade vertical turbulenta (linha superior), temperatura (segunda linha), concentração de vapor d'água (terceira linha) e concentração de CO <sub>2</sub> (linha inferior) para as noites de 04 de novembro de 2009 (coluna esquerda) e 21 de julho de 2010 (coluna direita) .....	39
<b>Figura 3.2 -</b>	Distribuição de frequência dos fatores de intermitência (FI) para os fluxos de calor sensível (painéis superiores), CO <sub>2</sub> (centrais) e calor latente (inferior), para os sítios de São João (esquerda) e Santarém (direita) .....	40
<b>Figura 3.3 -</b>	Distribuição de frequência dos fatores de intermitência (FI) para os fluxos de CO <sub>2</sub> (barra em azul) e calor sensível (vermelho) para 16 estações da rede FLUXNET .....	42
<b>Figura 3.4 -</b>	Distribuição de frequência dos FI médios para os fluxos de CO <sub>2</sub> (barra em azul) e calor sensível (vermelho) de cada uma das estações. Foram utilizadas nessa análise apenas as estações nas quais pelo menos 25% das noites puderam ser aproveitadas para a determinação de ambos FI (85 estações) .....	43
<b>Figura 3.5 -</b>	Relação entre os FI para os fluxos de CO <sub>2</sub> e calor sensível. As estações na cor preta apresentam um aproveitamento de pelo menos 25% dos dados noturnos de fluxo de CO <sub>2</sub> e calor sensível, e as em cinza são aquelas nas quais essa condição não foi satisfeita .....	44
<b>Figura 3.6 -</b>	Relação entre os fatores de intermitência dos fluxos de CO <sub>2</sub> (painel esquerdo) e calor sensível (painel direito) e a velocidade de fricção do ar média (painel superior) e altura do dossel (painel inferior) para as estações analisadas .....	45

<b>Figura 4.1 -</b>	Nos painéis à esquerda é dada a distribuição de frequências da velocidade de fricção do ar ( $u_*$ ). Painéis à direita mostram o comportamento do NEE, fluxo de CO <sub>2</sub> e armazenamento, como função da intensidade da turbulência dada pela velocidade de fricção ( $u_*$ ). Sendo os painéis superiores referentes à estação USLos, e os inferiores à USSP1 .....	50
<b>Figura 4.2 -</b>	Comportamento da distribuição de frequências do $u_*$ (painéis à esquerda) e da dependência do NEE, fluxo de CO <sub>2</sub> e do armazenamento (painéis à direita) na história da turbulência, utilizando para tanto, a razão $r_{1,5} = u_*/(u_* \text{ de 1,5 hora antes})$ . Análises para a estação USLos (painéis superiores) e USSP1 (painéis inferiores) .....	52
<b>Figura 4.3 -</b>	Painéis à esquerda mostram NEE em função da temperatura do ar, e ajuste de uma função exponencial aos pontos (linha azul). Nos painéis à direita aparece a dependência da NEE normalizada pela função de ajuste à temperatura do ar. Análises para a estação USLos (painéis superiores) e USSP1 (painéis inferiores) .....	54
<b>Figura 4.4 -</b>	Painéis à esquerda mostram a diferença entre a dependência de NEE normalizada (linha preta, eixo da esquerda) e sem normalização (linha azul, eixo da direita) em termos de $u_*$ , enquanto que nos painéis à direita a mesma comparação é feita em termos de $r_{1,5}$ . Análises para a estação USLos (painéis superiores) e USSP1 (painéis inferiores) .....	55
<b>Figura 4.5 -</b>	Dependência de NEE normalizada em função da razão entre $u_*$ e o valor desta variável observado com um tempo de atraso, para diversos valores deste tempo de atraso, conforme mostrado na legenda. A linha mais espessa mostra a média para todos os tempos de atraso considerados. O painel da esquerda é para a estação USLos e o da direita para USSP1.....	57
<b>Figura 4.6 -</b>	Comportamento de NEE normalizada em relação à intensidade da turbulência ( $u_*$ ). As análises foram realizadas para 25 estações da rede AmeriFlux, nas quais as informações do armazenamento de CO <sub>2</sub> estavam disponíveis .....	59
<b>Figura 4.7 -</b>	Comportamento de NEE normalizada em relação à intensidade da turbulência ( $u_*$ ). As análises foram realizadas para 23 estações da rede EuroFlux, nas quais as informações do armazenamento de CO <sub>2</sub> estavam disponíveis .....	60
<b>Figura 4.8 -</b>	Dependência de NEE normalizada em função da história da turbulência, utilizando a razão $r_m$ (razão média dos atrasos temporais, conforme definido na seção anterior). A linha azul representa a reta de ajuste linear e, EQM é o erro quadrático médio. Análises para o subconjunto de estações nas quais os dados de armazenamento estavam disponíveis (48 estações, pertencentes às redes AmeriFlux e EuroFlux) .....	62
<b>Figura 4.9 -</b>	Dependência de NEE normalizada em função de $u_{*m\acute{a}x}/u_{*m\acute{i}n}$ . São apresentadas as 24 estações que apresentaram menores valores de <i>RI</i> (ver definição no texto).....	65
<b>Figura 4.10 -</b>	Dependência de NEE normalizada em função de $u_{*m\acute{a}x}/u_{*m\acute{i}n}$ . São apresentadas as 24 estações que apresentaram maiores valores de <i>RI</i> (ver definição no texto) .....	66
<b>Figura 4.11 -</b>	<i>EQM</i> (ver Figura 4.8) em termos de <i>RI</i> (ver Figuras 4.9 e 4.10) .....	67
<b>Figura 4.12 -</b>	<i>EQM</i> (ver Figura 4.8) em função da altitude em que cada estação está acima do ponto mais baixo em uma área de 40 x 40 km ao redor da estação .....	69

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 -** Tipo de ecossistema, altura do dossel e informação topográfica e geográfica para 115 sítios da rede FLUXNET investigados no presente estudo. De acordo com o IGBP (Programa Internacional da Geosfera-Biosfera), os tipos de vegetação estão classificados em: ENF = *Evergreen Needleleaf Forest*, OSH = *Open Shrubland*, CSH = *Closed Shrubland*, CRO = *Crop*, DBF = *Deciduous Broadleaf Forest*, GRA = *Grassland*, EBF = *Evergreen Broadleaf Forest*, MF = *Mixed Forest*, WSA = *Woody Savannas*, WET = *Wetland*. NA significa que a referida informação não foi verificada ..... 30
- Tabela 3.1 -** Tipos de ecossistemas, divididos em dois grupos: *Florestas* (DBF, EBF, ENF e MF) e *Outros* (esse se refere aos demais tipos de ecossistemas analisados no presente estudo). Para cada grupo é mostrado a altura média dos dosséis e, o Fator de intermitência médio (FI) do fluxo de CO<sub>2</sub> e calor sensível. São mostrados também os desvios padrão de cada valor médio apresentado ..... 47

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	15
<b>1.1 Covariância dos vórtices</b> .....	15
<b>1.2 Troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema</b> .....	17
<b>1.3 Redes de fluxos</b> .....	19
<b>1.4 Correção <math>u^*</math></b> .....	21
<b>1.5 Turbulência intermitente</b> .....	24
1.5.1 Intermitência afetando fluxos de CO <sub>2</sub> .....	24
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
<b>2.1 Descrição dos sítios analisados em estudo de caso</b> .....	27
2.1.1 São João do Triunfo .....	27
2.1.2 Santarém .....	28
<b>2.2 Descrição das redes de fluxos</b> .....	29
2.2.1. Instrumentos e métodos utilizados na determinação dos fluxos de CO <sub>2</sub> .....	34
<b>2.3 Quantificação da intermitência</b> .....	35
<b>3 FATORES DE INTERMITÊNCIA</b> .....	38
<b>3.1 Estudo de caso</b> .....	38
<b>3.2 Redes de fluxos</b> .....	41
<b>4 FLUXOS E HISTÓRIA DA TURBULÊNCIA NOTURNA</b> .....	48
<b>4.1 Estudo de caso</b> .....	48
<b>4.2 Redes de fluxos</b> .....	57
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	70
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	72

## INTRODUÇÃO

Nos anos recentes, a questão se a biota terrestre é uma fonte ou um sumidouro de carbono da atmosfera, tornou-se assunto de muita especulação. Buscando um melhor entendimento a essa questão, alguns estudos sobre o ciclo do carbono foram conduzidos nas últimas décadas em diferentes ecossistemas a nível mundial, com o intuito de quantificar a troca de carbono entre a biosfera e atmosfera através de medições em longo prazo das trocas de CO<sub>2</sub> entre a vegetação e atmosfera.

A técnica de covariância dos vórtices (*Eddy Covariance*) tem sido o método mais frequentemente utilizado para quantificar as trocas de energia e CO<sub>2</sub> entre a superfície e a atmosfera (AUBINET, 2008). Essa técnica viabiliza medições contínuas e diretas em longo prazo de fluxos de energia e massa através de instrumentos de resposta de alta frequência. O método se baseia no conceito de que o fluxo turbulento de uma determinada grandeza à superfície pode ser calculado através da covariância entre essa grandeza e a componente vertical de velocidade do escoamento (PINTO e ROCHA, 2000). Entretanto, em algumas situações, as estimativas realizadas através desse método estão associadas a erros, apresentando melhores desempenhos quando as condições atmosféricas (vento, temperatura, umidade) são contínuas, a vegetação é homogênea e está localizada em um terreno plano (BALDOCCHI, 2003), o que nem sempre é encontrado em condições naturais. Violações dessas suposições podem causar erros sistemáticos na interpretação das medidas de covariância dos vórtices turbulentos, os quais aumentam quando integrados ao longo do tempo para produzir somas diárias e anuais (MONCRIEFF; MALHI; LEUNING, 1996). Segundo Oliveira et al. (2012), em todos os estudos realizados com o objetivo de obter a melhor maneira de se calcular os fluxos turbulentos verticais próximos à superfície, atenção especial é dada aos problemas que surgem durante o período noturno, especialmente quando a intensidade da turbulência decai consideravelmente. Os autores afirmam que durante o dia, mesmo em condições de pouco vento, há uma intensa mistura vertical, de modo que a intensidade da turbulência é suficiente para realizar o transporte vertical de escalares, e em caráter especial o CO<sub>2</sub>. Reportam ainda que, nestas condições, assumir que a troca líquida de

dióxido de carbono do ecossistema (NEE)<sup>1</sup> é igual ao fluxo vertical turbulento é uma boa aproximação. Entretanto, segundo os autores, à noite, em condições de estabilidade atmosférica, esta aproximação pode levar a uma subestimativa das trocas escalares entre a superfície e a atmosfera. Neste caso, a intensidade da turbulência pode não ser suficiente para realizar o transporte vertical do dióxido de carbono, e, desta forma, o efeito de outros termos na equação do balanço de massa de CO<sub>2</sub> se torna relevante.

Aubinet (2008) identificou dois principais processos micrometeorológicos que podem potencialmente causar erros severos nas estimativas dos fluxos noturnos: drenagem de fluxos e turbulência intermitente. Condições de estabilidade atmosférica são frequentemente associados com a separação dos fluxos de ar acima e dentro do dossel, conduzindo para o desenvolvimento de advecção pela drenagem dos fluxos (BELCHER et al., 2008; FINNIGAN, 2008; OLIVEIRA et al., 2012). Na maioria dos locais, a não consideração da advecção leva a uma distorção sistemática nas taxas de respiração noturna calculada (van GORSEL et al., 2009). Na tentativa de minimizar esta perda nas medidas de dióxido de carbono, diversos pesquisadores efetuaram estudos sobre o transporte advectivo de escalares por escoamento de drenagem (STAEBLER; FITZJARRALD, 2004; FEIGENWINTER; BERNHOFER; VOGT, 2004; AUBINET et al., 2005; SUN et al., 2007; FEIGENWINTER et al., 2008; TOTA et al., 2008; YI et al., 2008; AUBINET et al., 2010; ZERI et al., 2010, dentre outros). Entretanto, apesar dessas experiências possibilitarem valiosas informações sobre a dinâmica de advecção, a conclusão geral é que, é improvável que essas medições de advecção horizontal sejam suficientes para resolver o problema do balanço de carbono noturno em todos os casos, visto que tais campanhas são muito trabalhosas e os resultados da magnitude dos fluxos advectivos, obtidos através desses experimentos, estão associados a grandes incertezas (van GORSEL et al., 2009).

A turbulência intermitente, outro mecanismo micrometeorológico apontado por Aubinet (2008), é um fenômeno caracterizado por longos períodos calmos interrompidos por períodos de intensa atividade turbulenta (NAPPO, 1991; COULTER; DORAN, 2002). De acordo com Acevedo et al. (2006), uma grande fração do total da troca escalar noturna entre a superfície e a atmosfera ocorre durante os eventos de intermitência. Desse modo, a transferência total dos fluxos noturnos torna-se dependente desses eventos. Entretanto, poucos estudos foram efetuados associando o processo de intermitência com a troca de escalares na camada limite noturna. Deste modo, a realização de estudos que abordem a caracterização da

---

<sup>1</sup> do inglês, net ecosystem exchange.

turbulência durante essas condições de grande estabilidade e a implicação de seus efeitos nas estimativas dos fluxos entre a superfície e a atmosfera, é de fundamental importância.

No presente estudo será realizado, primeiramente, um estudo de caso, no qual serão utilizados dados de fluxos noturnos de dois sítios experimentais (São João do Triunfo e Santarém) com o propósito de analisar o comportamento dos escalares em relação à variação da intensidade da turbulência e quantificar e comparar os fatores de intermitência na camada limite noturna. Posteriormente, uma expansão dessas análises será realizada para uma grande variedade de biomas, utilizando para tanto, os dados da rede mundial de fluxos (FLUXNET). Nesse sentido, os fatores de intermitência observados serão comparados com características físicas e meteorológicas dos sítios, como altura do dossel, índice de área foliar e tipo de topografia. Com isso, se pretende analisar o comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub> noturno estimados pelas redes regionais de fluxos, levando em consideração os efeitos do processo intermitente da turbulência. E, em uma fase final, se examinará como essa metodologia irá contribuir nas estimativas da troca líquida de dióxido de carbono do ecossistema.

# 1 REVISÃO DE LITERATURA

## 1.1 Covariância dos vórtices

A covariância dos vórtices é uma técnica micrometeorológica usada para estimar os fluxos de massa e energia entre a superfície e a atmosfera. A técnica possibilita a realização de estimativas dos fluxos turbulentos através de medidas de alta frequência de variáveis meteorológicas, tais como as componentes da velocidade do vento, temperatura, e concentração de CO<sub>2</sub> e vapor d'água. O método se baseia no conceito de que o fluxo turbulento de uma determinada grandeza na superfície pode ser calculado através da covariância entre essa grandeza e a componente vertical de velocidade do escoamento (PINTO e ROCHA, 2000). Desta forma, o método proporciona a determinação direta dos fluxos, através da covariância entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais da velocidade do vento horizontal (fluxo de momentum), da umidade do ar (fluxo de calor latente), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e da concentração de CO<sub>2</sub> (fotossíntese e respiração).

Considerando uma grandeza escalar "Q" qualquer. O fluxo desta grandeza pode ser escrito na forma:

$$F = \overline{\rho_a w Q} \quad (1.1)$$

na qual,  $Q = \rho_o / \rho_a$  é a razão de mistura da grandeza Q,  $\rho_o$  é a sua densidade,  $\rho_a$  é a densidade do ar e  $w$  é a componente vertical da velocidade do vento. Separando os valores instantâneos das variáveis como sendo a soma de uma parte média e outra flutuante (procedimento conhecido como decomposição de Reynolds), obtém-se:

$$\rho_a = \overline{\rho_a} + \rho'_a \quad (1.2)$$



$$w = \overline{w} + w' \quad (1.3)$$

$$Q = \overline{Q} + Q' \quad (1.4)$$

onde, barras superiores denotam médias temporais a um determinado intervalo de tempo e apóstrofos denotam as perturbações em relação ao valor médio das componentes.

Retornando a Equação (1.1) e substituindo as Equações (1.2), (1.3) e (1.4), tem-se:

$$F = \overline{(\rho_a + \rho'_a)(w + w')(Q + Q')} \quad (1.5)$$

Desenvolvendo a Equação (1.5), obtém-se:

$$F = \overline{(\rho_a w Q + \rho_a w Q' + \rho_a w' Q + \rho_a w' Q' + \rho'_a w Q + \rho'_a w Q' + \rho'_a w' Q + \rho'_a w' Q')} \quad (1.6)$$

Por definição, os termos que tem apenas um componente flutuante, tem a média de todas as suas flutuações nulas. Então:

$$F = \overline{(\rho_a w Q + \rho_a w' Q' + \rho'_a w Q' + \rho'_a w' Q')} \quad (1.7)$$

Na Equação (1.7), assumindo que as flutuações na densidade do ar são negligenciáveis, tem-se:

$$F = \overline{(\rho_a w Q + \rho_a w' Q')} \quad (1.8)$$

Pela lei da conservação de massa, em uma situação ideal, na qual se tem um terreno plano e homogêneo, a média da velocidade vertical do vento é nula ( $\overline{w} = 0$ ). Neste caso, o fluxo turbulento de uma grandeza “Q” pode ser escrito como:

$$F = \overline{\rho_a w' Q'} \quad (1.9)$$

Assim, a Equação (1.9) é a equação do fluxo turbulento de uma grandeza escalar “ $Q$ ” para um terreno plano e homogêneo, conhecida como método da covariância de vórtices turbulentos, na qual o termo  $\overline{w'Q'}$  representa a covariância estatística entre as variáveis  $w$  e  $Q$ .

Para o caso específico do  $\text{CO}_2$ , é necessário, portanto, observar qual o tipo de medida realizada pelo sensor. Em alguns casos, é feita a medida da densidade molar ( $\rho_c$ ) do gás ao invés da razão de mistura. Variações na densidade molar podem surgir quando se adiciona ou se retira moléculas do volume de controle ou quando há variação do tamanho do volume de controle, que ocorre quando há mudança na temperatura, pressão e umidade na atmosfera. Deste modo, em termos da densidade molar, o fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $F_c$ ) é expresso da seguinte forma:

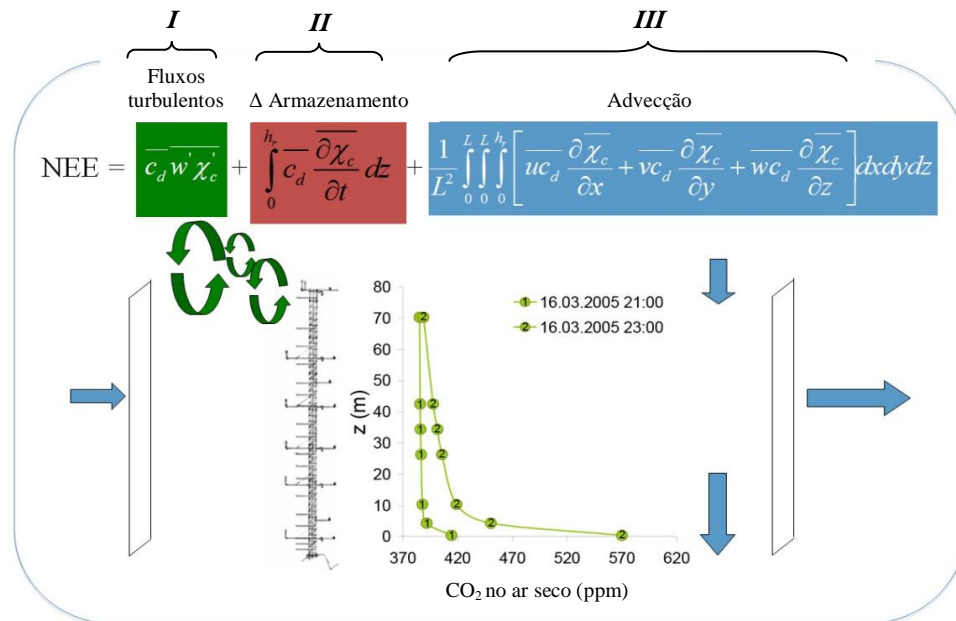
$$F_c = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho'_c} + \overline{w\rho_c} \quad (1.10)$$

na qual, o segundo termo do lado direito da Equação (1.10) se refere ao produto entre a velocidade vertical média e a densidade molar média do gás. Neste caso, a velocidade vertical média é diferente de zero e surge devido a flutuações da densidade do ar.

## 1.2 Troca líquida de $\text{CO}_2$ do ecossistema

As medições através do método de covariância de vórtices proporcionam a determinação da troca líquida de  $\text{CO}_2$  do ecossistema (NEE) para uma variedade de biomas, determinando se esses ecossistemas são uma fonte ou um sumidouro de carbono (RUNNING et al., 1999; BALDOCCHI, 2003; GRACE, 2004).

O NEE é definido como sendo o fluxo de  $\text{CO}_2$  que é trocado entre a atmosfera e o sistema floresta/solo, ou seja, é a diferença entre o  $\text{CO}_2$  absorvido pela fotossíntese e o perdido pela respiração (WOHLFAHRT et al., 2005). A Figura 1.1 esboça a metodologia empregada na estimativa do NEE. Sob condições ideais, onde o terreno é plano e homogêneo, o NEE diário pode ser calculado pela soma dos fluxos medidos no topo da torre (fluxos turbulentos) com medidas do perfil vertical da concentração de  $\text{CO}_2$  abaixo deste sistema (taxa de armazenamento) (GRACE et al., 1995; LEE, 1998; van GORSEL, 2009).



**Figura 1.1** – Balanço de massa de CO<sub>2</sub> em uma floresta. Nesta figura,  $\chi_c$  é a densidade molar do carbono,  $c_d$  a densidade molar do ar seco,  $L$  o comprimento do volume de controle, e  $h_r$  se refere a altura. (Adaptado de Eva van Gorsel e Ray Leuning, CSIRO Marine and Atmospheric Research)<sup>2</sup>.

Na equação do NEE (Figura 1.1), o termo *I* se refere ao fluxo turbulento vertical de CO<sub>2</sub>, medido através do método da covariância dos vórtices (*Eddy Covariance*). Durante o período diurno, em condições de intensa atividade turbulenta, e em terreno plano e homogêneo, este será o termo dominante na equação do NEE.

O termo *II* é o termo de taxa de variação no armazenamento de CO<sub>2</sub> na camada abaixo da altura  $h_r$ , calculado através da integração do perfil vertical das concentrações médias do CO<sub>2</sub>. Normalmente é pequeno durante o dia, mas torna-se significativo à noite, em condições de pouco vento, quando o CO<sub>2</sub> produzido pela respiração do ecossistema se acumula no interior do próprio ecossistema (AUBINET et al., 2000).

O termo *III* representa o transporte devido a advecção horizontal e vertical pelas componentes médias do vento. A componente horizontal é significativa em locais onde há um gradiente horizontal na concentração de CO<sub>2</sub> (terreno não homogêneo) e durante a noite em terrenos inclinados, onde o CO<sub>2</sub> é removido através do processo de escoamentos de drenagem. A componente vertical é insignificante sobre culturas baixas. Entretanto, sobre florestas, este termo não pode ser negligenciado, podendo até mesmo ser maior do que o transporte turbulento vertical em noites muito calmas (LEE, 1998).

<sup>2</sup> Disponível em: < <http://fluxnet.ornl.gov/methodology>>. Acesso em: 14 maio 2012.

### 1.3 Redes de fluxos

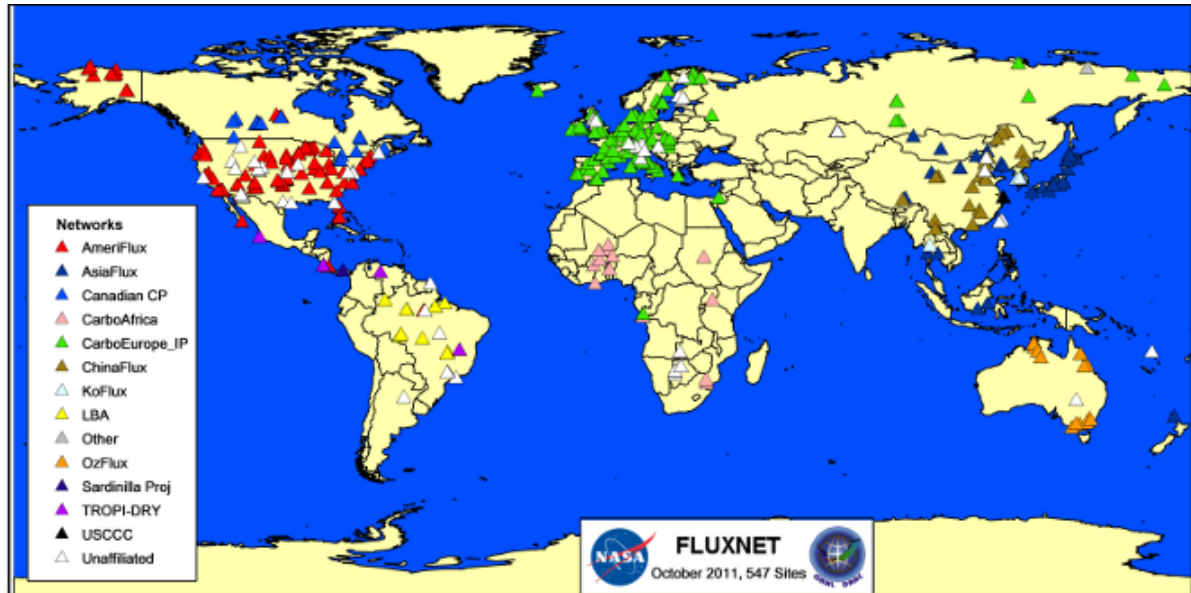
Micrometeorologistas tem feito medições da troca de CO<sub>2</sub> e vapor d'água entre a vegetação e a atmosfera desde o final da década de 1950 e início de 1960. No entanto, foi a partir do final de 1980 e início de 1990, com o desenvolvimento tecnológico de sensores de análises de resposta rápida e de sistemas de medidas de fluxos, que os cientistas puderam fazer medições contínuas de fluxos de CO<sub>2</sub> e vapor d'água para estendidos períodos através do método de covariância dos vórtices turbulentos. Os primeiros investigadores a realizarem essas medições contínuas, no intervalo de um ano, foram Wofsy et al. (1993), na Floresta Harvard, e Vermetten et al. (1994), na Holanda. A partir desses dois estudos pioneiros, outras torres com medições contínuas de fluxos micrometeorológicos foram então estabelecidas, principalmente na América do Norte e Europa (BALDOCCHI, 2001).

Deste modo, em 1996 se deu a formalização das redes regionais de medições de fluxos micrometeorológicos, EuroFlux e AmeriFlux e, desde então, pesquisadores científicos tem utilizado a técnica de covariância dos vórtices para adquirir medições contínuas das trocas de energia, vapor d'água e CO<sub>2</sub> entre a biosfera e a atmosfera para diversos tipos de ecossistemas (FALGE et al., 2001; BALDOCCHI, 2003; AUBINET, 2008). Com o sucesso das redes europeia e americana e, o lançamento do Satélite de Observação da Terra (Satélite Terra), a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) decidiu, em 1998, fundar o projeto de escala global de fluxos, FLUXNET, como uma forma de validação dos produtos do Satélite Terra. Com a necessidade da comunidade científica em obter estimativas do NEE para uma grande variedade de biomas para períodos mensais e anuais, os longos períodos de dados, obtidos através dessa rede, possibilitam sua utilização em grande escala, e também proporcionam informações para a avaliação dos produtos do sensoriamento remoto, como produtividade primária, evaporação, albedo, e absorção de energia (BALDOCCHI et al., 2001; FALGE et al., 2001).

O Projeto FLUXNET serve como um mecanismo para unificar as atividades de diversas redes regionais em uma rede global integrada, assegurando a qualidade e a compilação das medições micrometeorológicas de longo período para uma grande variedade, a nível mundial, de ecossistemas (BALDOCCHI et al., 2001).

Atualmente, mais de 500 torres de fluxos estão em contínua operação nos cinco continentes, formando as redes regionais, e, essas estão distribuídas latitudinalmente entre 70°

N e 30° S (Figura 1.2), abrangendo diversos tipos de biomas, tais como, florestas coníferas, decíduas, tropical, boreal, áreas agrícolas, pastagens, savanas, dentre outros. Além da coleta dos dados de fluxos, há também a de dados de planta, solo, dados hidrológicos e meteorológicos, nesses sítios (FLUXNET, 2011).



**Figura 1.2** – Distribuição continental das torres de fluxos das redes regionais, formando a rede global de fluxos (FLUXNET).

Fonte: FLUXNET (2011).

Essas medições de longo prazo de troca de carbono e energia proporcionam uma base integrada de dados, favorecendo diversos tipos de estudos e modelagem, permitindo dessa forma um entendimento dos processos que controlam esses fluxos, da variabilidade interanual, e da intercomparação entre diferentes sítios, como por exemplo, intercomparação entre ecossistemas naturais e alterados (GOULDEN et al., 1996; VALENTINI et al., 2000; BARR et al., 2002; HOLLINGER et al., 2004; AUBINET et al., 2005; dentre vários outros).

As principais redes regionais são, AmeriFlux, CarboEuroflux (chamada também de EuroFlux), AsiaFlux, e OzFlux (Austrália e Nova Zelândia). A natureza global do FLUXNET estende uma diversidade de biomas, climas regionais e métodos. Por exemplo, sítios na região da rede EuroFlux consistem, na maior parte, de florestas coníferas e decíduas. E, a rede Europeia utiliza uma metodologia padronizada, baseada nos analisadores de gás por infravermelho de caminho fechado (AUBINET et al., 2000; VALENTINI et al., 2000). Por outro lado, a rede Americana (na qual se inclui o Experimento de Grande Escala da Biosfera – Atmosfera na Amazônia (LBA)) possui uma maior diversidade em termos de números de biomas, tipos climáticos e métodos utilizados. A rede Americana inclui sítios em florestas

coníferas temperadas e decíduas, tundra, culturas agrícolas, floresta boreal e floresta tropical, pastagens, dentre outros. Em termos de metodologias, são utilizados os analisadores de gás por infravermelho de caminhos aberto e fechado para medição das flutuações de dióxido de carbono e vapor d'água (BALDOCCHI et al., 2001).

#### 1.4 Correção $u_*$

Diversos estudos reportam que a respiração noturna do ecossistema obtida através da soma dos fluxos turbulentos de  $\text{CO}_2$  com as mudanças na taxa de armazenamento é significativamente subestimada. Para tanto, alguns desses estudos fizeram comparações com as medições das respirações do solo e planta realizadas através de câmaras (GOULDEN et al., 1996; van GORSEL et al., 2007, 2009).

Com o propósito de melhor identificação dos dados de dióxido de carbono medidos através do método de covariância de vórtices, em condições muito estáveis, nas quais o processo de advecção é significativo, Goulden et al. (1996) propuseram um método de correção nos dados da troca líquida de  $\text{CO}_2$  do ecossistema, chamado correção  $u_*$ . O método consiste em substituir os dados de noites em que a intensidade da turbulência é baixa por dados de noites com características do solo similares, mas com turbulência suficiente o bastante para realizar a mistura vertical. Diversos pesquisadores aplicam essa correção nos dados do NEE baseados nas condições da turbulência atmosférica usando a velocidade de fricção do ar ( $u_*$ ) como um indicador. Este valor de  $u_*$  frequentemente é determinado visualmente examinando a regressão entre os valores noturnos de NEE e de  $u_*$  (GU et al., 2005), então, avaliam se há uma redução destes valores em condições de  $u_*$  baixo (pouca turbulência) e, em caso afirmativo, filtragens e posterior formas de preenchimentos são aplicados nos dados (GOULDEN et al., 1996).

Goulden et al. (1996), argumentam que a aplicação desta técnica durante períodos calmos aumentaram entre 0,5 a 1,0 t C ha<sup>-1</sup> a respiração anual calculada em estudo realizado em uma floresta decídua no nordeste dos Estados Unidos (Floresta Harvard), com medições dos fluxos entre o período de 1990 a 1994. Reportam também que, essa metodologia foi a grande responsável pela revisão de prévia estimativa de sequestro de carbono realizada em 1991 (-3,7 t C ha<sup>-1</sup>), e após a aplicação da referida técnica a estimativa apresentou um sequestro de -2,8 t C ha<sup>-1</sup>.

Em estudos realizados no leste da Amazônia por Miller et al. (2004), as análises da relação entre NEE noturno e  $u_*$  confirmaram que a soma anual precisou ser corrigida para o efeito da grande estabilidade atmosférica noturna. Antes da correção os autores haviam encontrado que a floresta indicava ser um forte absorvedor de carbono da atmosfera ( $-3,9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), e após a correção, os resultados passaram a apresentar uma fonte líquida de carbono ( $0,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ).

Assim, diversos autores afirmam que o uso da técnica  $u_*$  tende a aumentar a estimativa anual da respiração do ecossistema e a decrescer a estimativa anual da absorção líquida de  $\text{CO}_2$  pelo ecossistema (GOULDEN et al., 1996; AUBINET et al., 2000; BARR et al., 2002; SALESKA et al., 2003). Outro consenso entre diversos pesquisadores, quanto ao uso da correção  $u_*$ , diz respeito ao risco de uma possível contagem dupla dos fluxos em condições em que o armazenamento seria significativo, podendo gerar uma superestimativa dos fluxos da mesma ordem de magnitude que a subestimativa que se pretendia corrigir (AUBINET, 2008). Gu et al. (2005) argumentam que se a mudança no armazenamento de  $\text{CO}_2$  no dossel não for adicionada na estimativa do fluxo noturno, a referida metodologia pode ser incorretamente aplicada e uma contagem dupla dos fluxos pode ocorrer. Em concordância, Papale et al. (2006) alertam que, embora sendo o mais amplamente método usado para contornar o problema da subestimativa dos fluxos de  $\text{CO}_2$  noturno, a correção  $u_*$  é afetada por diversos inconvenientes e deve ser aplicada com cuidado. Os autores salientam dois pontos a considerar, onde, uma implícita aplicação da correção pode levar a grandes erros. De fato, em noites com condições de pouca turbulência, o  $\text{CO}_2$  pode ser removido por advecção ou armazenado no interior do dossel. No primeiro caso, a aplicação da correção é completamente justificada. No entanto, no segundo caso, o  $\text{CO}_2$  estocado pode ser transportado verticalmente para níveis superiores à medida que a intensidade de mistura for aumentando, e, então, esse ar rico em  $\text{CO}_2$  é contabilizado quando esse passar pelo nível do sensor. Os autores concluem então, que se uma correção tem sido aplicada durante esse período de armazenamento, este fluxo pode então ter sido duas vezes contabilizado.

Atualmente, a suposição de que medições feitas durante períodos turbulentos estão livres de erros tem sido questionada por recentes estudos (LEE et al., 2004; WOHLFAHRT et al., 2005; van GORSEL et al., 2007, 2009). De acordo com van Gorsel et al. (2007, 2009), a principal desvantagem da metodologia utilizada para minimizar os erros na estimativa noturna, é que esse método utiliza medições de turbulência acima do dossel para determinar o grau de acoplamento entre os fluxos de ar no interior e acima do dossel. Portanto, este método está sujeito a vários inconvenientes, visto que as condições nas quais o interior do dossel se

acopla dinamicamente ao ar acima ainda não são inteiramente conhecidas, (OLIVEIRA et al., 2012). Desta forma, Aubinet (2008) conclui que os fluxos acima do dossel podem não ser representativos dos fluxos locais. Sendo a velocidade de fricção também um fluxo, estudos recentes tem mostrado que os dados obtidos através dessa técnica de filtragem podem estar associados a erros, o que induz a uma nova fonte de incertezas nas estimativas de sequestro de carbono, principalmente nas estimativas em longo prazo.

Outras metodologias foram propostas para a correção dos fluxos de CO<sub>2</sub> noturno. Dentre essas, van Gorsel et al. (2007, 2008) propuseram uma nova metodologia, a qual, é baseada na suposição de que a advecção é relativamente pequena em comparação ao fluxo turbulento vertical e o termo de armazenamento de CO<sub>2</sub> nas poucas horas após o pôr do Sol. Nos referidos estudos os autores mostraram que a soma do fluxo turbulento e a mudança no armazenamento alcança um valor máximo durante esse período. O pico dessa soma é, então, usado para derivar uma função de resposta à temperatura para a obtenção da respiração do ecossistema noturna (metodologia definida como  $R_{Rmax}$ ). van Gorsel et al. (2009), usando dados de 25 estações de fluxos de uma variedade de ecossistemas florestais distribuídas globalmente, examinaram a generalidade dessa nova metodologia. Os autores encontraram um ótimo acordo entre a respiração obtida através da referida metodologia e a obtida através de medições independentes (derivadas de câmaras, a qual é de particular importância). Outra vantagem evidenciada, foi que terrenos íngrimes não se mostrou um fator limitante para o uso do  $R_{Rmax}$ . Desta forma, os autores concluem que a metodologia proposta providencia uma excelente estimativa da respiração noturna do ecossistema.

Em estudos realizados por Acevedo et al. (2009) uma nova metodologia também foi empregada, na qual o uso do desvio padrão da velocidade vertical ( $\sigma_w$ ) foi utilizado ao invés de  $u^*$ , os autores sugerem o uso do  $\sigma_w$  devido ao fato de que, este não está sujeito as variações devido as trocas de mesoescala. Outra vantagem do uso de  $\sigma_w$  é que a determinação do limite na qual os fluxos turbulentos convergem para valores aproximadamente constantes é mais simples e em valores menores da escala turbulenta, reduzindo a quantidade de dados que precisam ser substituídos, e isso resultará em maiores taxas de respiração das séries classificadas como turbulentas.

De qualquer forma, apesar das dificuldades a elas associadas, é certo que algum tipo de correção é necessário nos casos em que há advecção horizontal de CO<sub>2</sub>. Além disso, todas as observações, sem exceção, mostram que o NEE tende a zero no limite de turbulência também tendendo a zero. Este fato levou a correção  $u^*$  a ser utilizada em todos os sítios para os casos de pouca intensidade turbulenta. No entanto, a possibilidade de que tal redução esteja



associada à intermitência, jamais considerada, pode, entretanto, determinar que a correção não seja necessária, ou, seja excessiva em alguns casos. Esta hipótese será investigada no presente trabalho.

## **1.5 Turbulência intermitente**

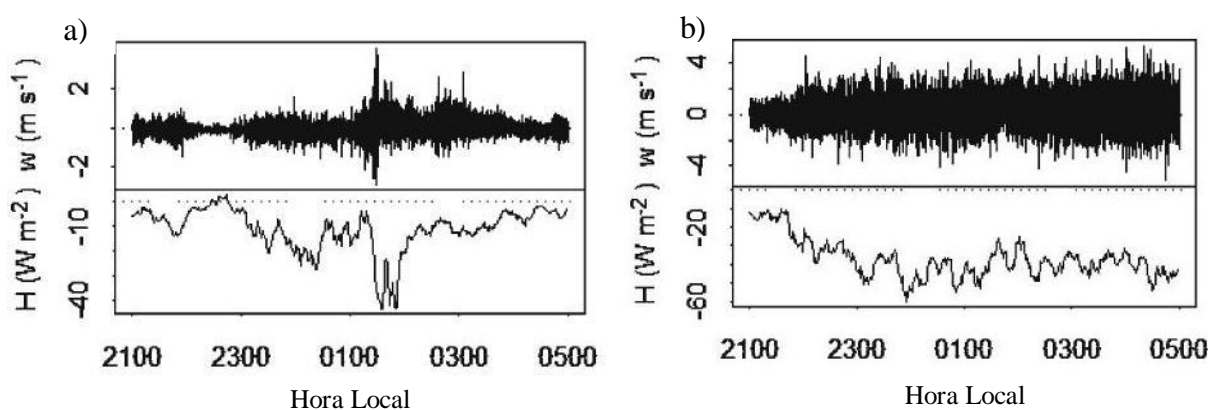
Em noites com condições de grande estabilidade atmosférica ocorre com grande frequência a denominada turbulência intermitente. Essa turbulência é caracterizada por períodos de pouca ou nenhuma atividade seguidos por eventos de intensa mistura turbulenta (NAPPO, 1991; COULTER; DORAN, 2002; WOHLFAHRT et al., 2005; ACEVEDO et al., 2006). Alguns estudos abordam a natureza física dos eventos intermitentes (NAPPO, 1991; Van de WIEL et al., 2002; ACEVEDO; FITZJARRALD, 2003; SUN et al., 2004; COSTA et al., 2011). Dentre esses, alguns estudos indicam que essa se origina primariamente a partir de processos acima da camada limite que se propagam para baixo (SUN et al., 1998), porém Van de Wiel et al. (2002) e Costa et al. (2011) identificaram um outro tipo de intermitência, que constitui um modo natural do sistema, e que é originado na interação do ar diretamente com superfície. Além disso, estudos recentes (BOING et al., 2010) associaram o fenômeno a instabilidades geradas pela presença de um perfil de vegetação. Entretanto, análises sobre a quantificação dos efeitos do processo intermitente da turbulência nas trocas de escalares, ainda são escassas.

### **1.5.1 Intermitência afetando fluxos de CO<sub>2</sub>**

Massman e Lee (2002) afirmam que as dificuldades nas estimativas de fluxos noturnos estão em grande parte nos mecanismos meteorológicos e não instrumental. Portanto, para assegurar o progresso sobre as questões dos fluxos noturnos e outras especulações, os autores incentivam a realização de um número maior em pesquisas que busquem compreender como as propriedades meteorológicas, como a intermitência turbulenta, afetam as estimativas dos fluxos noturnos.

Entre os estudos que abordaram este problema, Wohlfahrt et al. (2005) observaram, sob essas condições de intermitência, notáveis aumentos nas estimativas dos fluxos de  $\text{CO}_2$ . Baseados somente nos dados de covariância dos vórtices noturno, os autores argumentam que havia dúvidas se esses aumentos nos fluxos de  $\text{CO}_2$  representavam, de fato, um genuíno transporte de  $\text{CO}_2$  não contabilizado pelo termo de armazenamento e, se, esses deveriam ser aproveitados. Em conformidade, Hollinger e Richardson (2005) especularam que a intermitência atmosférica adiciona uma incerteza aos valores observados de fluxos de  $\text{CO}_2$ .

Em estudo realizado por Acevedo et al. (2006), dedicado inteiramente em compreender como a mistura intermitente afeta os fluxos da superfície na camada limite noturna, duas noites com características distintas de turbulentas foram comparadas, uma com turbulência intermitente e outra com turbulência mais bem desenvolvida ao longo da noite, bem como, a dependência dos fluxos em relação à intensidade da turbulência durante o período noturno, em especial durante o período de intermitência turbulenta. Conforme mostrado pelos autores, durante os eventos de intermitência (Figura 1.3a, painel superior), ocorre uma grande fração do total da troca dos escalares entre a superfície e a atmosfera (Figura 1.3a, painel inferior) (neste caso, somente o fluxo de calor sensível é mostrado), indicando a forte dependência da transferência total dos fluxos noturnos em relação a esses eventos. Por outro lado, em noites com turbulência mais bem desenvolvida (Figura 1.3b, painel superior), as perturbações dos fluxos ocorrem de maneira menos acentuada (Figura 1.3b, painel inferior).



**Figura 1.3** – Evolução temporal da velocidade vertical turbulenta (painéis superiores) e do fluxo de calor sensível (painéis inferiores) para duas diferentes noites: uma caracterizada por turbulência intermitente (a), e a outra por turbulência bem desenvolvida (b). (Adaptado de Acevedo et al. (2006)).

Conforme salientam os autores, os eventos intermitentes ocorrem em diferentes escalas de tempo, fazendo com que os fluxos noturnos sejam altamente dependentes do

período utilizado para o cálculo das médias. Assim, em situações de turbulência intermitente, os autores sugerem que o uso de janelas temporais variáveis deve ser a metodologia mais adequada para a estimativa dos fluxos, em especial o de CO<sub>2</sub>, já que os eventos de intermitência turbulenta podem levar a variações repentinas na concentração de dióxido de carbono.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As noites utilizadas nas análises foram aquelas nas quais os sinais turbulentos tiveram uma boa qualidade (não apresentaram inversão de sinal), durante todo o período noturno considerado neste estudo (21 às 5h, horário local).

### 2.1 Descrição dos sítios analisados em estudo de caso

#### 2.1.1 São João do Triunfo

Este sítio experimental, pertencente à Universidade Federal do Paraná, está situado em uma área de floresta Ombrófila Mista, localizada no município de São João do Triunfo (25°34'18"S, 50°05'56"W), centro sul do estado do Paraná. Sua vegetação é caracterizada como pertencente à Floresta Ombrófila Mista com predominância da espécie arbórea pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*), sendo a altura média do dossel de aproximadamente 25 m de altura (Figura 2.1). A área pode ser classificada como vegetação primária muito alterada ou como formação secundária avançada, visto que, a mesma possui características estruturais de formações primárias e intervenções antrópicas características de formações secundárias (SCHAAF et al., 2005).

Em operação contínua desde novembro de 2009, a torre micrometeorológica instalada neste sítio possui 32 m de altura, na qual são realizadas as medições dos fluxos de calor sensível, calor latente e dióxido de carbono através do sistema *Eddy Covariance*, composto por um sensor Anemômetro sônico tridimensional CSAT3 (Campbell Scientific) e um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto LI-7500 (LI-COR) com uma razão de amostragem de 10 Hz instalados a 32 m de altura (Figura 2.1b). Maiores detalhes do sítio, bem como, dos instrumentos de medições e procedimentos, podem ser encontrados em Oliveira (2011).



**Figura 2.1** – Sítio São João do Triunfo. (a) vegetação próxima à torre micrometeorológica e, (b) sistema *Eddy Covariance* em primeiro plano, e, ao fundo, o topo da floresta.  
**Fonte:** Oliveira (2011).

Os fluxos deste sítio usados neste estudo consistiram de 217 noites de fluxos de calor sensível, 124 de calor latente e 170 de dióxido de carbono, do período de novembro de 2009 a outubro de 2010. Os fluxos foram calculados com janelas de cinco minutos.

### 2.1.2 Santarém

Este sítio pertence ao Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – Programa LBA-ECO, no Pará. O sítio está situado em uma área de floresta tropical úmida, na Floresta Nacional do Tapajós (FLONA Tapajós), localizado a 67 km do município de Santarém ( $2^{\circ}51'S$ ;  $54^{\circ}58'W$ ), no oeste do estado do Pará. A floresta, classificada como primária, possui formações naturais constituídas por uma complexa diversidade de árvores, nas quais a altura média do dossel é de aproximadamente 40 m, com algumas árvores emergentes atingindo até 55 m de altura (Figura 2.2). Uma descrição detalhada deste sítio, como clima local, terreno e instrumentos, é dada por Saleska et al. (2003).



**Figura 2.2** – Sítio Santarém (km 67). (a) vegetação próxima a torre micrometeorológica e (b) torre micrometeorológica de 64 m de altura.

**Fonte:** LBA-ECO (2008).

As medições dos fluxos de calor sensível, calor latente e  $\text{CO}_2$  para o sítio de Santarém, foram feitas através do método de covariância dos vórtices consistindo de um Anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Logan UT) e um analisador de gás de caminho fechado (IRGA, LI-6262, Licor, Lincoln, NE) com uma amostragem de 8 Hz a um nível de 58 m de altura em uma torre micrometeorológica de 64 m. Os fluxos foram calculados com uma média sobre o intervalo de uma hora. Foram utilizadas 1059 noites de fluxo de calor sensível e 935 de dióxido de carbono, compreendidas entre janeiro de 2002 a janeiro de 2006. O fluxo de calor latente deste sítio não foi analisado no presente estudo.

## 2.2 Descrição das redes de fluxos

Dados de vegetação e de fluxo de  $\text{CO}_2$  da base de dados (Nível 2)<sup>3</sup> do Projeto FLUXNET [Disponível em: <<http://fluxnet.ornl.gov>>. Acesso em: 17 set. 2011] foram utilizados. Os dados de fluxos analisados no presente estudo foram medidos entre os anos de 2000 e 2010, com algumas estações possuindo uma maior ou menor base de dados (tamanho não mostrado). Para a análise do comportamento dos fluxos de  $\text{CO}_2$  noturno, estimados pelas redes locais, foram exploradas 115 estações de fluxos, das quais 92 são pertencentes à rede

<sup>3</sup> Nível 2 - Dados verificados e formatados pelo CDIAC (Centro de Análise de Informação de Dióxido de Carbono): Os dados recebidos a partir de sítios individuais são analisados e incorporados a um banco de dados. O processo de revisão inclui verificações de unidades consistentes, convenções de nomenclatura, dentre outros requisitos.

AmeriFlux (sítios localizados no Canadá, México e EUA) e 23 à EuroFlux (Suíça, República Checa, Alemanha, Finlândia, França, Israel, Itália, Portugal e Suécia). Deste modo, as análises se estenderam para uma grande diversidade de biomas e climas, incluindo sítios em floresta boreal, coníferas temperadas e decíduas, culturas agrícolas, tundra, pastagens, dentre outros (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1** – Tipo de ecossistema, altura do dossel e informação topográfica e geográfica para 115 sítios da rede FLUXNET investigados no presente estudo. De acordo com o IGBP (Programa Internacional da Geosfera-Biosfera), os tipos de vegetação estão classificados em: ENF = *Evergreen Needleleaf Forest*, OSH = *Open Shrubland*, CSH = *Closed Shrubland*, CRO = *Crop*, DBF = *Deciduous Broadleaf Forest*, GRA = *Grassland*, EBF = *Evergreen Broadleaf Forest*, MF = *Mixed Forest*, WSA = *Woody Savannas*, WET = *Wetland*. NA significa que a referida informação não foi verificada.

(continua)

Sítio	Vegetação	Altura dossel	Topografia	Latitude	Longitude
CANS1	ENF	18.5	plana	55.8792	-98.4839
CANS2	ENF	15	plana	55.9058	-98.5247
CANS3	ENF	5.5	plana	55.9058	-98.5247
CANS4	ENF	5.5	plana	55.9117	-98.3822
CANS5	ENF	4.5	plana	55.8631	-98.4850
CANS6	OSH	1	plana	55.9167	-98.9644
CANS7	OSH	0.1	plana	56.6358	-99.9483
CANS8	OSH	0.1	plana	55.8981	-98.2161
MXLpa	OSH	2.5*	relativamente plana	24.1293	-110.4380
CHDav	ENF	NA	montanha	46.8153	9.8559
CZBK1	ENF	10	montanha	49.5021	18.5368
DEKli	CRO	0.55	plana	50.8929	13.5225
DEObe	ENF	18	plana	50.7836	13.7196
DETha	ENF	26	suavemente inclinada	50.9636	13.5669
FIHyy	ENF	14	plana	61.8474	24.2948
FISod	ENF	13	plana	67.3619	26.6378
FRFon	DBF	20	plana	48.4763	2.7801
FRHes	DBF	13	plana	48.6742	7.0656
FRLBr	ENF	20	plana	44.7171	-0.7693
FRLq1	GRA	0.1*	suavemente ondulada	45.6392	2.7370
FRLus	GRA	0.5*	plana	46.4175	0.1193

**Tabela 2.1** – Tipo de ecossistema, altura do dossel e informação topográfica e geográfica para 115 sítios da rede FLUXNET investigados no presente estudo.

(continuação)

Sítio	Vegetação	Altura dossel	Topografia	Latitude	Longitude
FRPue	EBF	6	vale	43.7414	3.5958
ILYat	ENF	12	ondulada	31.3470	35.0520
ITamp	GRA	0.3*	vale	41.9041	13.6052
ITBon	ENF	NA	ondulada	39.4778	16.5347
ITCol	DBF	25	suavemente inclinada	41.8494	13.5881
ITLav	ENF	33	montanha	45.9553	11.2812
ITMal	GRA	0.2*	montanha	46.1167	11.7028
PTEsp	EBF	20	plana	38.6394	-8.6018
SEDeg	GRA	NA	plana	64.1820	19.5567
SEKno	ENF	22*	plana	60.9983	16.2173
SESk2	ENF	25	plana	60.1297	17.8401
USARb	GRA	0.25*	plana	35.5497	-98.0402
USARc	GRA	0.25*	plana	35.5465	-98.0401
USARM	CRO	0.25	plana	36.6058	-97.4888
USAud	GRA	0.15	ondulada	31.5907	-110.5092
USBar	DBF	19	montanha	44.0646	-71.2881
USBkg	CRO	0.30	suaves colinas	44.3453	-96.8362
USBlk	ENF	19*	suavemente ondulada	44.1580	-103.6500
USBlo	ENF	6.5	plana	38.8953	-120.6328
USBo2	CRO	2*	plana	40.0090	-88.2900
USCaV	GRA	0.3	ondulada	39.0633	-79.4208
USCed	MF	5.7	relativamente plana	39.8379	-74.3791
USChR	DBF	26*	montanha	35.9311	-84.3324
USCtn	GRA	0.3	plana	43.9500	-101.8466
USDix	MF	13	plana	39.9712	-74.4346
USDk1	GRA	0.45	plana	35.9712	-79.0934
USDk2	MF	25	plana	35.9736	-79.1004
USDk3	MF	19	plana	35.9782	-79.0942
USFmf	ENF	18	plana	35.1426	-111.7273



**Tabela 2.1** – Tipo de ecossistema, altura do dossel e informação topográfica e geográfica para 115 sítios da rede FLUXNET investigados no presente estudo.

(continuação)

Sítio	Vegetação	Altura dossel	Topografia	Latitude	Longitude
USFPe	GRA	0.3	plana	48.3077	-105.1019
USFR2	WSA	1.3*	planalto	29.9495	-97.9962
USFuf	ENF	18	plana	35.0890	-111.7620
USFwf	CRO	0.25	relativamente plana	35.4454	-111.7718
USGLE	ENF	12.1	suavemente ondulada	41.3644	-106.2394
USGoo	GRA	0.3	relativamente plana	34.2547	-89.8735
USHo1	MF	20	plana	45.2041	-68.7402
USHo2	MF	20	plana	45.2091	-68.7470
USHo3	MF	18	plana	45.2072	-68.7250
USIB1	CRO	2*	plana	41.8593	-88.2227
USIB2	CRO	1*	plana	41.8406	-88.2410
USICH	OSH	0.15	relativamente plana	68.6070	149.2960
USICs	WET	0.2*	relativamente plana	68.6060	-149.3110
USICt	OSH	0.15	relativamente plana	68.6060	-149.3040
USIvo	OSH	0.1*	montanha	68.4865	-155.7480
USKFS	GRA	0.7*	plana	39.0561	-95.1907
USKon	GRA	0.4	ondulada	39.0824	-96.5603
USKS1	ENF	15	plana	28.4583	-80.6709
USKS2	CSH	1.75	plana	28.6086	-80.6715
USLos	CSH	2	plana	46.0827	-89.9792
USLWW	GRA	0.4	plana	34.9604	-97.9789
USMe1	NA	NA	ondulada	44.5794	-121.5000
USMe2	ENF	14	suavemente ondulada	44.4523	-121.5574
USMe3	WSA	3.11	suavemente ondulada	44.3154	-121.6078
USMe4	ENF	23	relativamente plana	44.4992	-121.6224
USMe5	WSA	4.3	ondulada	44.4372	-121.5668
USMe6	WSA	5.2	suavemente ondulada	44.3238	-121.6060
USMOz	DBF	24.2	suavemente ondulada	38.7441	-92.2000
USMpj	OSH	NA	suavemente ondulada	34.4385	-106.2377
USMRf	ENF	34	montanha	44.6465	-123.5515

**Tabela 2.1** – Tipo de ecossistema, altura do dossel e informação topográfica e geográfica para 115 sítios da rede FLUXNET investigados no presente estudo.

(continuação)

Sítio	Vegetação	Altura dossel	Topografia	Latitude	Longitude
USNC1	NA	0.23	relativamente plana	35.8115	-76.7115
USNC2	MF	14.1	plana	35.8031	-76.6679
USRo1	CRO	2.4	plana	44.7143	-93.0898
USRo3	CRO	2.4*	plana	44.7217	-93.0893
USSeg	GRA	0.3	plana	34.3623	-106.7020
USSes	GRA	0.75*	plana	34.3349	-106.7442
USSFP	CRO	2.5	plana	43.2408	-96.9020
USSlt	DBF	9.5	relativamente plana	39.9138	-74.5960
USSnd	GRA	0.8	relativamente plana	38.0373	-121.7536
USSP1	EBF	24.2	plana	29.7381	-82.2188
USSP2	ENF	10	plana	29.7648	-82.2448
USSP3	EBF	14	plana	29.7548	-82.1633
USSRC	OSH	1.7*	suavemente ondulada	31.9083	-110.8395
USSRM	OSH	2.5	plana	31.8214	-110.8661
USSyv	MF	22	relativamente plana	46.2420	-89.3477
USTon	MF	9.4	relativamente plana	38.4316	-120.9660
USTwt	CRO	1*	plana	38.1055	-121.6521
USUMB	DBF	21	plana	45.5598	-84.7138
USVar	GRA	0.35	plana	38.4067	-120.9507
USVcm	ENF	19.6	montanha	35.8884	-106.5321
USVcp	ENF	12.5*	vale	35.8624	-106.5974
USWBW	DBF	25	colina	35.9588	-84.2874
USWCr	DBF	24.2	ondulada	45.8059	-90.0799
USWhs	OSH	1.10	suavemente ondulada	31.7438	-110.0522
USWi0	ENF	3.5	plana	46.6188	-91.0814
USWi1	DBF	6	relativamente plana	46.7305	-91.2329
USWi3	DBF	23	plana	46.6347	-91.0987
USWi4	ENF	18	suavemente ondulada	46.7393	-91.1663
USWi5	ENF	NA	plana	46.6531	-91.0858
USWi6	OSH	0.5	plana	46.6249	-91.2982

**Tabela 2.1** – Tipo de ecossistema, altura do dossel e informação topográfica e geográfica para 115 sítios da rede FLUXNET investigados no presente estudo.

(conclusão)					
Sítio	Vegetação	Altura dossel	Topografia	Latitude	Longitude
USWi8	NA	1.5	relativamente plana	46.7223	-91.2524
USWi9	ENF	2*	relativamente plana	46.6188	-91.0814
USWjs	OSH	0.2*	plana	34.4255	-105.8615
USWkg	GRA	0.5	colina	31.7365	-109.9419
USWrc	ENF	56.3	vale	45.8205	-121.9519

\* valores estimados através de imagens fotográficas ou obtidos na literatura.

Fonte: FLUXNET (2011).

As características físicas dos ecossistemas como índice de área foliar (não mostrado) e altura do dossel foram comparadas com as características da turbulência noturna (obtidas através dos fatores de intermitência) com o intuito de identificar alguns padrões entre o comportamento da turbulência e as características físicas desses ecossistemas.

Na análise do comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub> e NEE ao longo do período noturno, as informações topográficas das estações descritas na Tabela 2.1 foram utilizadas como uma forma de possível indicação da ocorrência, ou não, do efeito de drenagem dos fluxos de CO<sub>2</sub> quando a intensidade da turbulência foi insuficiente na realização do transporte vertical do escalar. Pois, conforme mencionam Grace et al. (1996) e Lee (1998), a drenagem dos fluxos é uma possível razão do motivo da subestimação dos fluxos medidos durante períodos de grande estabilidade atmosférica.

### 2.2.1. Instrumentos e métodos utilizados na determinação dos fluxos de CO<sub>2</sub>

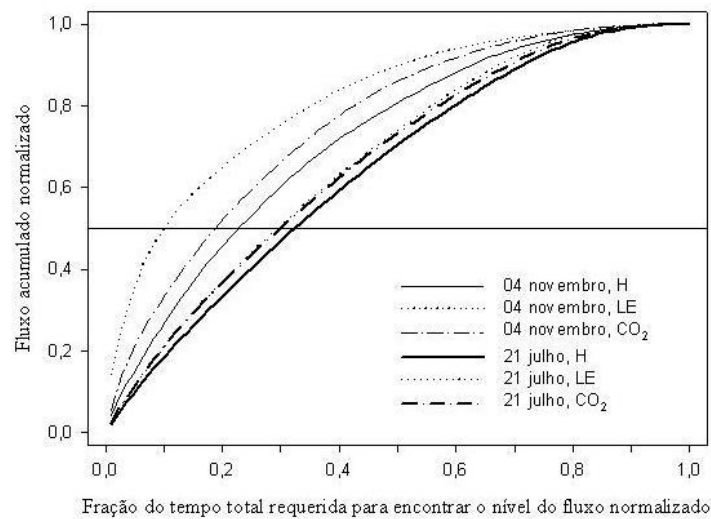
Instrumentos típicos nos sítios da rede FLUXNET incluem um anemômetro sônico tridimensional, que mede as três componentes da velocidade do vento - velocidade horizontal do vento a leste ( $u$ ), velocidade horizontal do vento a norte ( $v$ ) e a velocidade vertical do vento ( $w$ ) - e a temperatura do ar, e analisadores de gás por infravermelho de caminho aberto e/ou fechado, que medem as concentrações de vapor d'água e dióxido de carbono. Essas medições através desses sensores de resposta rápida possibilitam as estimativas dos fluxos de CO<sub>2</sub>, calor sensível e calor latente através do método de covariância dos vórtices (seção 1.1).

Modelos CSAT3 (Campbell Scientific, Logan UT) e Solent 1012R2 (Gill Instruments, Lynton, UK) são exemplos de alguns dos anemômetros sônicos utilizados nos sítios, e, Li-7500 e Li-6262 (Li-Cor Inc., Lincoln NE) são exemplos de analisadores de gás por infravermelho de caminho aberto e fechado, respectivamente.

Para medição das flutuações de CO<sub>2</sub> e vapor d'água, a rede Europeia utiliza uma metodologia padronizada, baseada em analisadores de gás por infravermelho de caminho fechado (AUBINET et al., 2000; VALENTINI et al., 2000). Por outro lado, na rede Americana é utilizada os analisadores de gás por infravermelho de caminho aberto e fechado (BALDOCCHI et al., 2001). Segundo Leuning e Judd (1996), essas duas diferentes metodologias têm suas vantagens e desvantagens, e ambas podem prover resultados igualmente satisfatórios. Informações detalhadas sobre as diferenças entre os sistemas de caminho aberto e fechado, bem como, dos procedimentos e descrição dos sensores utilizados nas medições dos fluxos de massa e energia através do método de covariância dos vórtices, podem ser obtidas em um recente manual elaborado por Munger e Loescher.

### **2.3 Quantificação da intermitência**

A quantificação da intermitência turbulenta é definida através do fator de intermitência (FI), que se refere à fração do tempo total requerida para encontrar 50% do total do fluxo noturno. O método, proposto por Howell e Sun (1999), consiste em determinar os fluxos em intervalos regulares, tipicamente de 5 minutos, para todo o período noturno. A seguir, a série de fluxos noturnos deve ser ordenada, do valor maior, para o menor. O FI se refere à fração do total da série necessária para que se encontre 50% do somatório do fluxo noturno de todas as séries. Deste modo, em casos de noites com turbulência bem desenvolvida, o fluxo tende a ser igualmente distribuído sobre o período noturno e desta forma, os valores de FI se aproximam de 0,5. Por outro lado, em condições muito intermitentes, o nível de 50% do total do fluxo pode ser realizado por eventos intermitentes que correspondam a uma pequena porção do tempo total da noite, fazendo com que os valores de FI se aproximem de zero (COULTER; DORAN, 2002; ACEVEDO et al., 2006). Como exemplo, a Figura 2.3 mostra os valores de FI para duas noites com padrões distintos de turbulência: 04 de novembro de 2009 (noite intermitente) e 21 de julho de 2010 (noite com intensa atividade turbulenta).



**Figura 2.3** – Fração normalizada acumulativa do total do fluxo noturno como uma função da fração do tempo total requerida para encontrar o nível do fluxo. As diferentes curvas representam duas diferentes noites e os fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), de acordo com a legenda. A linha sólida horizontal em 0.5 representa a metade do total do fluxo noturno usada para definir o fator de intermitência. Dados de fluxos noturnos do sítio de São João.

Conforme mostrado na Figura 2.3, em condição muito estável como na noite de 04 de novembro de 2009, os valores de FI ficam próximos de zero ( $\text{FI} = 0,10$  para o fluxo de calor latente), enquanto que em noite com turbulência mais bem desenvolvida (21 de julho de 2010) os valores de FI se aproximam mais de 0,5 ( $\text{FI} = 0,32$  para o fluxo de calor sensível) indicando que o fluxo é mais igualmente distribuído ao longo do período noturno.

É importante destacar dois aspectos que caracterizam limitações no método e na sua aplicabilidade em grandes conjuntos de dados, como se propõe realizar nesta dissertação. Em primeiro lugar, o método só funciona de maneira satisfatória para fluxos que não mudem de sinal ao longo da noite, pois, do contrário, a soma do fluxo noturno pode até mesmo ser menor que aquele obtido em eventos específicos. Esta, a princípio, é uma condição que só deveria comprometer mais seriamente a determinação de FI para fluxos de calor latente, pois estes não têm direção preferencial no período noturno, enquanto que fluxos de calor sensível tendem sempre a ser negativos e os fluxos de  $\text{CO}_2$  tendem a ser positivos no período. Porém, em condições muito estáveis, os fluxos podem se comportar de maneira mais variável, em geral devido a processos de baixa frequência, que não têm direção preferencial (VICKERS; MAHRT, 2006; ACEVEDO et al., 2007), fazendo com que a ocorrência de fluxos de calor sensível ou  $\text{CO}_2$  com sinais opostos aos normalmente esperados não seja incomum. Esta limitação, em particular, tende a ser mais crítica quando os fluxos são estimados com janelas de dados mais longas, que estão mais sujeitas à influência dos processos de baixa frequência, que recentemente também vem sendo referidos como de submeso escala (MAHRT, 2009).

Este fato traz à tona a segunda limitação da presente análise que deve ser destacada, que é o fato de que neste estudo os FI serão estimados a partir de estimativas de fluxos realizadas em períodos de 30 min, muito maiores do que os 5 min propostos originalmente por Howell e Sun (1999), e utilizados depois por Coulter e Doran (2002) e por Acevedo et al. (2006). Esta diferença, por sua vez, tem duas implicações, ambas negativas. A primeira, já referida, é que as estimativas ficam mais sujeitas à influência de processos de baixa frequência, que tendem a ser mais erráticos e variáveis, podendo afetar até mesmo o sinal da estimativa. A segunda é que as séries a serem ordenadas para uma dada noite ficam razoavelmente curtas, pois, considerando noites com duração de 8 horas, haverá apenas 16 dados de meia hora por noite. É importante destacar, entretanto, que esta medida é necessária para que se possa fazer uma análise utilizando dados das redes mundiais de fluxos, que tipicamente utilizam a janela de 30 minutos para publicarem seus resultados. No caso, a estratégia adotada é assumir que as limitações da metodologia serão superadas pelo grande conjunto de dados utilizados na análise. Assim, assume-se que é possível desprezar os dados em que os fluxos noturnos apresentaram inversão de sinal, pois o conjunto de dados é suficientemente longo e há um número suficientemente grande de estações, de forma que os resultados são significativos, convergindo estatisticamente, mesmo sem as séries desprezadas. A utilização de séries de 30 min, que totalizam 16 observações para cada noite na metodologia proposta para a determinação de FI faria com que estes pudessem assumir apenas valores  $n/16$ , onde  $n$  é um inteiro de 1 a 8. Para evitar essa “discretização” dos valores, um passo adicional foi aplicado à metodologia de determinação de FI. Este é a interpolação das séries de 16 pontos com os fluxos ordenados para séries de 100 pontos. Com isso, podem ser obtidos valores significativos de FI com precisão de duas casas decimais.

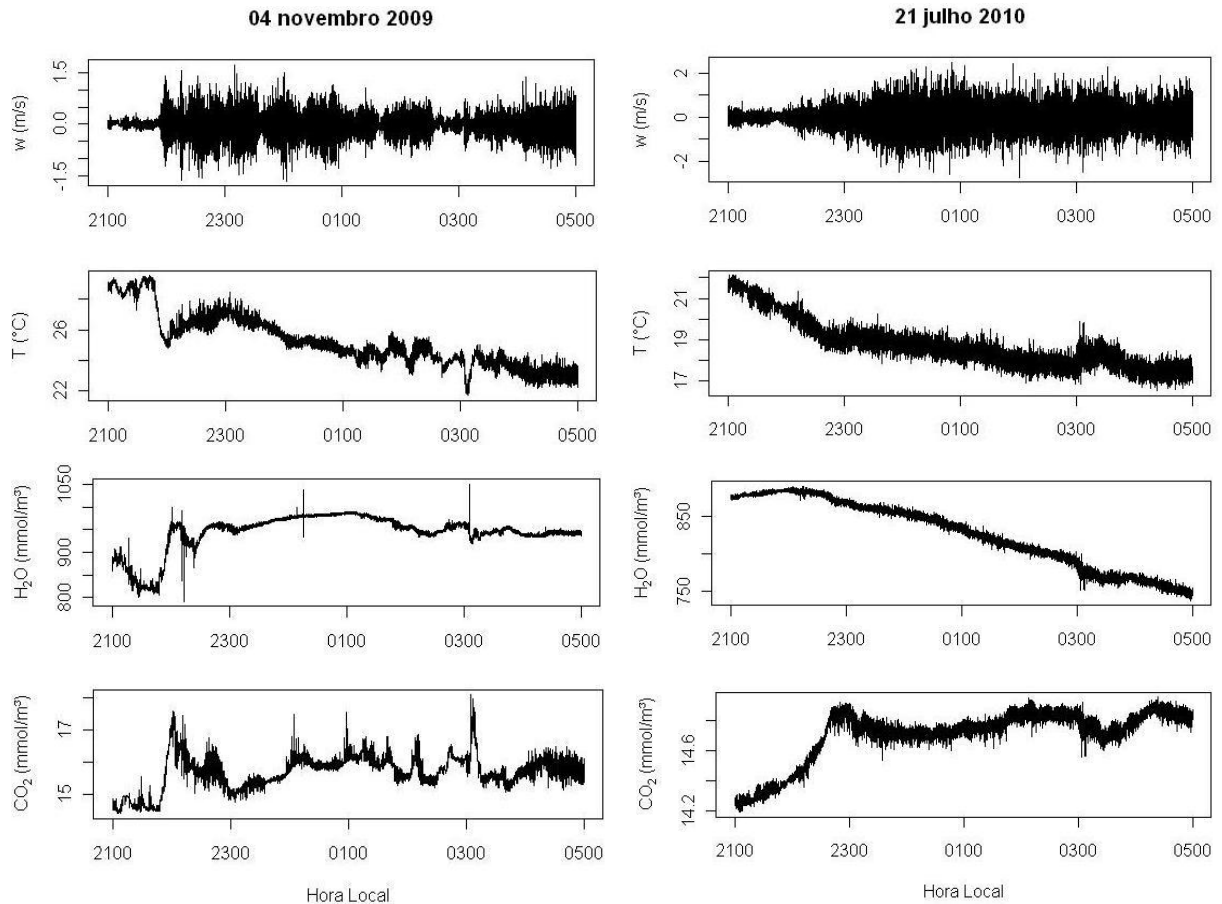
## 3 FATORES DE INTERMITÊNCIA

### 3.1 Estudo de caso

Para a análise de como as variações da intensidade da turbulência afetam o comportamento dos escalares em geral, duas noites com padrões diferentes no comportamento da turbulência são analisadas: 04 de novembro de 2009 (noite intermitente) e 21 de julho de 2010 (com turbulência bem desenvolvida) para o sítio de São João (Figura 3.1). A noite de 04 de novembro (coluna à esquerda) apresentou intensidade turbulenta muito baixa no início do período noturno, ocorrendo uma transição para um estado mais turbulento em torno das 2200 HL, como pode ser observado na evolução temporal da velocidade vertical (painel superior, à esquerda). No momento de transição, observa-se uma notável flutuação nos valores de todos os escalares, em especial o  $\text{CO}_2$ , o qual apresentou um pico máximo durante essa transição da condição calma para turbulenta. Assim, supõe-se que tal pico esteja associado à súbita transferência de ar com altas concentrações de  $\text{CO}_2$  que acumularam no interior do dossel enquanto a condição calma prevaleceu (painel inferior, à esquerda). Além deste evento, a sucessão de períodos calmos e turbulentos com durações e magnitudes variáveis persiste durante todo o período noturno e seus efeitos foram mais evidentes na evolução da concentração de dióxido de carbono, que sofreu maiores flutuações devido a esses fenômenos de intermitência turbulenta.

Diferentemente da noite de 4 de novembro de 2009, a noite de 21 de julho de 2010 (Figura 3.1, coluna à direita) foi caracterizada por uma intensa mistura turbulenta durante a maior parte do período. A magnitude das flutuações da velocidade vertical ficou em torno de 1,5 m/s e a evolução temporal noturna de todos os escalares permaneceu quase constante, com destaque mais uma vez ao dióxido de carbono. Conforme pode ser visto no painel inferior à direita, o pico na concentração de  $\text{CO}_2$  que se observa no início da noite foi menos evidente do que o ocorrido na noite caracterizada como intermitente. Apenas uma transição de  $0,7 \text{ mmol/m}^3$  ocorreu nas primeiras horas da noite, coincidente com a intensificação das flutuações turbulentas da velocidade vertical. Após essa transição, a concentração de  $\text{CO}_2$

apresentou apenas pequenas flutuações abaixo de  $0,4 \text{ mmol/m}^3$  por todo o final da noite. Em contraste, o pico de  $\text{CO}_2$  às 2200 da noite de 04 de novembro de 2009 (Figura 3.1, painel inferior à esquerda) representou uma variação de concentração próxima a  $2,5 \text{ mmol/m}^3$ . Estes resultados são semelhantes aos que haviam sido destacados por Oliveira et al. (2012).

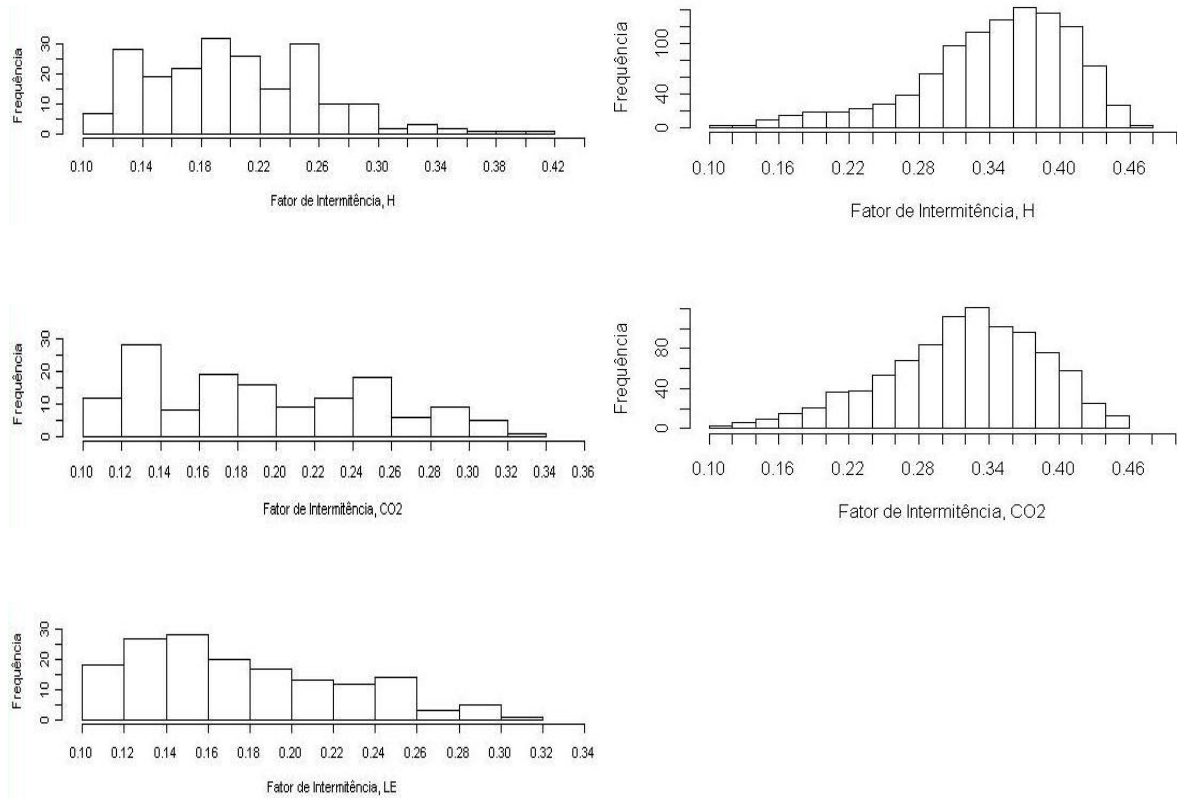


**Figura 3.1** – Evolução temporal da velocidade vertical turbulenta (linha superior), temperatura (segunda linha), concentração de vapor d’água (terceira linha) e concentração de  $\text{CO}_2$  (linha inferior) para as noites de 04 de novembro de 2009 (coluna esquerda) e 21 de julho de 2010 (coluna direita).

Apesar de analisarem o efeito da intermitência na transferência dos fluxos de escalares em São João do Triunfo, Oliveira et al. (2012) não quantificaram tal intermitência. Isso é realizado no presente estudo, para os fluxos de calor sensível, latente e  $\text{CO}_2$  para o sítio de São João do Triunfo e para calor sensível e  $\text{CO}_2$  no sítio de Santarém (Figura 3.2). Os valores de FI mais frequentes para o sítio de São João (coluna à esquerda) foram abaixo de 0,26, para os três fluxos analisados. De maneira mais específica, 85, 87 e 94 % dos valores de FI estão abaixo de 0,26, para os fluxos de calor sensível, dióxido de carbono e calor latente, respectivamente. Ao mesmo tempo, para o sítio de Santarém (coluna à direita) 90% dos



valores de FI estão acima de 0,26 para o fluxo de calor sensível e 84 % para o de dióxido de carbono.



**Figura 3.2** – Distribuição de frequência dos fatores de intermitência (FI) para os fluxos de calor sensível (painéis superiores), CO<sub>2</sub> (centrais) e calor latente (inferior), para os sítios de São João (esquerda) e Santarém (direita).

No sítio de São João, os valores de FI variaram de 0,10 a 0,42 para o fluxo de calor sensível. Esses valores são próximos aos encontrados por Acevedo et al. (2006), que encontraram valores de FI variando de 0,06 a 0,40 para uma área de plantação de arroz irrigada no sul do Brasil. No presente estudo, no sítio de São João, a maior frequência dos FI para o calor sensível ocorreu na classe 0,18 – 0,20. Enquanto que para o fluxo de dióxido de carbono os valores de FI variaram de 0,10 a 0,34, sendo a classe de 0,12 – 0,14 a de maior frequência. Já para o calor latente, os valores de FI variaram de 0,10 a 0,32, onde a classe de maior frequência foi a de 0,14 – 0,16. Essa tendência de baixos valores de FI é comum em condições muito estáveis, indicando que a turbulência intermitente é um evento noturno característico neste sítio.

Um comportamento inverso é observado no sítio de Santarém, onde a maior frequência dos FI incidiu na classe 0,36 – 0,38 e na classe 0,32 – 0,34 para o fluxo de calor sensível e dióxido de carbono, respectivamente. De modo geral os valores de FI variaram de

0,10 a 0,48 para o calor sensível e de 0,10 a 0,46 para o CO<sub>2</sub>. Desse modo, a turbulência noturna neste sítio é caracterizada por turbulência bem desenvolvida ao longo da noite.

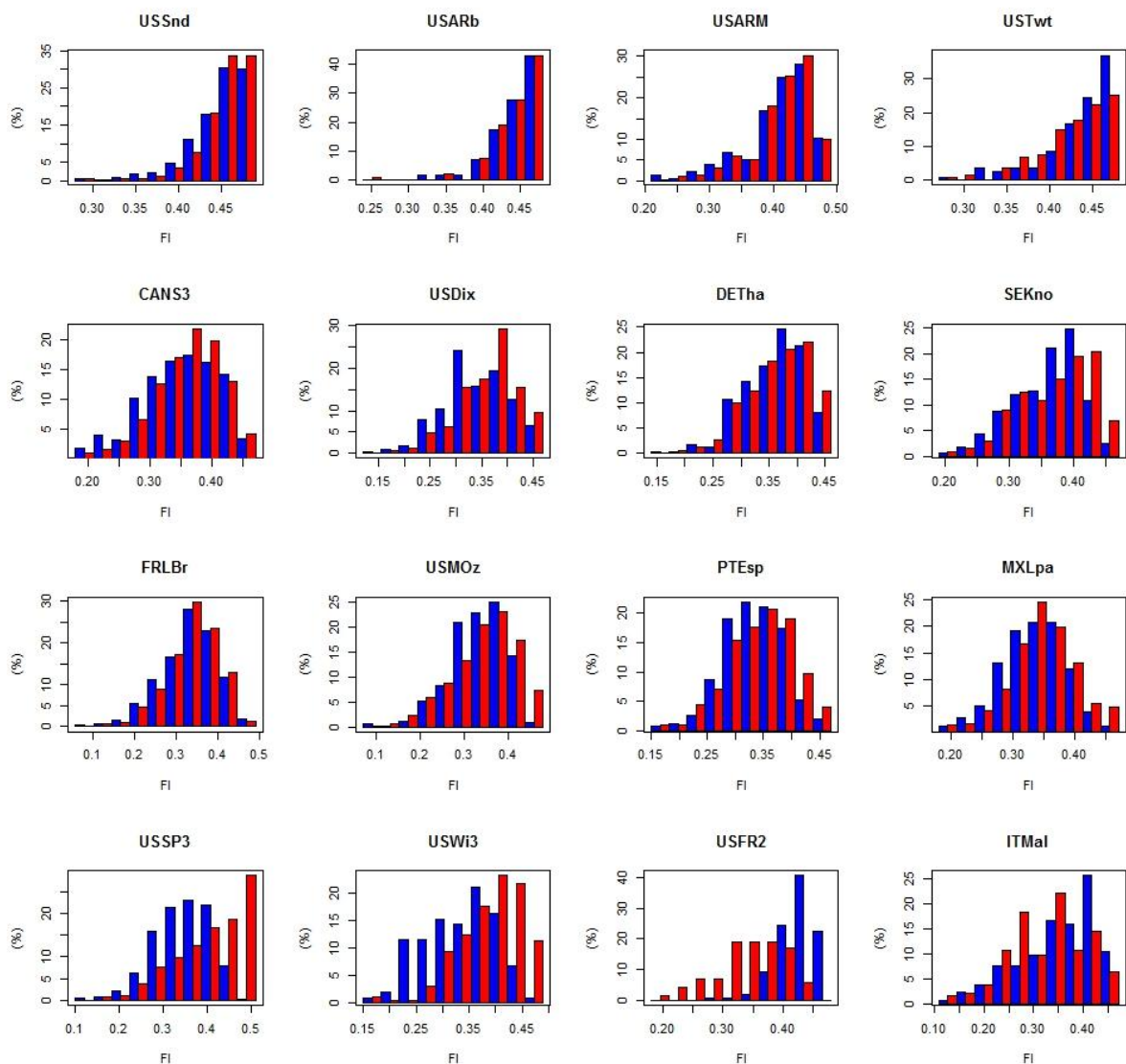
A análise aqui apresentada deixa clara uma diferença significativa entre o total de turbulência intermitente em ambos os sítios. É de se esperar que este processo, portanto, afete muito mais as estimativas de fluxos em São João do Triunfo do que em Santarém. Entretanto, neste estudo de caso, não foram abordadas as causas de tais diferenças. Para tanto, nas próximas seções, a expansão e discussão dessa análise será realizada para uma grande variedade de biomas, a fim de verificar quais os fatores estão associados a esse tipo de mecanismo e, suas possíveis implicações nas estimativas dos fluxos de CO<sub>2</sub> e do NEE noturno.

### **3.2 Redes de fluxos**

A caracterização da turbulência intermitente, para fluxos de CO<sub>2</sub> e de calor sensível, foi realizada para uma grande variedade de ecossistemas (referentes aos sítios descritos na Tabela 1.1), pertencentes à duas redes regionais (AmeriFlux e EuroFlux). O fluxo de calor latente não foi analisado por sofrer uma maior mudança de sinal durante o período noturno, impossibilitando, nestes casos, a aplicação do método. Em alguns casos os fluxos de CO<sub>2</sub> e calor sensível também apresentaram grande quantidade de ocorrências de mudança de sinal, devido principalmente à utilização de períodos de 30 min para sua determinação, conforme explicado na seção 2. Assim, para fins estatísticos, se considerou apenas estações em que um mínimo de 25% dos dados de FI pôde ser aproveitado para um dado fluxo.

Como se poderia esperar em função da grande quantidade e diversidade de localidades analisadas, os FI apresentaram comportamentos bastante distintos, como mostra a Figura 3.3 para um subconjunto de 16 estações. Na maioria dos casos, houve concordância entre os comportamentos obtidos para fluxo de CO<sub>2</sub> e de calor sensível. Alguns casos apresentaram baixa intermitência, com a vasta maioria das noites apresentando FI próximo a 0,5. Entre esses estão as 4 estações da primeira linha na Figura 3.3. Na segunda linha, as classes de maiores frequências para ambos fluxos foram em torno de 0,40, caracterizando uma condição intermediária de intermitência. Na terceira linha, nas quatro estações nota-se uma certa semelhança na distribuição dos FI entre as duas variáveis analisadas, sendo as classes de maiores frequências aquelas entre 0,3 e 0,35. Estas estações estão entre as mais intermitentes.

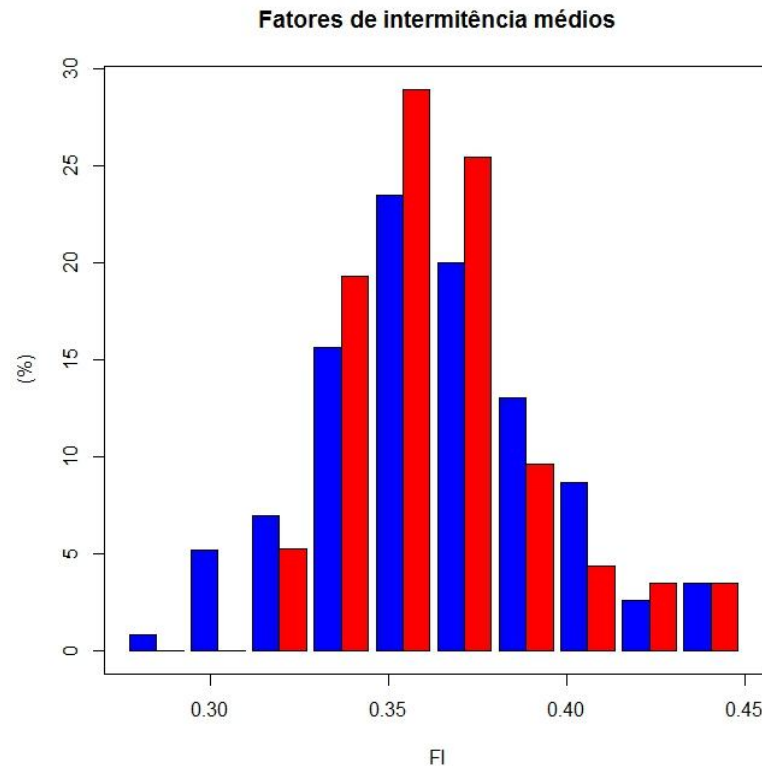
Finalmente, na quarta linha são apresentadas estações em que ocorrem diferenças significantes na distribuição dos FI para fluxo de CO<sub>2</sub> e para o fluxo de calor sensível. Como pode ser visto, na estação USSP3 e USWi3 as classes de maiores frequências para o CO<sub>2</sub> foram aquelas próximas a 0,35, enquanto que para o H foram as próximas a 0,45, indicando que neste caso a intermitência afetou mais o transporte de CO<sub>2</sub> que o de calor sensível. Por outro lado, o oposto se verificou nas estações USFR2 e ITMal.



**Figura 3.3** – Distribuição de frequência dos fatores de intermitência (FI) para os fluxos de CO<sub>2</sub> (barra em azul) e calor sensível (vermelho) para 16 estações da rede FLUXNET.

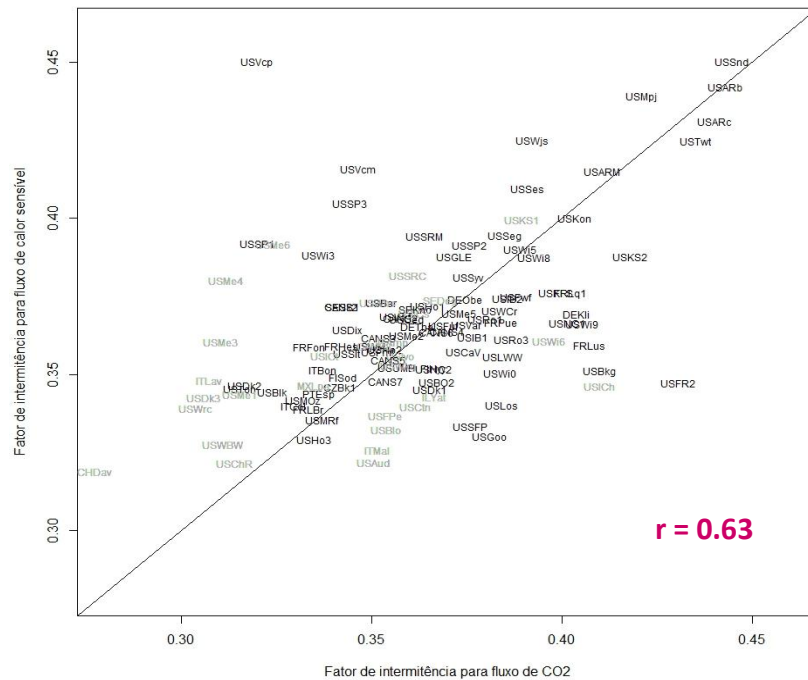
A diversidade de FI observados nas diferentes estações pode ser observada pela distribuição de frequência de seus valores médios (Figura 3.4). Há uma certa concordância entre a quantidade de estações que na média apresentaram condições pouco intermitentes (FI

próximo a 0,5) para ambos escalares. Porém, um número maior de estações exibiram valores reduzidos de FI para fluxo de CO<sub>2</sub> do que para o de calor sensível. Por consequência, o FI para o fluxo de calor sensível apresentou mais estações com valores médios intermediários que o do fluxo de CO<sub>2</sub>.



**Figura 3.4** – Distribuição de frequência dos FI médios para os fluxos de CO<sub>2</sub> (barra em azul) e calor sensível (vermelho) de cada uma das estações. Foram utilizadas nessa análise apenas as estações nas quais pelo menos 25% das noites puderam ser aproveitadas para a determinação de ambos FI (85 estações).

De modo geral, se observa uma certa semelhança entre a distribuição dos FI para os fluxos de CO<sub>2</sub> e H (evidenciada pelas 3 primeiras linhas da Figura 3.3). Este resultado é constatado quando os FI médios de cada estação são comparados entre si para cada um dos fluxos considerados (Figura 3.5). O coeficiente de correlação linear de 0,63 entre essas quantidades indica uma razoável concordância entre os FI para cada um dos fluxos, indicando que a intermitência tem a tendência de afetar os dois fluxos de maneira semelhante. Por outro lado, sendo a concentração de CO<sub>2</sub> e a temperatura, dois escalares que em geral apresentam grande coerência na camada limite planetária (Acevedo et al., 2006), era de se esperar uma concordância ainda maior que a verificada. De fato, a Figura 3.5 mostra um espalhamento apreciável dos dados e, conforme evidenciado na linha inferior da Figura 3.3, há estações nas quais a intermitência afeta os dois fluxos considerados de forma significativamente distinta.

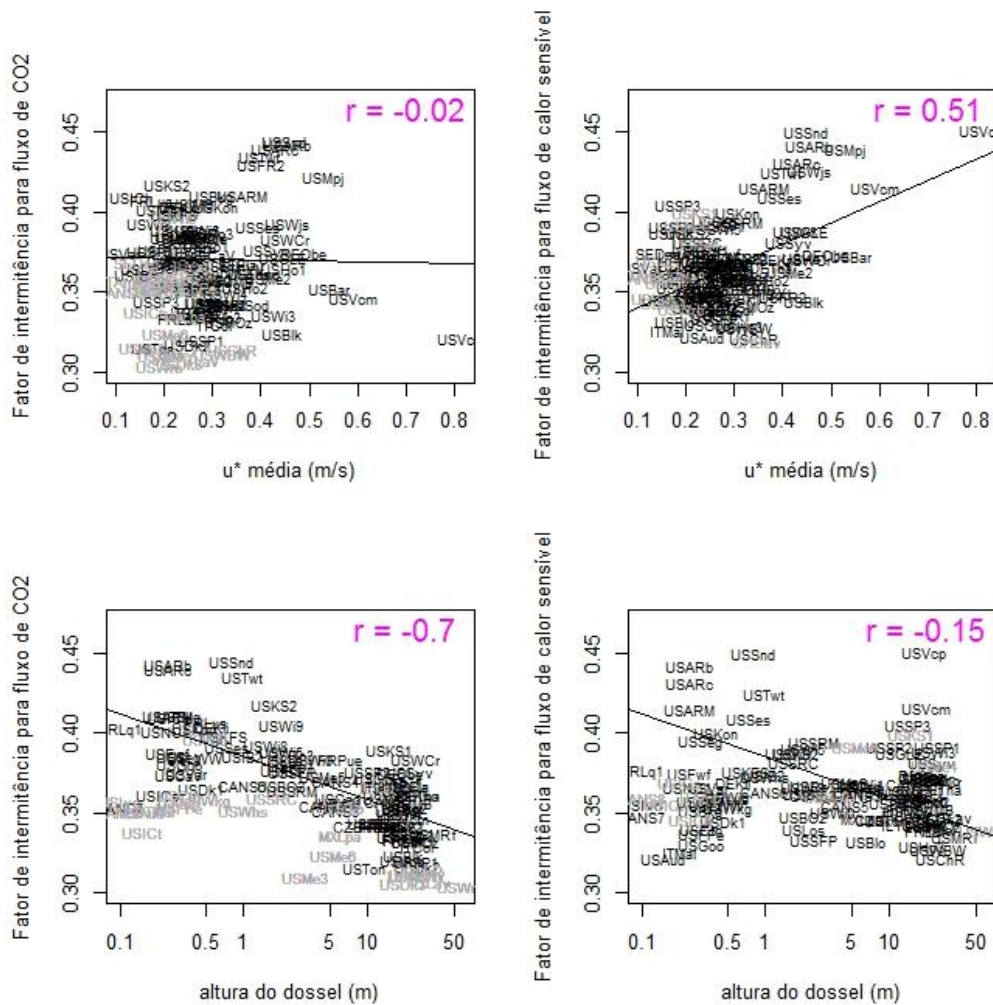


**Figura 3.5** – Relação entre os FI para os fluxos de CO<sub>2</sub> e calor sensível. As estações na cor preta apresentam um aproveitamento de pelo menos 25% dos dados noturnos de fluxo de CO<sub>2</sub> e calor sensível, e as em cinza são aquelas nas quais essa condição não foi satisfeita.

O que motiva esta diferença entre os FI dos dois fluxos? Será possível que existam controles distintos para o quanto a variabilidade da intermitência turbulenta afeta cada um dos fluxos de escalares considerados? Ainda que estas sejam questões de difícil resposta, algumas comparações simples podem elucidar o que determina a variabilidade de cada um dos FI de maneira geral. Nesse intuito, os FI dos fluxos de CO<sub>2</sub> e calor sensível foram comparados com a velocidade de fricção do ar média e com a altura média do dossel de cada estação (Figura 3.6). A escolha da primeira variável de comparação foi motivada pelo fato que se espera que turbulência mais intensa seja menos intermitente, de forma que os FI devem ter correlação positiva com a velocidade de fricção média de cada sítio. Por outro lado, alguns estudos recentes sugerem que a intermitência possa se originar como uma instabilidade de ponto de inflexão no perfil médio de vento ao longo da copa (BOING et al., 2010). Assim, dosséis mais altos e com copa mais densa tenderiam a ser mais intermitentes, fazendo com que FI tivesse correlação negativa com a altura do dossel, e também com o índice de área foliar.

A análise realizada indica que apenas os FI do fluxo de calor sensível apresentam boa correlação positiva com a intensidade turbulenta ( $r = 0,51$ ). Para o fluxo de CO<sub>2</sub>, por outro lado, o FI médio é virtualmente independente da velocidade de fricção média ( $r = -0,02$ ). Este resultado é surpreendente, pois a menor intermitência de séries mais turbulentas é uma

característica física real do escoamento turbulento. Desta forma, isso indica que os FI do fluxo de CO<sub>2</sub> são afetados mais intensamente por outros fatores do que pela própria intermitência da turbulência. Um desses fatores é, certamente, a altura do dossel, que apresentou grande correlação negativa ( $r = -0,70$ ) com os FI do fluxo de CO<sub>2</sub>, mas, entretanto, uma correlação bem menor ( $r = -0,15$ ) com os FI de fluxo de calor sensível. Inicialmente se poderia imaginar que esta dependência fosse causada pela produção de intermitência por instabilidade de ponto de inflexão em locais de vegetação mais alta. Porém, se este mecanismo fosse determinante, deveria afetar os FI dos dois fluxos, ao invés de apenas controlar o FI de fluxo de CO<sub>2</sub>, conforme observado. Semelhantemente, este processo deveria fazer com que os FI dos dois fluxos apresentassem correlação negativa com o índice de área foliar, e esta foi inexistente nos dois casos (figura não mostrada). Assim, é preciso identificar outra justificativa para explicar as diferenças entre os FI de cada um dos fluxos, e este deve ser um processo que afete de maneira diferente os fluxos de CO<sub>2</sub> e de calor sensível.



**Figura 3.6** – Relação entre os fatores de intermitência dos fluxos de CO<sub>2</sub> (painel esquerdo) e calor sensível (painel direito) e a velocidade de fricção do ar média (painel superior) e altura do dossel (painel inferior) para as estações analisadas no presente estudo.

Uma possível explicação está associada às taxas de respiração noturna do solo e do sub-bosque, que representam uma grande parcela do total de emissão noturna de CO<sub>2</sub>, especialmente para ecossistemas de floresta, com maiores alturas do dossel. Assim, esses processos proporcionam um grande acúmulo de CO<sub>2</sub> nos períodos calmos, e este acúmulo é tão maior quanto maior for o dossel e quanto mais a sua estrutura favorecer o desacoplamento entre o seu interior e a atmosfera acima. Por outro lado, o processo equivalente que poderia afetar o fluxo de calor sensível é menos importante, pois as reduzidas intensidades turbulentas no interior do dossel reduzem também significativamente o resfriamento e o consequente acúmulo de ar frio. Assim, o ar que acumula em períodos calmos que precedem eventos intermitentes tende a ser bastante rico em dióxido de carbono, mas não significativamente mais frio que o que existe acima do dossel. Com isso, ao ocorrerem eventos intermitentes sobre dosséis altos, há a tendência de impacto maior nos fluxos de CO<sub>2</sub> que nos fluxos de calor sensível. Este processo é, portanto, evidenciado, pelo fato, mostrado no presente estudo, que a intermitência dos fluxos de CO<sub>2</sub> é significativamente maior sobre estações de floresta do que sobre estações de savana ou agrícolas, enquanto que a mesma diferença é muito mais reduzida para os fluxos de calor sensível.

Os diversos tipos de ecossistemas (referentes aos sítios descritos na Tabela 1.1) foram divididos em dois grupos: *Florestas* (que inclui as classificações: DBF, EBF, ENF e MF) e *Outros* (esse se refere aos demais tipos de ecossistemas analisados no presente estudo). Para cada grupo, foi calculado o valor médio das alturas dos dosséis e dos fatores de intermitência do fluxo de CO<sub>2</sub> e calor sensível (Tabela 3.1). Para o grupo *Florestas* a altura média do dossel foi de 17,58 m ( $\pm 9,05$ , n = 59), enquanto que para o grupo *Outros* foi de 1,17 m ( $\pm 1,63$ , n = 56). O grupo *Florestas* apresentou um valor médio de FI do fluxo de CO<sub>2</sub> de 0,35 e esse foi um pouco menor que do calor sensível (0,36), evidenciando o fato de que os fluxos de CO<sub>2</sub> tendem a ser mais intermitentes do que os fluxos de calor sensível em dosséis com características tipo florestas. Assim, quando se compara os demais tipos de ecossistemas (grupo classificado como *Outros*), os fluxos de CO<sub>2</sub> são menos intermitentes que o de calor sensível, apresentando um valor médio de FI do CO<sub>2</sub> (0,39) superior ao do fluxo de calor sensível (0,37) para os ecossistemas de menores alturas.

**Tabela 3.1** – Tipos de ecossistemas, divididos em dois grupos: *Florestas* (DBF, EBF, ENF e MF) e *Outros* (esse se refere aos demais tipos de ecossistemas analisados no presente estudo). Para cada grupo é mostrado a altura média dos dosséis e, o Fator de intermitência médio (FI) do fluxo de CO<sub>2</sub> e calor sensível. São mostrados também os desvios padrão de cada valor médio apresentado.

Tipo de ecossistema	Altura média dos dosséis (m)	FI médio para o fluxo de	
		CO <sub>2</sub>	calor sensível
<i>Florestas</i>	17,58 ± 9,05	0,35 ± 0,02	0,36 ± 0,02
<i>Outros</i>	1,17 ± 1,63	0,39 ± 0,03	0,37 ± 0,03

Analisando os valores de FI de cada escalar, individualmente, com cada grupo, nota-se uma diferença mais evidente entre os FI do fluxo de CO<sub>2</sub>, o qual apresentou um valor médio de 0,35 no grupo *Florestas* e 0,39 no grupo *Outros*. Essa diferença pode ser explicada através das análises mostradas na Figura 3.6 (painel inferior à esquerda), onde a relação do FI do CO<sub>2</sub> com a altura do dossel apresentou uma boa relação, e essa foi negativa, ou seja, dosséis com maiores alturas tendem a ter um valor menor de FI (mais próximos de zero), e, portanto, são mais intermitentes. Por outro lado, a diferença entre os FI do calor sensível, onde os dosséis de menores alturas (*Outros*) tenderam a ser menos intermitente (0,37) do que os de maiores alturas (0,36), pode estar associada ao fato que, em ecossistemas de menor altura, o contato mais direto do vento com a superfície proporciona uma maior taxa de resfriamento na camada de ar próxima ao solo, favorecendo uma maior concentração de ar frio que está sendo misturado verticalmente, enquanto que, para ecossistemas com dosséis de alturas mais elevadas (*Florestas*), esse maior resfriamento é menos evidente. Essa relação do  $u^*$  médio com o FI do H foi mostrada e analisada através da Figura 3.6 (painel superior à esquerda), na qual, uma boa correlação positiva foi evidenciada ( $r = 0,51$ ).



## 4 FLUXOS E HISTÓRIA DA TURBULÊNCIA NOTURNA

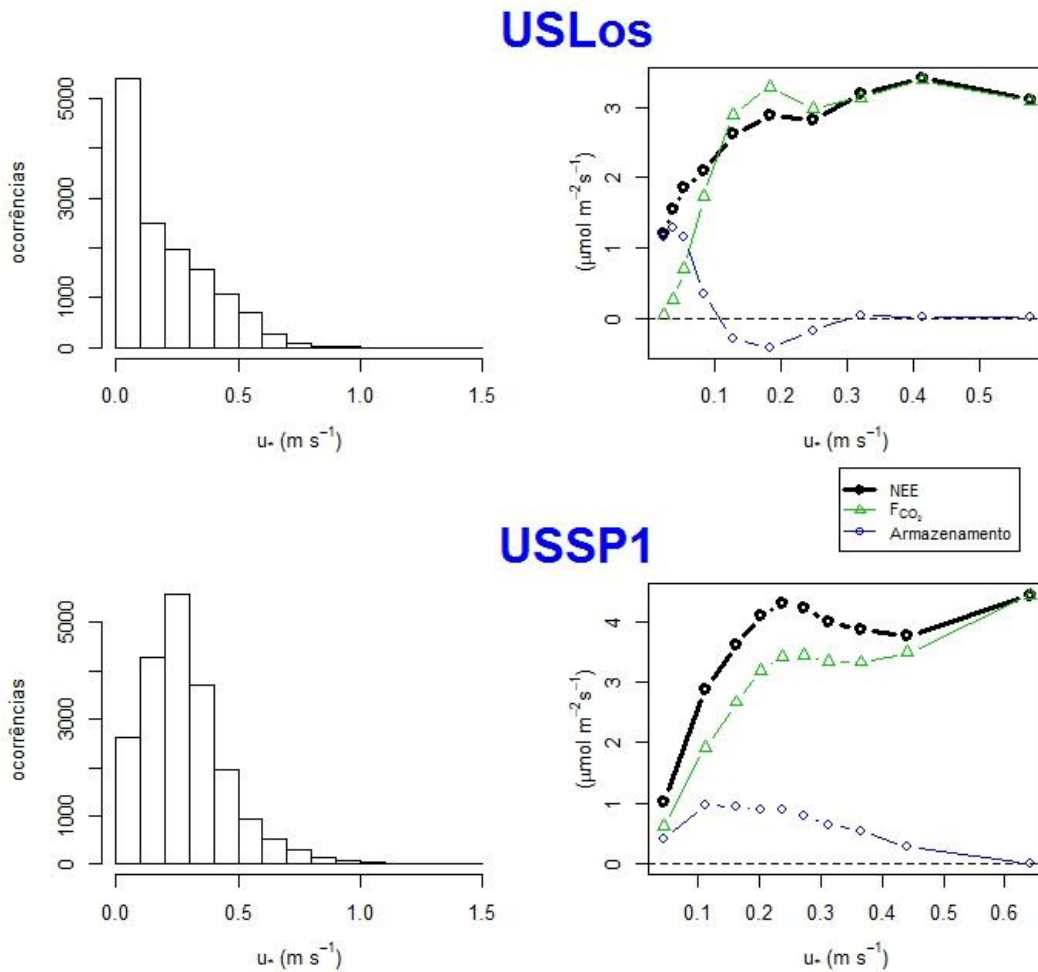
Uma investigação da dependência dos fluxos de CO<sub>2</sub> na história da turbulência foi realizada (Figura 4.1). Para isto, foi empregada uma metodologia baseada na que foi utilizada por Oliveira et al. (2012), na qual as trocas de escalares entre o dossel e o ar acima são classificadas como função da intensidade da turbulência não somente no mesmo horário, mas também com períodos anteriores. Entretanto aqui, a intensidade da turbulência foi dada pela velocidade de fricção  $u_*$ , que é a variável associada à intensidade da turbulência disponibilizada pelas redes de fluxo, enquanto no estudo do referido autor, foi utilizado o desvio padrão das flutuações de velocidade vertical ( $\sigma_w$ ). O propósito principal da presente análise é identificar se há acúmulo de CO<sub>2</sub> em períodos pouco turbulentos e se este CO<sub>2</sub> acumulado afeta os fluxos em períodos subsequentes. Tal acúmulo, em situações ideais, deveria ser quantificado no termo de armazenamento, de forma que se este for propriamente amostrado, o NEE (dada pela soma do fluxo turbulento com o armazenamento) não deveria ser afetado por este processo (PAPALE et al., 2006). Por este motivo, a análise apresentada no presente capítulo precisa incorporar informações de armazenamento de CO<sub>2</sub> no dossel. Entretanto, nem todas as estações das redes de fluxo reportam esta variável e, assim, apenas um subconjunto das estações analisadas no capítulo anterior que disponibilizam a informação de armazenamento será considerado. Este subconjunto consiste de 48 estações, sendo 25 da rede AmeriFlux e 23 da rede Euroflux.

### 4.1 Estudo de caso

Para introduzir a análise utilizada, detalhando aspectos importante, na presente seção são apresentados dois estudos de caso. Duas estações selecionadas são da rede AmeriFlux. A primeira é a estação Lost Creek (USLos), escolhida por ser uma estação que apresenta um papel importante dos termos de armazenamento. A segunda, Austin Cary (USSP1) foi escolhida por ter se mostrado uma estação na qual a intermitência afeta de maneira

significativa os fluxos de CO<sub>2</sub>.

A estação USLos, apresentou característica de baixa turbulência, com poucos eventos de turbulência intensa. Conforme a Figura 4.1 (painel superior, à esquerda), as classes de maiores frequências da velocidade de fricção do ar ( $u_*$ ) foram as próximas de 0,1 m/s, indicando que nesta estação a característica da turbulência noturna é de padrão pouco turbulento. Quando analisada a variação do fluxo de CO<sub>2</sub> em termos de  $u_*$  (Figura 4.1, painel superior à direita), se verifica uma relação positiva entre essas variáveis. Assim, os valores do fluxo de CO<sub>2</sub> aumentam à medida que a escala de velocidade segue aumentando, atingindo um certo nivelamento após  $u_* > 0,20$  m/s. Massman e Lee (2002) verificaram que esse tipo de comportamento foi notado para um grande número de sítios, nos quais, dependendo do tipo de ecossistema estudado os valores dos limiares encontrados a partir dos quais o fluxo turbulento de CO<sub>2</sub> passa a ser independente de  $u_*$  variaram de 0,15 a 0,6. Os autores salientam que esse comportamento está associado à fonte biológica de CO<sub>2</sub> (respiração), que deve ser independente da intensidade da turbulência. Assim, em condições de vento fraco, a redução na estimativa dos fluxos é normalmente associada à reduzida mistura e, conseqüente acumulação de CO<sub>2</sub> abaixo do nível sensor. Neste caso, porém, na situação idealizada, a diminuição do fluxo de CO<sub>2</sub> nos períodos mais calmos deveria ser totalmente compensada por um aumento de armazenamento, de forma que a soma dos dois termos levasse a uma NEE independente de  $u_*$ . No caso da estação USLos, o termo de armazenamento tem um papel particularmente importante, sendo significativo nos casos de menos intensidade turbulenta, decrescendo rapidamente com o aumento de  $u_*$ , e se tornando negativo para valores intermediários de  $u_*$ , indicando casos em que o CO<sub>2</sub> acumulado está sendo retirado da camada entre a superfície e o nível do sensor de fluxo. Entretanto, mesmo nesta estação em que o armazenamento é bastante bem representado, sua inclusão não é capaz de tornar NEE totalmente independente de  $u_*$ . Ao contrário, NEE também apresenta uma forte redução conforme diminui a intensidade turbulenta, em concordância com o que é tipicamente observado em uma grande quantidade de estudos (GOULDEN et al., 1996, MASSMAN, LEE, 2002; HOLLINGER et al., 2004; GU et al., 2005, entre outros), e que motivou a correção dos dados nos casos de pouca turbulência, por se acreditar que o decréscimo de NEE em situações calmas fosse evidência de perda de CO<sub>2</sub> por processos como a advecção horizontal.

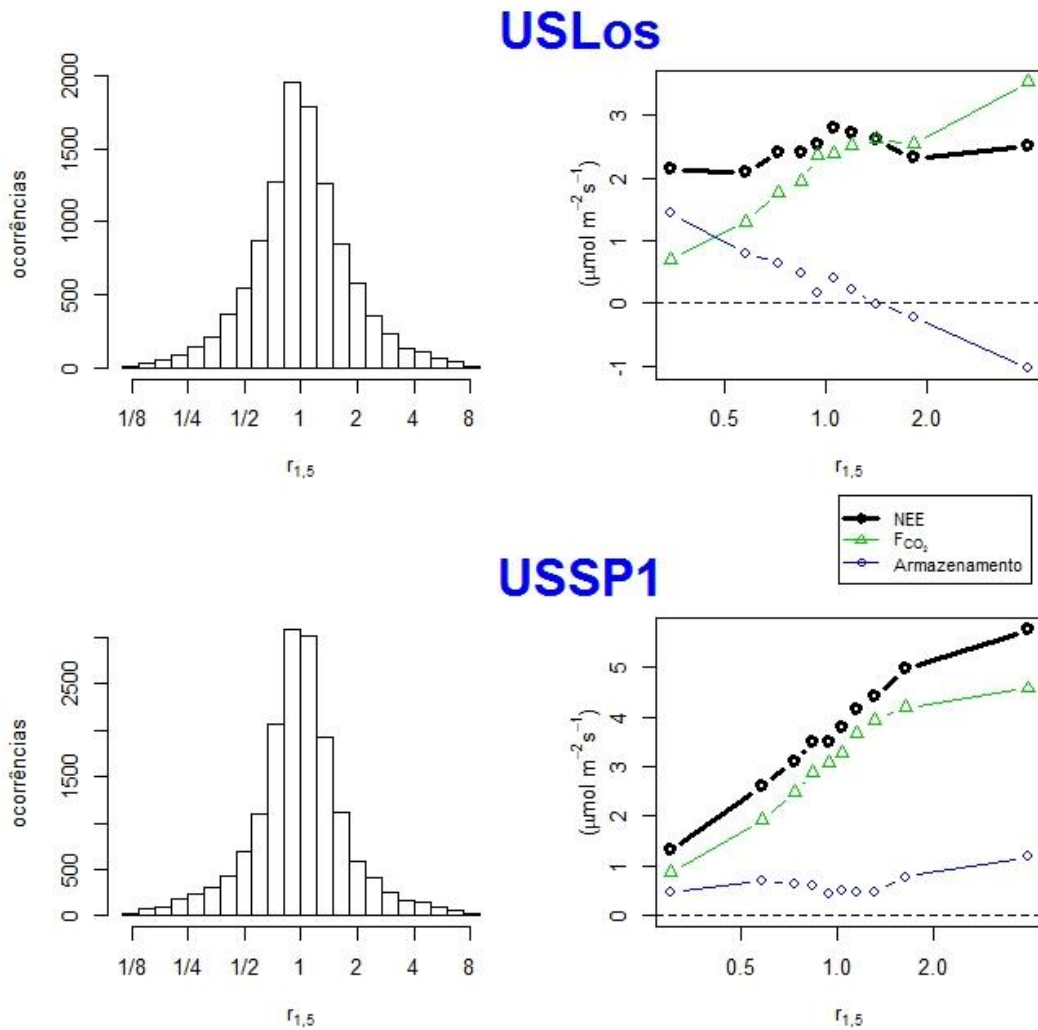


**Figura 4.1** – Nos painéis à esquerda é dada a distribuição de frequências da velocidade de fricção do ar ( $u_*$ ). Painéis à direita mostram o comportamento do NEE, fluxo de  $\text{CO}_2$  e armazenamento, como função da intensidade da turbulência dada pela velocidade de fricção ( $u_*$ ). Sendo os painéis superiores referentes à estação USLos, e os inferiores à USSP1.

Por sua vez, a estação USSP1 apresentou classes de maiores frequências de  $u_*$  em torno de 0.2 m/s (Figura 4.1, painel inferior à esquerda), indicando um padrão intermediário na intensidade da turbulência noturna, e que possivelmente períodos calmos interrompidos por curtos períodos de intensa mistura foram comuns nessa estação. A relação entre NEE e o fluxo de  $\text{CO}_2$  com a velocidade de fricção para esta estação (Figura 4.1, painel inferior à direita) confirma uma acentuada dependência dessas variáveis com a intensidade turbulenta. Como ocorrido na estação USLos, para condições de pouca turbulência, quanto maior a velocidade de fricção do ar, maior foram o NEE e o fluxo de  $\text{CO}_2$  observados. Em USSP1, este comportamento pode ser notado até  $u_*$  próximo a 0,25 m/s e, a partir desse limiar os fluxos tenderam a um certo nivelamento. O resultado encontrado aqui foi próximo ao encontrado por Aguiar (2006) em um estudo dos fluxos de massa e energia em uma floresta

tropical no sudoeste da Amazônia, no qual o comportamento da relação entre a velocidade de fricção do ar e o NEE durante o período noturno foi observado até uma velocidade de fricção de 0,30 m/s. A Figura 4.1 (painel inferior à direita) evidencia também que o maior acúmulo de CO<sub>2</sub> dentro do dossel (armazenamento) ocorreu quando a intensidade da turbulência foi baixa ( $u_* < 0,2$  m/s), porém o armazenamento mostra menor dependência com a intensidade turbulenta do que foi observado em USLos e, como consequência, a dependência de NEE em termos de  $u_*$  não é significativamente diferente da dependência do fluxo de CO<sub>2</sub> ( $F_{CO_2}$ ) em termos da mesma variável.

O propósito principal da presente análise é identificar se há acúmulo de CO<sub>2</sub> em períodos pouco turbulentos e se este CO<sub>2</sub> acumulado afeta os fluxos em períodos subsequentes. Oliveira et al. (2012) mostraram que a variabilidade temporal da intensidade da turbulência ao longo da noite afeta principalmente os fluxos de CO<sub>2</sub>, mas também os de calor sensível e calor latente. Esta evolução temporal da velocidade de fricção ao longo das noites, caracterizada pela sucessão de períodos calmos e períodos turbulentos caracteriza o que no presente trabalho é referido como “história da turbulência noturna”. O índice que Oliveira et al. (2012) utilizaram para quantificar a história da turbulência noturna é  $r_{1,5}$ , que se refere à razão entre  $u_*$  e o valor desta mesma variável 1,5 horas antes. Assim, valores grandes de  $r_{1,5}$  indicam que a turbulência se intensificou na última 1,5 hora, enquanto que valores pequenos indicam enfraquecimento da turbulência. Obviamente, turbulência contínua, com pouca variação de intensidade correspondem a valores de  $r_{1,5}$  próximos a 1. Oliveira et al. (2012) escolheram o atraso de 1,5 horas para a análise depois de considerar diversos atrasos e concluir que este produzia uma dependência mais efetiva dos fluxos na história da turbulência noturna. Esta escala de tempo de atraso, porém, é provavelmente dependente da localidade sendo analisada e, desta forma, apenas iniciaremos a análise considerando a mesma 1,5 hora utilizada por Oliveira et al. (2012). A dependência dos resultados em termos da escala de tempo de atraso considerada será analisada um pouco a seguir nesta mesma seção.



**Figura 4.2** – Comportamento da distribuição de frequências do  $u_*$  (painéis à esquerda) e da dependência do NEE, fluxo de  $\text{CO}_2$  e do armazenamento (painéis à direita) na história da turbulência, utilizando para tanto, a razão  $r_{1.5} = u_*/(u_* \text{ de } 1,5 \text{ hora antes})$ . Análises para a estação USLos (painéis superiores) e USSP1 (painéis inferiores).

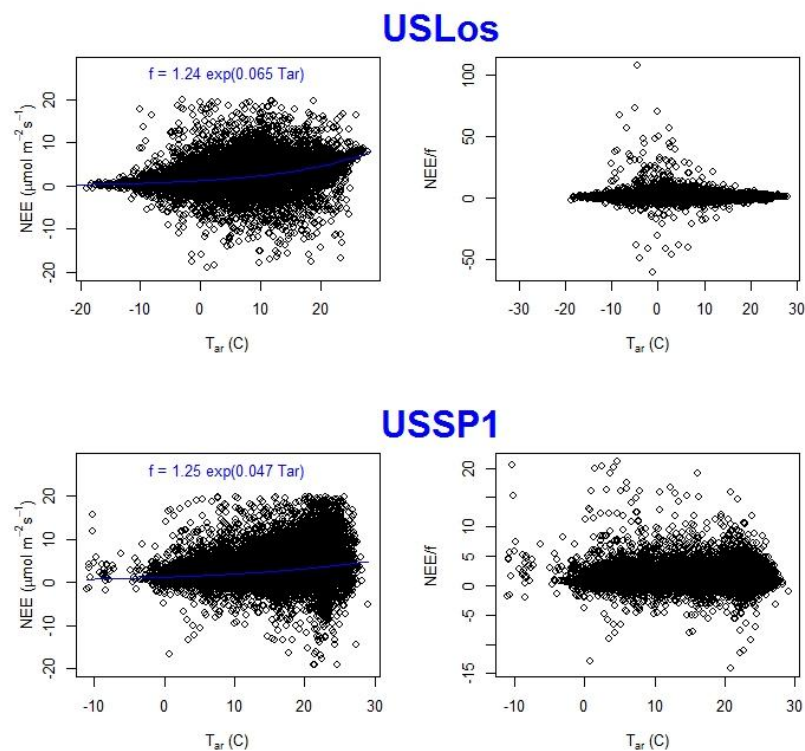
Tanto na estação USLos quanto na estação USSP1,  $r_{1.5}$  apresenta uma distribuição lognormal (Figura 4.2, painéis à esquerda, onde deve ser notado que o eixo horizontal apresenta uma escala logarítmica). Esta distribuição lognormal é, de fato, observada em todas as estações e indica meramente que períodos em que a intensidade da turbulência é  $n$  vezes maior que aquela observada 1,5 horas antes ocorrem com a mesma frequência que aqueles em que a turbulência é  $n$  vezes menor que 1,5 horas antes. Note-se, por exemplo, que na Figura 4.2, em ambas estações, a frequência de ocorrência de  $r_{1.5} = 1/4$  é semelhante à de  $r_{1.5} = 4$ , assim como  $r_{1.5} = 1/2$  ocorre com frequência semelhante a  $r_{1.5} = 2$ , e assim por diante. Este fato não é surpreendente, e deve ser verificado em qualquer local no qual não haja tendência temporal de aumento ou diminuição de  $u_*$  ao longo da noite.

As duas estações apresentam comportamentos distintos no que se refere à dependência dos fluxos em relação à história da turbulência noturna, em particular no que diz respeito à importância do termo de armazenamento. Em USLos (Figura 4.2, painel superior à direita), o fluxo turbulento de  $\text{CO}_2$  apresenta um crescimento aproximadamente linear com  $\log(r_{1.5})$ , com exceção de um pequeno máximo relativo em torno de  $r_{1.5} = 1$ , que caracteriza a condição de turbulência contínua. A linearidade de  $F_{\text{CO}_2}$  em termos de  $\log(r_{1.5})$  indica que os fluxos em períodos calmos que sucedem turbulentos estão sendo compensados nos correspondentes períodos turbulentos que sucedem os calmos. A hipótese mais razoável para explicar este comportamento é que há acúmulo de excesso de  $\text{CO}_2$  respirado em períodos calmos, e que este  $\text{CO}_2$  acaba sendo transferido nos períodos turbulentos subsequentes. Esta hipótese, se verdadeira, deve ser acompanhada por correspondente máximo de armazenamento quando  $r_{1.5}$  é pequeno, com um mínimo quando  $r_{1.5}$  é grande, possivelmente com uma variação também linear para compensar o comportamento observado de  $F_{\text{CO}_2}$ . De fato, este é o comportamento observado do termo de armazenamento em USLos. Há um grande acúmulo local de  $\text{CO}_2$  nos períodos calmos que sucedem turbulentos, chegando mesmo a haver diminuição local nos períodos em que a turbulência sofre grande aumento temporal em períodos de 1,5 h. A variação do armazenamento é, como especulado, linear, e quando se considera a soma do fluxo turbulento de  $\text{CO}_2$  com o armazenamento, se conclui que o NEE é muito pouco dependente de  $r_{1.5}$ . É interessante ainda destacar que quando o armazenamento é classificado em termos de  $r_{1.5}$ , os valores positivos e negativos ficam bem separados entre si, ao contrário do que ocorre quando se classifica o armazenamento em termos de  $u_*$  (Figura 4.2), quando o armazenamento negativo é dominante apenas em valores intermediários de intensidade turbulenta. Este resultado, de fato, explica aquele intervalo de armazenamento médio negativo pelo fato que aqueles valores de  $u_*$  são típicos de situações que sucedem períodos calmos e que, portanto, nesse caso, há frequente liberação de excesso de  $\text{CO}_2$  acumulado anteriormente.

Por sua vez, em USSP1 (Figura 4.2, painel inferior à direita), o fluxo turbulento de  $\text{CO}_2$  também é aproximadamente linear com  $r_{1.5}$ , exceto por uma redução observada nos casos de maior  $r_{1.5}$ . A notável diferença em relação a USLos ocorre no termo de armazenamento, que quase não depende de  $r_{1.5}$ , fazendo com que NEE preserve a dependência aproximadamente linear em relação a  $\log(r_{1.5})$ .

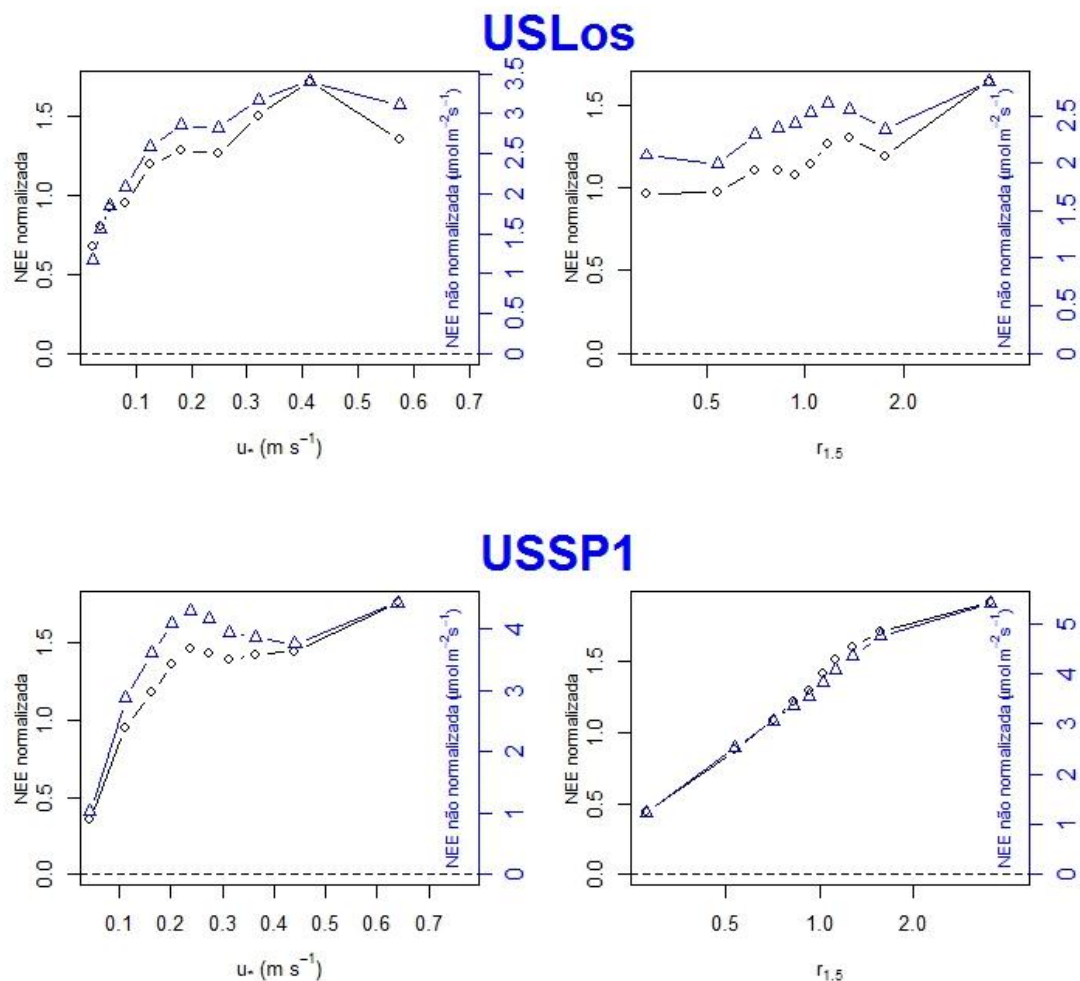
A partir deste ponto, a análise considerará apenas os valores de NEE, que já terão incorporados em si os processos conjuntos de transporte turbulento de  $\text{CO}_2$  e de armazenamento local.

Como, no presente trabalho, serão analisados dados de diversas estações, cada uma dispo de vários anos de observações, naturalmente cada série representará uma grande diversidade de condições meteorológicas. Em particular, NEE, que é a principal variável sendo analisada, apresenta grande dependência da temperatura do ar, principalmente porque as taxas de respiração aumentam exponencialmente com a temperatura. Assim, toda a análise daqui para frente deve ser feita garantindo que os resultados não sejam artifícios introduzidos pela dependência natural de NEE com a temperatura. Este receio é motivado pelo fato que é possível que intensidade da turbulência ou mesmo a sua intermitência apresentem dependência da temperatura através de alterações que esta variável origina na estabilidade atmosférica. Assim, é preciso certificar que os padrões observados não são causados pela comparação de variáveis distintas (no caso, NEE e intermitência) que respondem de maneira semelhante a um forçante externo (temperatura do ar). A maneira correta de corrigir este efeito é normalizar os dados de NEE pela função exponencial da temperatura do ar encontrada através de um ajuste de mínimos quadrados (AUBINET, 2012).



**Figura 4.3** – Painéis à esquerda mostram NEE em função da temperatura do ar, e ajuste de uma função exponencial aos pontos (linha azul). Nos painéis à direita aparece a dependência da NEE normalizada pela função de ajuste à temperatura do ar. Análises para a estação USLos (painéis superiores) e USSP1 (painéis inferiores).

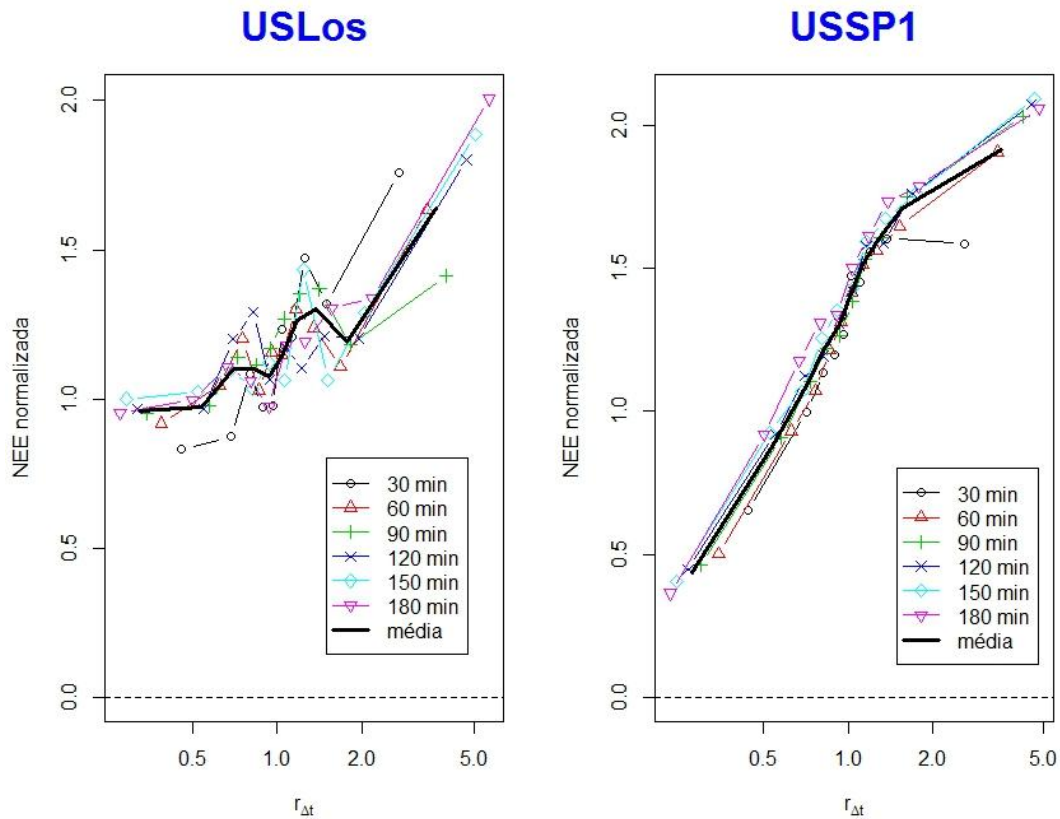
Para exemplificar este processo, os valores noturnos de NEE são mostrados em função da temperatura do ar para as estações USLos e USSP1. Observa-se que nos dois casos, apesar de haver um grande espalhamento dos dados, o comportamento exponencial é verificado. Os ajustes são, nos dois casos, dados pelas linhas azuis e pelas respectivas funções matemáticas apresentadas nos painéis. A normalização consiste em dividir NEE pela função obtida da temperatura do ar. A versão normalizada de NEE, conforme esperado, não apresenta dependência da temperatura (Figura 4.3, painéis à direita). Na Figura 4.4 se pode verificar que a normalização não introduziu mudanças significantes nas dependências de NEE em termos de  $u_*$  ou de  $r_{1.5}$ . Ainda assim, como é possível que este fator seja importante em alguma outra estação, daqui para frente neste trabalho sempre serão considerados os valores de NEE normalizados pela função exponencial de temperatura.



**Figura 4.4** – Painéis à esquerda mostram a diferença entre a dependência de NEE normalizada (linha preta, eixo da esquerda) e sem normalização (linha azul, eixo da direita) em termos de  $u_*$ , enquanto que nos painéis à direita a mesma comparação é feita em termos de  $r_{1.5}$ . Análises para a estação USLos (painéis superiores) e USSP1 (painéis inferiores).



Uma última questão precisa ser abordada entre os estudos de caso, antes de se proceder para a análise dos resultados do conjunto de estações. Esta diz respeito à escala de tempo de atraso utilizada na caracterização da história da turbulência. Até aqui, foi utilizada uma escala única de 1,5 horas em todas as análises, porque este foi o valor obtido por Oliveira et al. (2012) para o sítio de São João do Triunfo, descrito na seção 2. Porém, não há nenhum motivo para crer que este valor seja o mais apropriado em todas as 48 estações que serão consideradas no presente capítulo. Para identificar o papel desta escala de atraso na análise da história da turbulência, comparou-se NEE com as razões entre  $u_*$  obtidas com tempos de atraso entre 30 min e 3 h para as estações USLos e USSP1 (Figura 4.5). Se observa que, nos dois casos há um padrão geral que se repete independentemente dos tempos de atraso considerados. Para USLos, há maior variabilidade entre os diferentes tempos de atraso, enquanto que para USSP1 a diferença entre os resultados é praticamente imperceptível. Em nosso entendimento, isto pode ser explicado pela diferença do padrão de intermitência em cada estação. Assim, em USLos, a maior dependência de NEE em termos de  $r$  é obtida quando o tempo de atraso é de 30 min, pois neste caso a curva NEE x  $r$  apresenta maior inclinação. Isso pode indicar que nesta estação na maioria das vezes não há períodos muito longos sem turbulência, que favorecessem acúmulos por muito tempo antes do fluxo de CO<sub>2</sub> ser capturado pelo sensor. Assim, quando atrasos maiores de meia hora são considerados, o CO<sub>2</sub> acumulado já teria, em muitos casos, sido transportado para fora do dossel. Na estação USSP1, por sua vez, onde não há dependência de NEE na escala de atraso utilizado, também não deve ocorrer uma escala de tempo preferencial para a sucessão de eventos intermitentes. Assim, qualquer escala utilizada captura resultados semelhantes, pois em cada caso, seriam considerados um número semelhantes de casos em que o acúmulo teve aquela escala de duração.



**Figura 4.5** – Dependência de NEE normalizada em função da razão entre  $u_*$  e o valor desta variável observado com um tempo de atraso, para diversos valores deste tempo de atraso, conforme mostrado na legenda. A linha mais espessa mostra a média para todos os tempos de atraso considerados. O painel da esquerda é para a estação USLos e o da direita para USSP1.

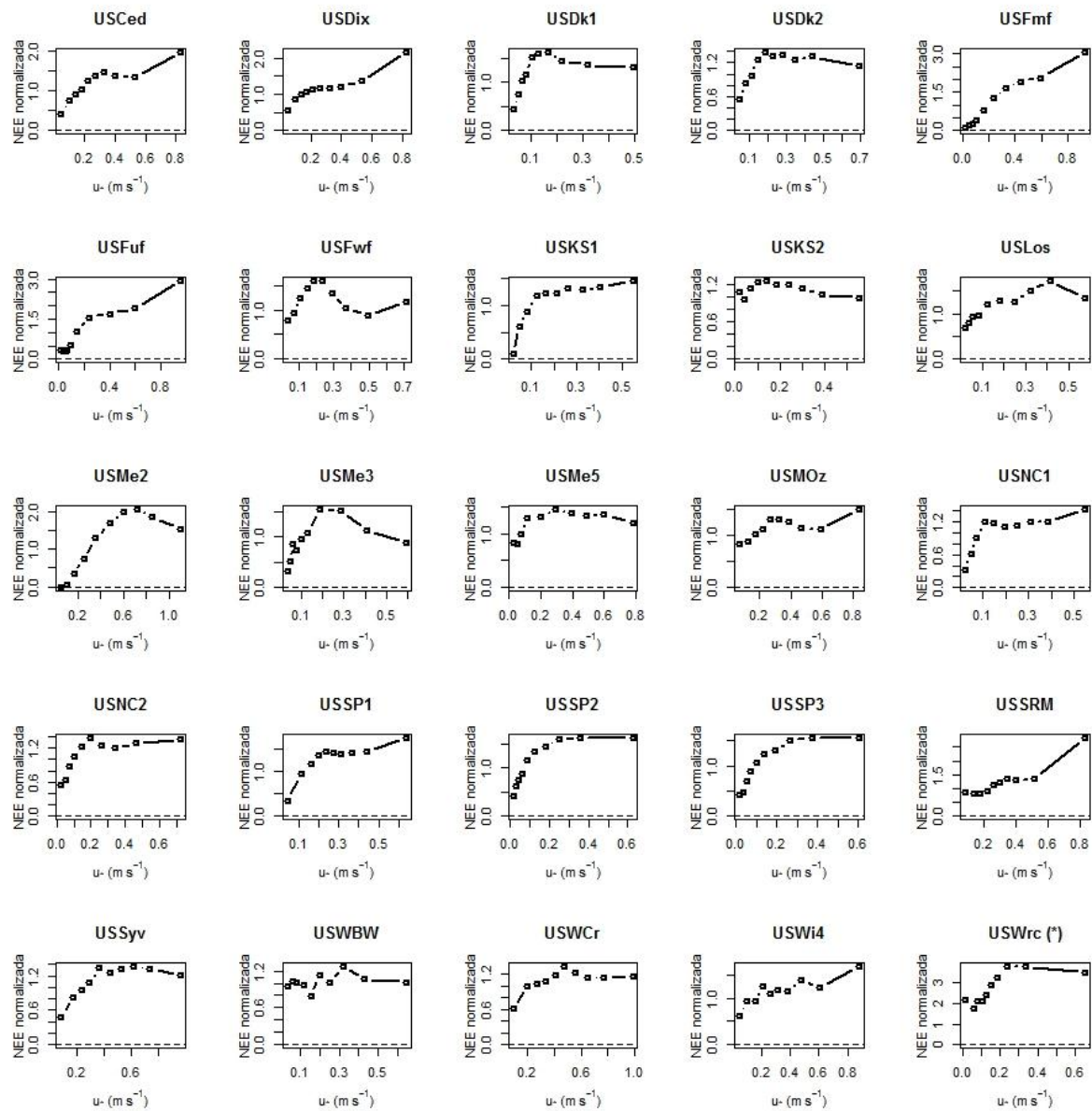
Assim, para que o efeito da escala de tempo utilizada para determinar a escala de história da turbulência seja minimizado, de agora em diante sempre que se apresentar resultados em função da história da turbulência noturna serão considerados os resultados médios para todas as escalas de meia em meia hora desde 30 min até 180 min. Para as estações USLos e USSP1, estas médias são mostradas na Figura 4.5 como uma linha preta mais larga. A razão média obtida desta forma será, então, representada como  $r_m$ .

## 4.2 Redes de fluxos

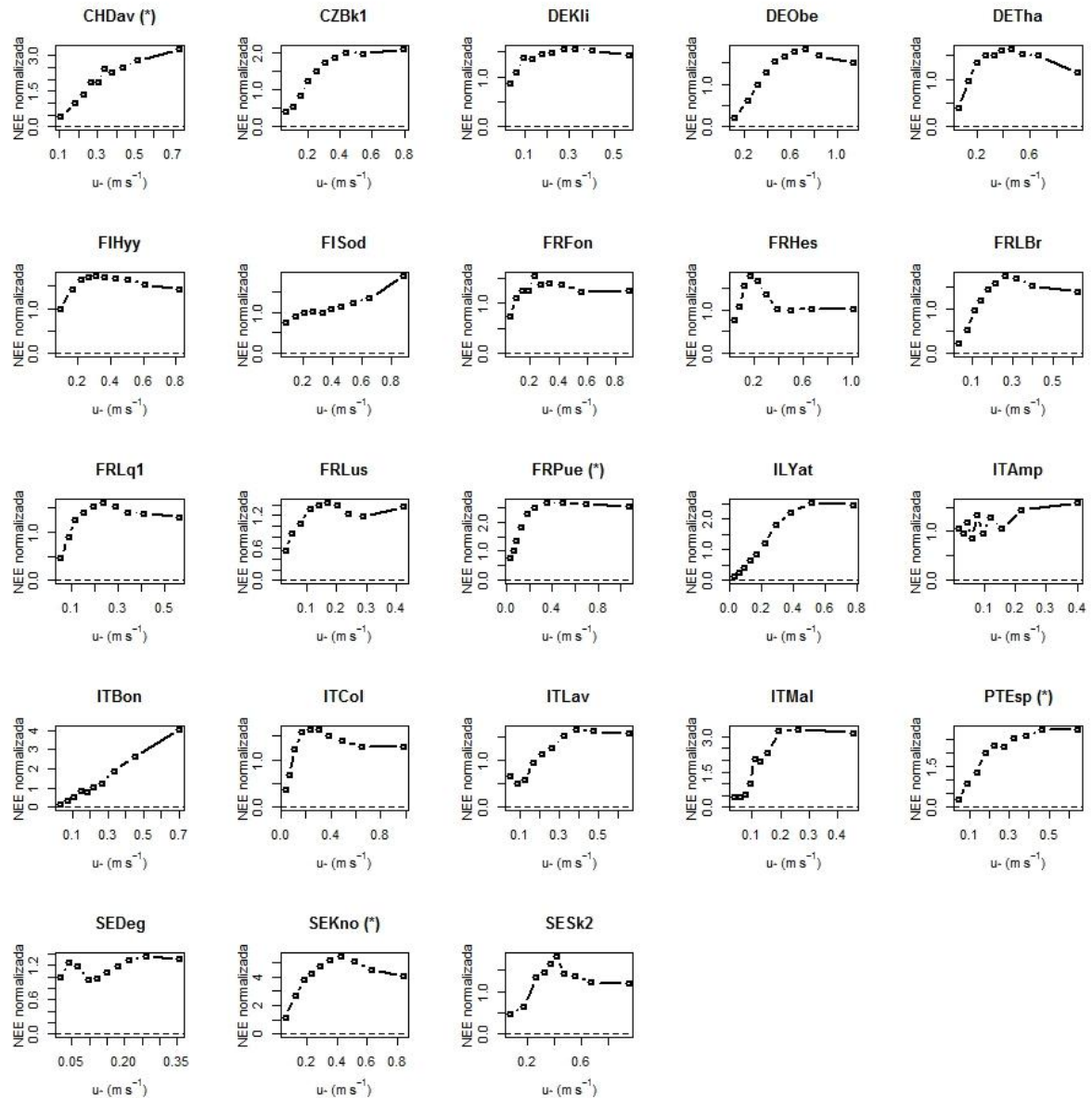
As análises descritas na seção anterior para as estações USLos e USSP1 foram também feitas para todas estações da AmeriFlux e da EuroFlux utilizadas no presente estudo para as quais estavam disponíveis informações de armazenamento de  $\text{CO}_2$ .

Na imensa maioria das estações, se observou a dependência clássica de NEE com a

intensidade da turbulência, com NEE diminuindo conforme  $u^*$  tende a zero. Em vários casos, a redução de NEE em situações calmas é mais significativa. Isto é observado nas estações USCed, USDk1, USDk2, USFmf, USFuf, USKS1, USMe2, USMe3, USNC1, USSP1, USSP2 e USSP3 da rede AmeriFlux (Figura 4.6) e nas estações CHDav, CZBk1, DEObe, DETha, FRLBr, FRLq1, FRLus, FRPue, ILYat, ITBon, ITCol, ITMal, PTEsp e SEKno da rede EuroFlux (Figura 4.7), onde o valor de NEE normalizado na classe de condições menos turbulentas consideradas se aproximou muito de zero, ou mesmo chegou a zero. Além disso, em outras estações, também se verificou a redução de NEE normalizada nas situações de pouca turbulência, porém sem que seu valor se aproximasse de zero. Este foi o caso das estações USDix, USFwf, USLos, USMe5, USMOz, USNC2, USSRM, USSyv, USWCr, USWi4 e USWrc da rede AmeriFlux (Figura 4.6) e das estações DEKli, FIHy, FISod, FRFon, FRHes, ITLav e SESk2 da rede EuroFlux (Figura 4.7). Apenas em uma quantidade bastante pequena de estações se pode dizer que não se verifica a redução de NEE para situações muito calmas, e estas são as estações USKS2 e USWBW da AmeriFlux e ITAmp e SEDeg da EuroFlux. Este é um fato bastante relevante, pois a redução de NEE conforme a turbulência diminui que motiva a substituição de dados noturnos de fluxo de  $\text{CO}_2$  em condições calmas. Assim, esta linha de raciocínio indicaria haver uma perda de fluxo em situações calmas na vasta maioria das estações (44 das 48 para as quais dados de armazenamento estavam disponíveis). De fato, a observação consistente da redução de NEE conforme a intensidade turbulenta diminui é o motivo pelo qual a correção dos dados em noites calmas é sistematicamente efetuada em todas as estações de medida de fluxos, fazendo parte do protocolo básico de processamento de dados das estações. Cabe, aqui questionar, se de fato, tal processo ocorre sistematicamente em todos os sítios, ou se pode ser um artifício da metodologia de análise. Uma evidência neste sentido poderia ser proporcionada pelas medidas já existentes de transportes advectivos. Se, de fato, houvesse uma perda sistemática de fluxos em todos os locais de observação, esta deveria aparecer, de maneira também sistemática, nas observações de advecção horizontal. Neste caso, experimentos que determinam esta componente deveriam sempre identificar que sua inclusão representa uma melhora no fechamento do balanço local de  $\text{CO}_2$ , e isso ocorre apenas em alguns dos casos (AUBINET et al., 2010).



**Figura 4.6** – Comportamento de NEE normalizada em relação à intensidade da turbulência ( $u^*$ ). As análises foram realizadas para 25 estações da rede AmeriFlux, nas quais as informações do armazenamento de  $\text{CO}_2$  estavam disponíveis.



**Figura 4.7** – Comportamento de NEE normalizada em relação à intensidade da turbulência ( $u^*$ ). As análises foram realizadas para 23 estações da rede EuroFlux, nas quais as informações do armazenamento de  $\text{CO}_2$  estavam disponíveis.

É hipótese do presente trabalho que o decréscimo de NEE em situações calmas não necessariamente indica fluxo não contabilizado pelo método da covariância dos vórtices, mas que pode não ter sido propriamente capturado pelo termo de armazenamento, sendo posteriormente capturado pelo sensor em situações turbulentas subsequentes. Neste caso, a análise de fluxo em termos da razão entre  $u^*$  e o valor observado em intervalos anteriores serve como um eficiente indicativo se existe este tipo de compensação. No caso das duas estações estudadas em detalhes na seção 4.1, USLos e USSP1, a Figura 4.2 mostrou que NEE varia linearmente com o logaritmo de  $r_m$ , sugerindo que a diminuição de fluxo quando  $u^*$  é  $n$

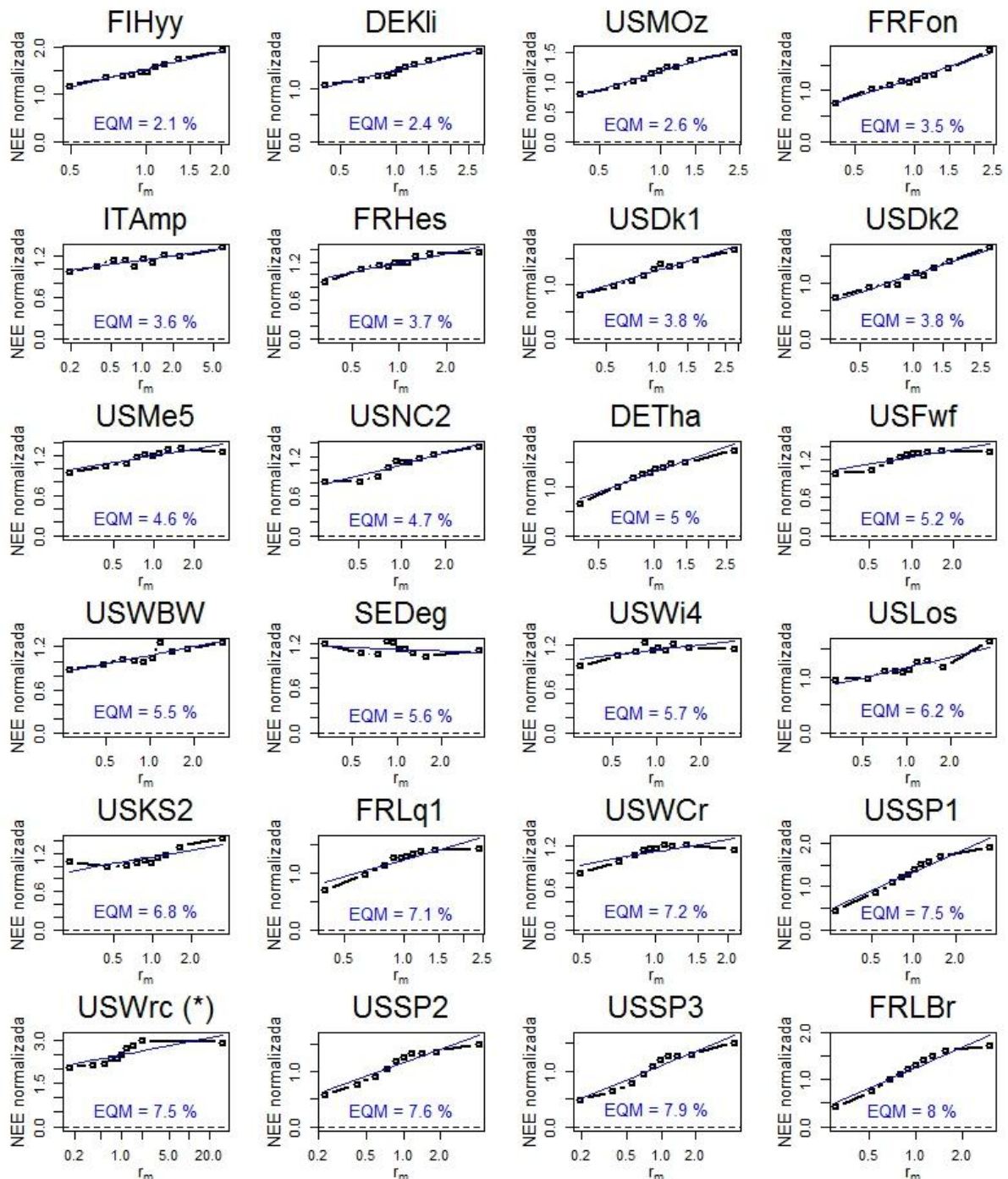
vezes menor que em períodos anteriores é compensada quando  $u^*$  é  $n$  vezes maior que antes. Agora, esta metodologia será aplicada para todas as 48 estações da rede nas quais os dados de armazenamento estavam disponíveis. Uma questão fundamental na análise será, portanto, se há uma relação linear entre NEE normalizada e  $\log(r_m)$ . Para quantificar esta linearidade, em cada caso, um ajuste linear de mínimos quadrados foi empregado, e as estações foram classificadas pelo erro quadrático médio percentual entre o ajuste e os dados originais. Este valor, representado por  $EQM$ , é definido como:

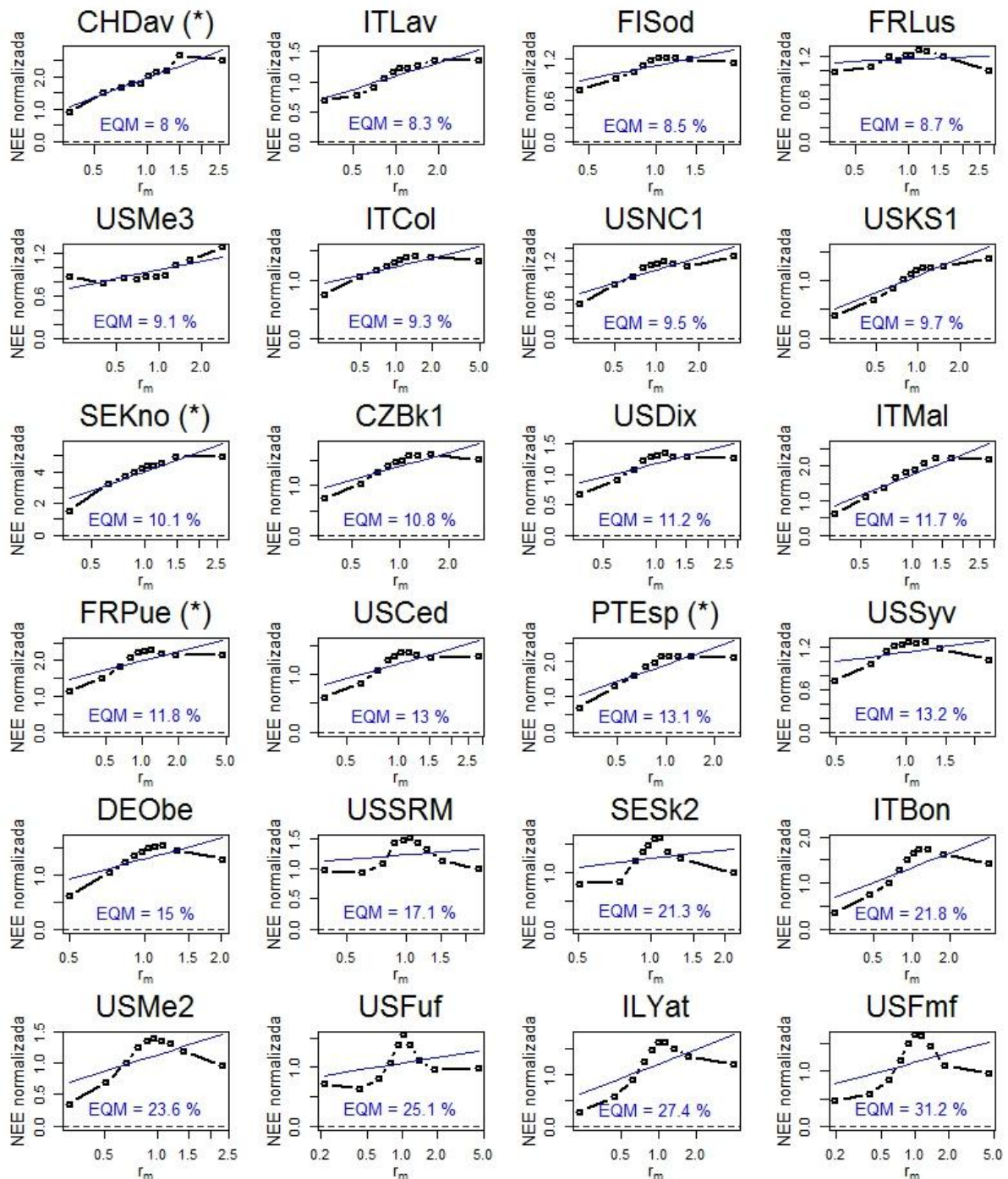
$$EQM = \frac{\sqrt{(NEE_{aj} - NEE_{obs})^2}}{NEE_{obs}} \quad (4.1)$$

onde  $NEE_{aj}$  se refere aos valores ajustados para dez classes de dados classificados por  $r_m$  e  $NEE_{obs}$  são os valores observados classificados da mesma forma. Na Figura 4.8, os resultados desta análise para todas as estações são apresentados, por ordem de  $EQM$ .

De modo geral, para a maioria das estações, foram observados baixos valores de erro quadrático médio de NEE ( $EQM < 10\%$ ) em relação à reta de ajuste linear (linha azul), evidenciando o bom ajuste da dependência do NEE normalizado em função da história da turbulência analisada com a razão  $r_m$ . Em uma série de estações, notadamente aquelas nas 4 primeiras linhas da Figura 4.8, o ajuste de uma reta é, de fato, bastante satisfatório, e de acordo com a hipótese básica do presente trabalho, a deficiência de fluxo em períodos calmos que precedem turbulentos pode estar sendo compensada nos correspondentes períodos turbulentos que sucedem os calmos. É interessante notar que aumentos de  $EQM$ , associados à perda de uma dependência linear de NEE em termos de  $\log(r_m)$ , se dão consistentemente através de uma diminuição dos valores de NEE normalizada nos valores máximos de  $r_m$ . Em outras palavras, a falta de linearidade na relação NEE x  $\log(r_m)$  é inicialmente expressa nos casos de  $u^*$  substancialmente maior que em períodos anteriores. As estações que apresentam esta característica, de diminuição relativa da NEE normalizada apenas nos casos de grande  $r_m$ , em particular na classe de mais alto  $r_m$  são FRHes, USMe5, USFwf, USWi4, FRLq1, USWCr, USSP1, USWrc, USSP2, USSP3, FRLBr, CHDav, ITLav, FISod, FRLus, ITCol, USNC1, USKS1, SEKno, CZBk1, USDix, ITMal, FRPue, USCed, PTEsp, USSyv, DEObe, ITBon e USMe2. Num caso mais extremo, as estações nas quais o ajuste linear é pior, apresentam um pico localizado em torno de  $r_m \approx 1$ . Este caso se refere a USSRM, SESk2,

USFuf, ILYat e USFmf. Apenas duas estações não seguem a esse padrão, tendo seu desvio da linearidade originado por um aumento de NEE nos casos de pequeno  $r_m$ , ao invés da mais comum diminuição de NEE para grande  $r_m$ . Estas estações são USKS2 e USMe3.





**Figura 4.8** – Dependência de NEE normalizada em função da história da turbulência, utilizando a razão  $r_m$  (razão média dos atrasos temporais, conforme definido na seção anterior). A linha azul representa a reta de ajuste linear e, EQM é o erro quadrático médio. Análises para o subconjunto de estações nas quais os dados de armazenamento estavam disponíveis (48 estações, pertencentes às redes AmeriFlux e EuroFlux).

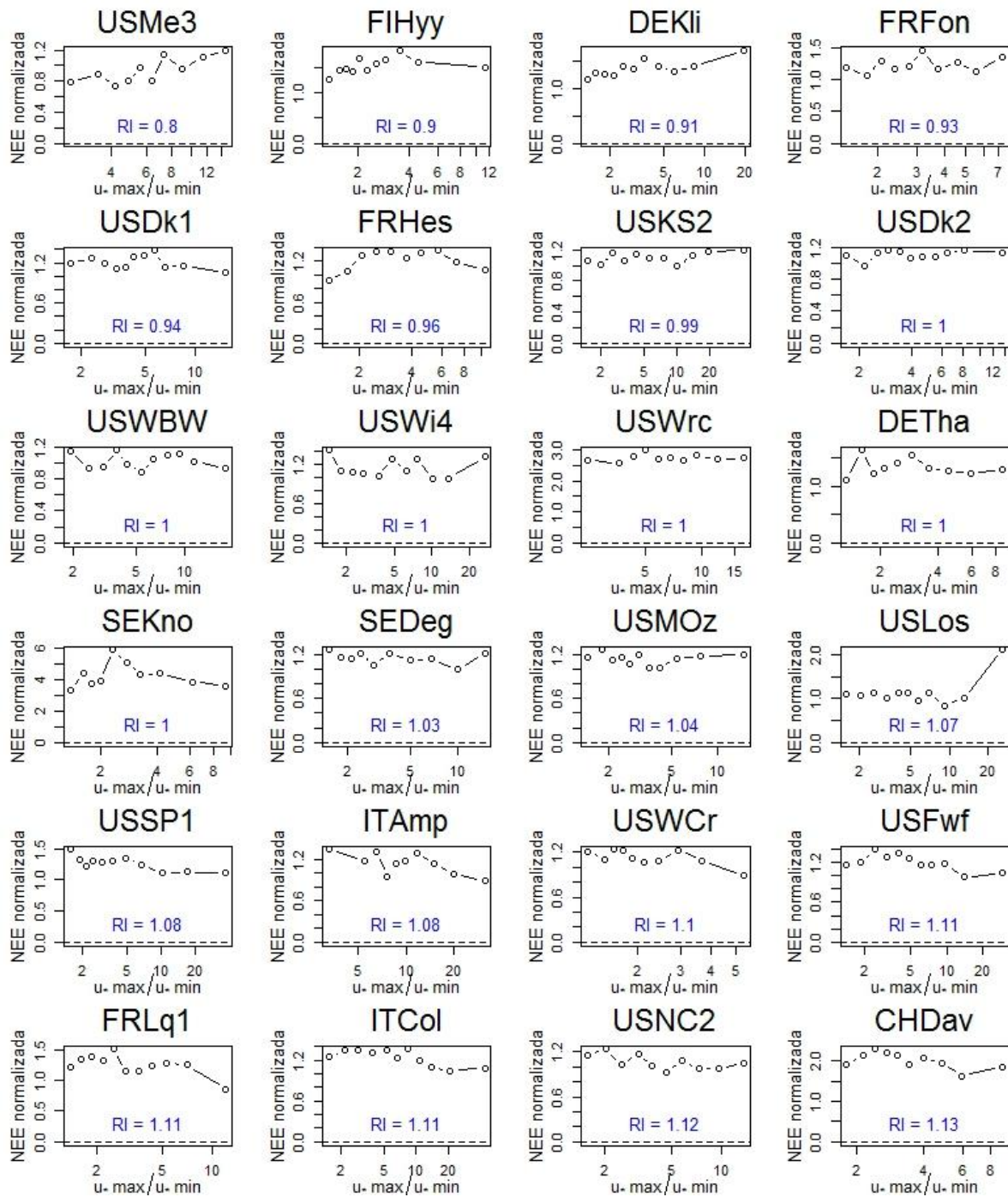
Esses padrões observados são consistentes com a idéia de que  $r_m$  é um bom indicador da perda local de fluxo de  $\text{CO}_2$ . Assim, nas estações em que há um bom ajuste, e a curva  $\text{NEE} \times \log(r_m)$  é aproximadamente reta, o fluxo que não ocorre nos períodos calmos que sucedem turbulentos é compensado nos períodos turbulentos que sucedem calmos. Porém, à medida



que EQM diminui, os valores maiores de NEE ficam abaixo dos que ocorreriam se a relação linear se mantivesse, significando que, neste caso, os fluxos nos casos turbulentos que sucedem calmos não são suficientes para compensar os baixos fluxos durante intervalos calmos. Isso pode ser ocasionado por processos como advecção horizontal, que genuinamente transportam para fora do volume de controle quantidades de CO<sub>2</sub> que não serão medidas pelo sensor de fluxo. É significativo que os desvios da linearidade nas curvas NEE x  $\log(r_m)$  sejam na vasta maioria dos casos representativos de perda de fluxo nos casos mais turbulentos. No nosso entendimento, isso é uma forte evidência que nesses casos há perda real de CO<sub>2</sub> que deve ser compensada por algum tipo de correção.

Até aqui, a análise comparou apenas os fluxos em períodos específicos, considerando como a intensidade da turbulência evolui até aquele período. Uma outra análise possível, diz respeito a noites inteiras. Há diferença entre os fluxos totais em noite de turbulência contínua daqueles observados em noites de turbulência intermitente? A resposta natural é que não deve haver, pois a fonte biológica não depende da intensidade da turbulência, e tampouco pode depender de sua variabilidade ao longo de uma noite. Assim, o NEE normalizado é comparado com a variabilidade de  $u_*$  ao longo de uma noite, dada pela razão entre o máximo e o mínimo valor de  $u_*$  registrados naquela noite ( $u_{* \text{ máx}}/u_{* \text{ mín}}$ ). Em locais em que NEE não depende da intermitência, o NEE médio deverá ser independente desta razão, e para quantificar esta relação, define-se uma razão de intermitência ( $RI$ ), dada pela razão entre NEE normalizado nas 50% das noites menos intermitentes por aquele verificado nos 50% das noites mais intermitentes. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10, onde as estações estão classificadas por  $RI$ .

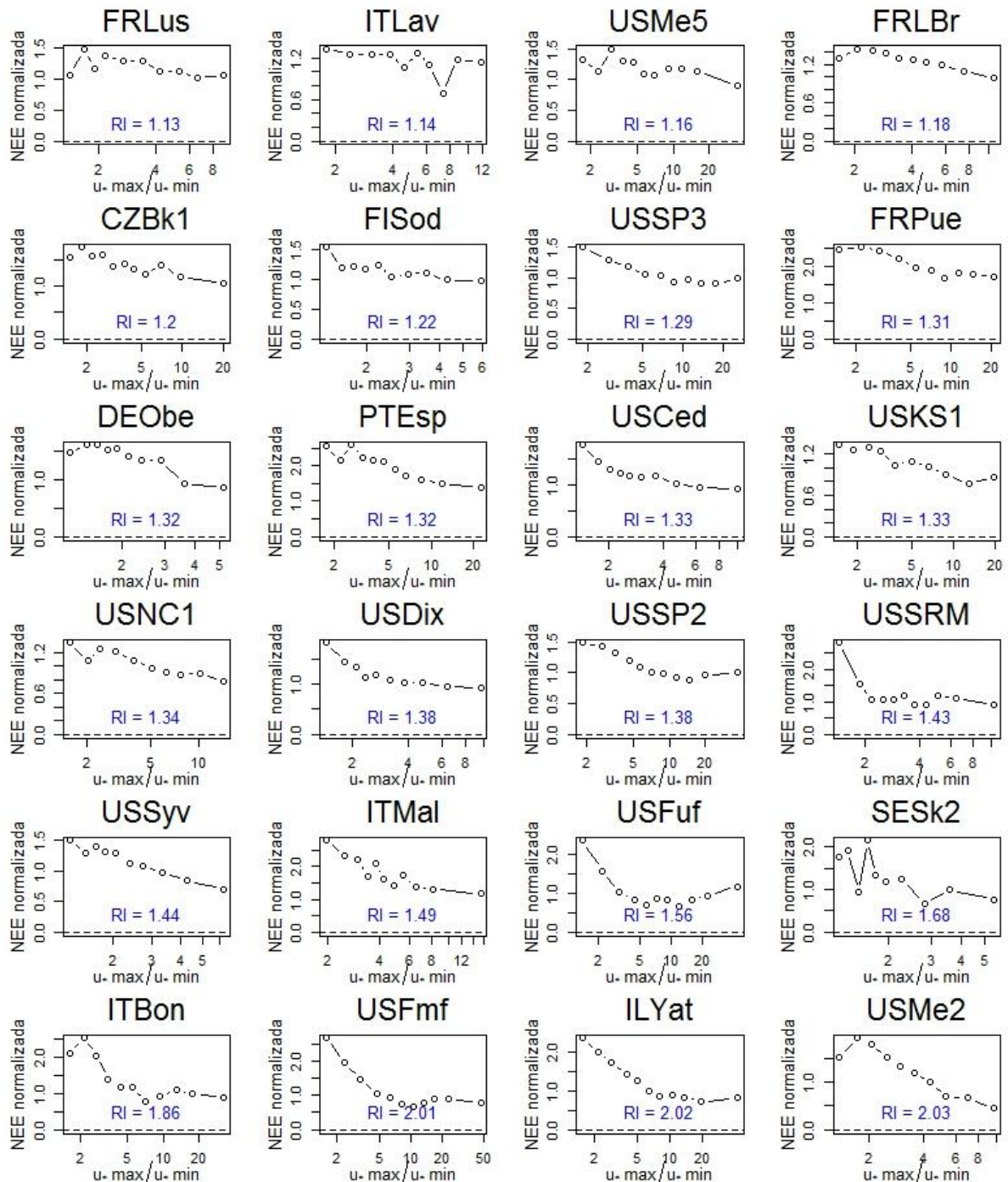
São poucas as estações que apresentaram  $RI$  menor que 1, e destas apenas USMe3 apresentou valor menor que 0,9. Isto mostra que raramente o NEE é maior em noites intermitentes que em noites de turbulência contínua, e que quando isto ocorre, a diferença é pequena. Uma quantidade significativa de estações (18, no total, desde FIHy até USWCr na Figura 4.9) apresentou  $RI$  entre 0,9 e 1,1, caso em que se pode dizer que NEE depende pouco da intermitência, pois o seu valor médio no 50% de noites mais intermitentes não diferiu em mais que 10% daquele observado nas 50% das noites menos intermitentes. Uma quantidade ainda maior apresentou valores de  $RI$  maiores que 1,1, sendo que alguns deles foram substancialmente maiores. Em casos extremos, como as estações USFmf, ILYat e USMe2 (Figura 4.10),  $RI$  excedeu o valor 2, caracterizando que, nestes casos, o NEE das noites mais intermitentes foi menos que a metade daquele verificado nas noites menos intermitentes.



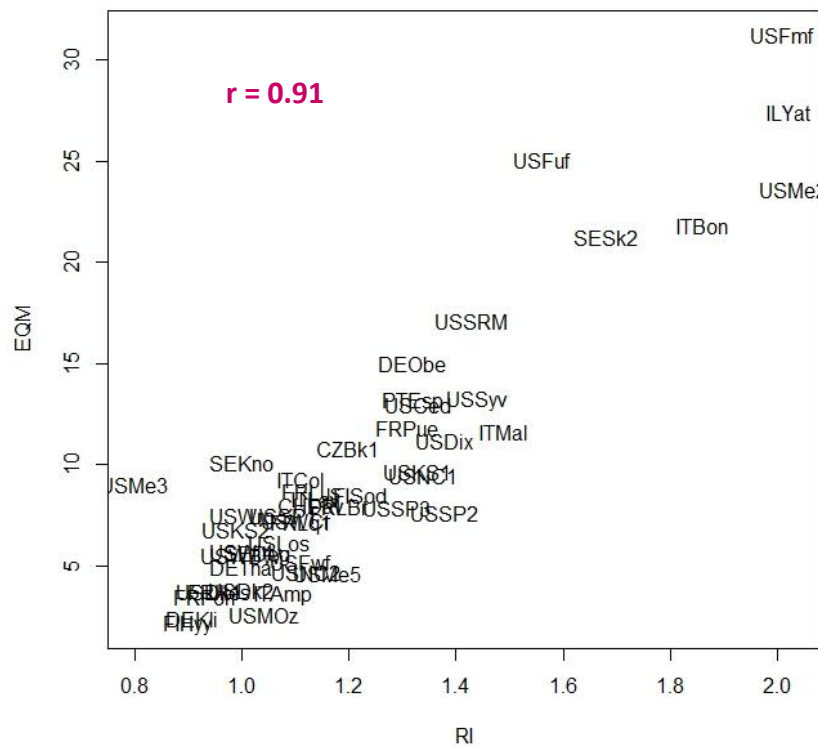
**Figura 4.9** – Dependência de NEE normalizada em função de  $u_{\max}^*/u_{\min}^*$ . São apresentadas as 24 estações que apresentaram menores valores de *RI* (ver definição no texto).

Assim, a distribuição de valores observados de *RI* indica que quando NEE tem dependência na variabilidade da turbulência, na vasta maioria dos casos esta dependência ocorre na forma de redução de NEE em condições intermitentes. Este é um resultado fundamental do presente trabalho e está em acordo com a hipótese básica de que o  $\text{CO}_2$  perdido pelos balanços locais de Carbono, que não é capturado pelos sistemas de covariância de vórtices, está associado a ar estagnado, que acumula localmente em períodos calmos, e que

escoa durante estes intervalos antes de ser transferido por um evento turbulento intermitente. Isso explica a grande diminuição de NEE observada em várias estações para grandes valores de  $u^*_{\text{máx}}/u^*_{\text{mín}}$ . Por outro lado, quando a turbulência é contínua, a mesma perda não ocorre porque as parcelas de  $\text{CO}_2$  respiradas são quase imediatamente transferidas e captadas pelo sistema, sem que tenham tempo para acumular e escoar lateralmente.



**Figura 4.10** – Dependência de NEE normalizada em função de  $u^*_{\text{máx}}/u^*_{\text{mín}}$ . São apresentadas as 24 estações que apresentaram maiores valores de *RI* (ver definição no texto).



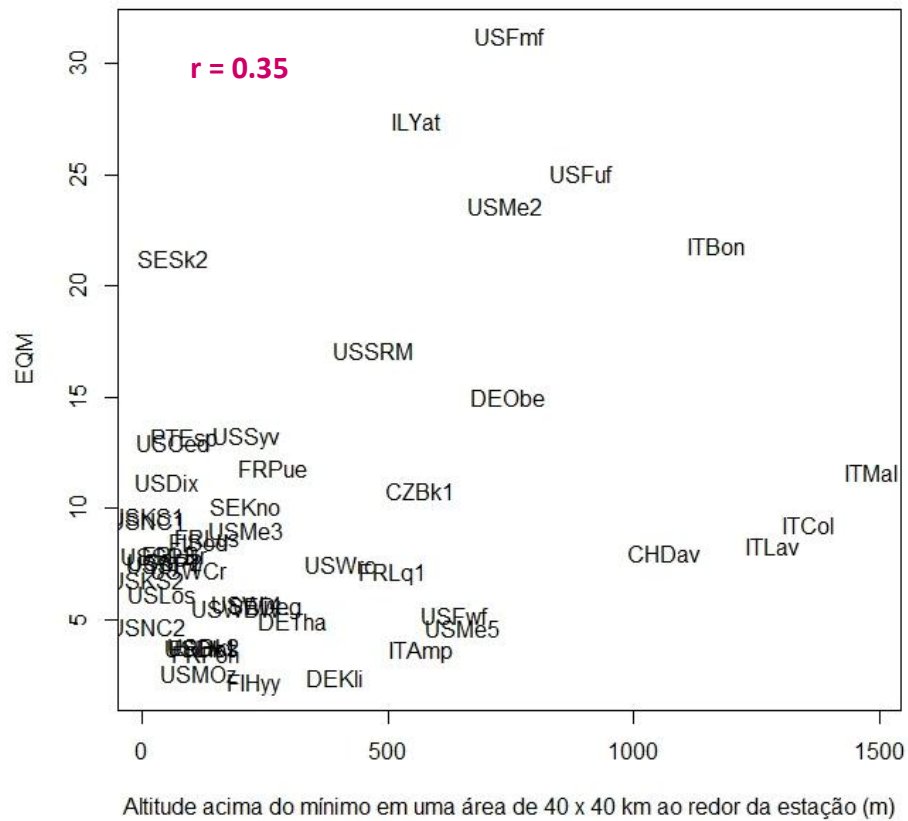
**Figura 4.11** –  $EQM$  (ver Figura 4.8) em termos de  $RI$  (ver Figuras 4.9 e 4.10).

Os padrões observados de dependência de NEE em relação a  $r_m$  ou a  $RI$  são consistentes. Isso significa que as estações para as quais a relação  $NEE \times \log(r_m)$  se aproxima de uma reta (Figura 4.9), também são aquelas nas quais o NEE normalizado depende pouco da variabilidade da turbulência, expressa em termos de  $u^*_{\text{máx}}/u^*_{\text{mín}}$ . Este resultado é comprovado quando  $EQM$  é comparado com  $RI$  (Figura 4.11). Consistentemente, estações que apresentam grande  $EQM$ , apresentam também grande  $RI$ , mostrando que quando a relação  $NEE \times \log(r_m)$  não é linear, o NEE total noturno depende fortemente do quanto a intensidade da turbulência varia ao longo da noite. Este resultado é, de certa forma, redundante, uma vez que os valores extremos de  $r_m$  ocorrem justamente quando a relação  $u^*_{\text{máx}}/u^*_{\text{mín}}$  é grande. Porém, o resultado é também forte evidência que aquelas estações que apresentaram um comportamento linear na Figura 4.9 podem representar casos em que não há perda local de  $CO_2$ , pois esses foram também locais em que NEE se mostrou independente da variabilidade da turbulência ao longo da noite.

Aqui convém esclarecer que os valores observados de  $RI$  não dependem do quão intermitente é a turbulência em dada estação. A intermitência pode ser quantificada pelos fatores de intermitência discutidos no capítulo 3, ou ainda pela inclinação da reta  $F_{CO_2} \times \log(r_m)$ , e pode ser verificado que há casos de turbulência bastante intermitente com  $RI$  próximo a 1, ou bastante superior a 1, assim como há estações em que a turbulência é

tipicamente contínua para qualquer valor de  $RI$ . Isso significa que a dependência de NEE em termos da variabilidade da turbulência não está relacionada ao fato da turbulência ser mais ou menos intermitente. Pode haver uma estação em que a turbulência seja tipicamente contínua, mas na qual NEE seja afetada pela sua variabilidade nas poucas vezes que esta ocorre. O caso oposto, de turbulência muito intermitente, mas com pouca diferenciação de NEE entre noites intermitentes e contínuas também é possível.

O que, então, controla a dependência de NEE na história da turbulência noturna, para uma dada estação? Uma resposta possível para esta pergunta seria a topografia. Transportes horizontais de  $CO_2$  são, em geral, associados a escoamentos de drenagem, que ocorrem em localidades com inclinação do terreno. Para identificar se há alguma dependência deste tipo, as topografias em torno de cada estação foram obtidas a partir de dados do satélite ASTER (Disponível em: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>). Diversas variáveis topográficas foram comparadas com as variáveis  $EQM$  e  $RI$ , que caracterizam o comportamento de NEE em função da história da turbulência. A melhor relação foi obtida quando a comparação foi feita com a altura que a estação se encontra acima da mínima altitude em uma área de 40 x 40 km em torno da estação (Figura 4.12). De maneira geral, as estações nas quais existem localidades mais baixas ao seu redor tendem a mostrarem maiores perdas de fluxos, fato evidenciado pelo maior  $EQM$ , que representa o desvio da relação linear de NEE x  $\log(r_m)$ . Por outro lado, estações em regiões mais planas, nas quais não há nenhum local ao redor que fique muito abaixo da própria estação, ou aquelas que, mesmo em terreno complexo estão abaixo dos arredores, tendem a apresentar uma relação mais linear, que segundo nossa análise, indica pouca perda de fluxo de  $CO_2$ .



**Figura 4.12** – *EQM* (ver Figura 4.8) em função da altitude em que cada estação está acima do ponto mais baixo em uma área de 40 x 40 km ao redor da estação.

Há, porém, que se destacar, que esta relação, conforme evidenciado pela Figura 4.12, é apenas uma tendência. Há grande espalhamento dos dados, e se pode identificar vários casos que não obedecem a essa relação evidente. Isso mostra que existem muitos outros processos que são importantes para determinar se há perda de fluxo localmente em uma dada estação. Entre esses, se pode especular alguns associados à dinâmica atmosférica local, como proximidade de linhas costeiras, que favoreceria a ocorrência de circulações noturnas de brisa. Também tem relevância não apenas a localização com respeito à topografia, mas o tipo de superfície ao redor da estação em consideração. Assim, uma estação em uma região inclinada, mas cercada do mesmo tipo de vegetação ao seu redor deve ser afetada menos pelos transportes advectivos que outra que sofra influência de variabilidade do tipo de superfície. A compreensão mais precisa dessas influências só é possível depois de uma análise detalhada das características de cada estação.

## 5 CONCLUSÕES

No presente estudo, aspectos importantes associados à ocorrência de turbulência intermitente e suas implicações para as estimativas de fluxos turbulentos noturnos de  $\text{CO}_2$  foram analisados a partir de um conjunto amplo de dados originados de mais de uma centena de estações de fluxos, espalhadas nas Américas e na Europa. As duas principais conclusões desta investigação foram:

-A intermitência dos fluxos turbulentos afeta os escalares de maneira diferenciada. Em particular, os fluxos de  $\text{CO}_2$  são mais afetados pela variabilidade da intensidade turbulenta que os fluxos de calor sensível em estações situadas sobre vegetação mais alta. Acredita-se que isto se deve ao maior acúmulo local deste escalar no interior de florestas, devido às taxas de respiração do subbosque e do solo;

- A comparação entre diversas estações mostrou que em algumas delas os fluxos noturnos totais são fortemente afetados pela variabilidade da intensidade turbulenta ao longo da noite. Esta dependência tem consistentemente o sentido de redução de fluxos em condições mais intermitentes. Além disso, nas estações em que não se verifica essa dependência, ou seja, aquelas nas quais a transferência de Carbono pelo ecossistema é independente da variabilidade da turbulência, há evidências de que a redução dos fluxos verificada nos períodos calmos é compensada por um aumento correspondente nos intervalos turbulentos.

A principal contribuição do presente trabalho, é, do nosso ponto de vista, no sentido de identificar um potencial problema na metodologia de determinação de fluxo turbulento pela técnica de covariância dos vórtices. Este provável problema ocorre naquelas estações em que nossa análise não identificou que as transferências de  $\text{CO}_2$  dependam da variabilidade da intensidade da turbulência. Nestes casos, é possível que não haja a necessidade de correção de fluxos devido à sua redução quando a intensidade turbulenta é pequena, ainda que tal correção seja sistematicamente feita. Mais que isso, a análise indica que fazer as correções nesses casos pode significar a contabilização dupla da transferência, pois o fluxo que não ocorre no período calmo é posteriormente capturado no evento intermitente subsequente, e se os dados do intervalo calmo forem corrigidos, essa correção implicará num excesso de fluxo.

É importante, porém destacar, que a análise não abordou aspectos particulares de cada sítio, e que só será possível afirmar de maneira conclusiva que há problemas na metodologia em uma dada estação quando os dados da estação em questão forem investigados em detalhe, levando-se em consideração todos os aspectos relevantes, como localização, histórico, dinâmica atmosférica local. No presente trabalho, foi apresentada apenas uma análise simplista envolvendo a topografia local, e os resultados obtidos apenas indicam que as características de relevo local afetam o fato de um dado local ter ou não perda de fluxo. A importância deste papel é, porém, variável de sítio para sítio, e certamente é afetada por outras características não consideradas na presente análise.

O caráter do presente trabalho de buscar identificar um problema antes de explicá-lo em detalhe, sugere uma grande quantidade de estudos que podem aprofundar a investigação no futuro. Entre esses, destacam-se:

- Identificar as características precisas que determinam se uma estação terá ou não perda local de fluxo. Para tanto, o ideal seria associar ao presente estudo medições de transportes advectivos;

- Utilizar dados mais detalhados em uma análise semelhante à apresentada aqui. Em particular, é importante que a análise não se restrinja apenas a médias de 30 minutos dos fluxos. Havendo a disponibilidade de dados brutos de turbulência, é possível também se analisar momentos estatísticos de mais alta ordem, como o quarto momento (curtose), que está justamente relacionado à ocorrência de eventos intermitentes;

- É importante também analisar a dependência dos fluxos com a história da turbulência nos diferentes níveis verticais ao longo da copa, uma vez que os eventos intermitentes são os responsáveis pelo acoplamento entre esses níveis. Uma análise deste tipo foi apresentada por Oliveira et al. (2012), mas é necessário ampliar esta investigação para uma quantidade maior de localidades;

- As técnicas de correção de dados utilizadas para os períodos com pequena intensidade turbulenta devem ser investigadas à luz dos resultados do presente estudo. Especificamente, é importante analisar se os períodos que estão tendo seus dados substituídos não são sucedidos por outros em que houve excesso de fluxo, caracterizando uma correção excessiva.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, O. C.; FITZJARRALD, D. R. In the core of the night – effects of intermittent mixing on a horizontally heterogeneous surface. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 106, p. 1–33, 2003.

ACEVEDO, O. C. et al. Intermittency and the exchange of scalars in the nocturnal surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, p. 41–55, 2006.

ACEVEDO, O. C. et al. Turbulent carbon exchange in very stable conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 125, p. 49–61, 2007.

ACEVEDO, O. C. et al. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1–10, 2009.

AGUIAR, R. G. et al. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 248–257, 2006.

AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The euroflux methodology. **Advances in Ecological Research**, v. 30, p. 113–175, 2000.

AUBINET, M. et al. Comparing CO<sub>2</sub> storage and advection conditions at night at different carboeuroflux sites. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 116, p. 63–94, 2005.

AUBINET, M. Eddy covariance CO<sub>2</sub> flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the problem. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1368–1378, 2008.

AUBINET, M. et al. Direct advection measurements do not help to solve the night-time CO<sub>2</sub> closure problem: Evidence from three different forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 655–664, 2010.

BALDOCCHI, D. et al. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 11, p. 2415–2434, 2001.

BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, p. 479–492, 2003.

BARR, A. G. et al. Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 32, p. 813–822, 2002.

BELCHER, S. E.; FINNIGAN, J.; HARMAN, I. N. Flows through forest canopies in complex terrain. **Ecological Applications**, v.18, p. 1436–1453, 2008.

BOING, S. et al. Intermittent turbulence in stratified flow over a canopy. **19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence**, Keystone, Colorado, American Meteorological Society, 2010.

COSTA, F. D. et al. A simplified model for intermittent turbulence in the nocturnal boundary layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 68, p. 1714–1729, 2011.

COULTER, R. L.; DORAN, J. C. Spatial and temporal occurrences of intermittent turbulence during CASES-99. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 105, p. 329–349, 2002.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, p. 43–69, 2001.

FEIGENWINTER, C.; BERNHOFER, C.; VOGT, R. The influence of advection on the short term CO<sub>2</sub> budget in and above a forest canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 113, p. 201–224, 2004.

FEIGENWINTER, C. et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO<sub>2</sub> fluxes at three forest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 12–24, 2008.

FINNIGAN, J. An introduction to flux measurements in difficult conditions. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1340–1350, 2008.

GOULDEN, M. L. et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v. 2, p. 169–182, 1996.

GRACE, J. et al. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. **Global Change Biology**, v.1, p. 1–12, 1995.

- GRACE, J. et al. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. **Global Change Biology**, v. 2, p. 209–217, 1996.
- GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. **Journal of Ecology**, v. 92, p. 189–202, 2004.
- GU, L. et al. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 179–197, 2005.
- HOLLINGER, D. Y. et al. Spatial and temporal variability in forest–atmosphere CO<sub>2</sub> exchange. **Global Change Biology**, v. 10, p. 1689–1706, 2004.
- HOLLINGER, D. Y.; RICHARDSON, A. D. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. **Tree Physiology**, v. 25, p. 873–885, 2005.
- HOWELL, J. F.; SUN, J. Surface-Layer Fluxes in Stable Conditions, **Boundary-Layer Meteorology**, v. 90, p. 495–520, 1999.
- LEE, X.; MASSMAN, W.; LAW, B. *Handbook of Micrometeorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 250 p.
- LEE, X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 91, p. 39–49, 1998.
- LEUNING, R.; JUDD, M. J. The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes. **Global Change Biology**, v. 2, p. 241–253, 1996.
- MAHRT, L. Characteristics of submeso winds in the stable boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 130, n. 1, p. 1–14, 2009.
- MASSMAN, W. J.; LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 121–144, 2002.
- MILLER, S. D. et al. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecological Applications**, v.14, p. S114–S126, 2004.

MONCRIEFF, J. B.; MALHI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. **Global Change Biology**, v. 2, p. 231–240, 1996.

MUNGER, J. W.; LOESCHER, H. W. **Guidelines for making eddy covariance flux measurements**. Disponível em: < [http://public.ornl.gov/ameriflux/measurement\\_standards\\_4.doc](http://public.ornl.gov/ameriflux/measurement_standards_4.doc) >. Acesso em: 12 abr. 2012.

NAPPO, C. Sporadic breakdowns of stability in the PBL over simple and complex terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 54, p. 69–87, 1991.

OLIVEIRA, P. E. S. **Trocas Turbulentas de Escalares Acima e no Interior de uma Floresta de Araucária no Sul do Brasil**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

OLIVEIRA, P. E. S. et al. Nocturnal Intermittent Coupling Between the Interior of a Pine Forest and the Air Above It. **Boundary-Layer Meteorology**. No prelo.

PAPALE, D. et al. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences**, v. 3, p. 571–583, 2006.

PINTO, L. D. V. O. ; ROCHA, H. R. Cálculo dos fluxos turbulentos de energia e CO<sub>2</sub> pelos métodos de eddy correlation e do co-espectro. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, 2000.

RUNNING, S. W. et al. A global terrestrial monitoring network, scaling tower fluxes with ecosystem modeling and EOS satellite data. **Remote Sensing of the Environment**, v. 70, p. 108–127, 1999.

SALESKA, S. R. et al. Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, v. 302, p. 1554–1557, 2003.

SCHAAF, L. B. et al. Incremento diamétrico e em área basal no período 1979-2000 de espécies arbóreas de uma Floresta Ombrófila Mista localizada no sul do Paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 2, p. 271–290, 2005.

STAEBLER, R.; FITZJARRALD, D. R. Observing subcanopy CO<sub>2</sub> advection. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 139–156, 2004.

SUN, J. et al. Transport of carbon dioxide, water vapor and ozone by turbulence and local circulations. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 25873–25885, 1998.

SUN, J. et al. Atmospheric disturbances that generate intermittent turbulence in nocturnal boundary layers. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, p. 255–279, 2004.

SUN, J. et al. CO<sub>2</sub> transport over complex terrain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 1–21, 2007.

TOTA, J. et al. Amazon rain forest subcanopy flow and the carbon budget: Santarem LBA-ECO site. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, 2008.

VALENTINI, R.; MATTEUCCI, G.; DOLMAN, A. J. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. **Nature**, v. 404, p. 861–864, 2000.

Van de WIEL, B. J. H. et al. Intermittent turbulence and oscillations in the stable boundary layer over land. Part I: A bulk model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, p. 942–958, 2002.

van GORSEL, E. et al. Nocturnal carbon efflux: reconciliation of eddy covariance and chamber measurements using an alternative to the  $u^*$ -threshold filtering technique. **Tellus**, v. 59B, p. 397–403, 2007.

van GORSEL, E. et al. Application of an alternative method to derive reliable estimates of nighttime respiration from eddy covariance measurements in moderately complex topography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1174–1180, 2008.

van GORSEL, E. et al. Estimating nocturnal ecosystem respiration from the vertical turbulent flux and change in storage of CO<sub>2</sub>. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1919–1930, 2009.

VERMETTEN, A. W. M. et al. CO<sub>2</sub> uptake by a stand of Douglas fir: Flux measurements compared with model calculations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 72, p. 57–80, 1994.

VICKERS, D.; MAHRT, L. A solution for flux contamination by mesoscale motions with very weak turbulence. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 118, p. 431–447, 2006.

WHARTON, S. et al. Turbulence considerations for comparing ecosystem exchange over old-growth and clear-cut stands for limited fetch and complex canopy flow conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1477–1490, 2009.

WOFSY, S. C. et al. Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. **Science**, v. 260, p. 1314–1317, 1993.

WOHLFAHRT, G. et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 141–162, 2005.

YI, C. X. et al. The contribution of advective fluxes to net ecosystem exchange in a high-elevation, subalpine forest. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1379–1390, 2008.

ZERI, M. et al. Analysis of periods with strong and coherent CO<sub>2</sub> advection over a forested hill. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 674–683, 2010.