

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

DIFERENTES TÉCNICAS DE
CONDICIONAMENTO EM SÉRIES TEMPORAIS
TURBULENTAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Hans Rogério Zimmermann

Santa Maria, RS, Brasil

2005

DIFERENTES TÉCNICAS DE CONDICIONAMENTO EM SÉRIES TEMPORAIS TURBULENTAS

por

Hans Rogério Zimmermann

Dissertação Apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e Suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Física

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes

Santa Maria, RS, Brasil

2005

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

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

**DIFERENTES TÉCNICAS DE CONDICIONAMENTO EM
SÉRIES TEMPORAIS TURBULENTAS**

elaborada por
Hans Rogério Zimmermann

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Antônio Gledson Oliveira Goulart(URI)

Prof. Dr. Otávio Costa Acevedo(UFSM)

Santa Maria, 09 de Dezembro de 2005.

EPÍGRAFE

À minha família, pelo carinho dedicado durante toda minha vida.

Aos meus amigos, irmãos que a vida me proporcionou.

À UFSM, pelos seus programas assistencias como RU e CEU 2, que me permitiram a permanência no curso superior e na construção intelectual do Homem que sou.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos meus colegas do Laboratório de Micrometeorologia.

Aos meus professores.

Ao professor Massimiliano Franceschi que me auxiliou através de vários e-mails, discutindo e ajudando na compreensão sobre filtros digitais.

Aos professores David Roy Fitzjarrald e Ricardo Kendi Sakai, pelos esforços na condução do grupo CD-03 (LBA-ECO).

Ao professor Osvaldo Luiz Leal de Moraes, meu orientador e pessoa de especial notoriedade tanto pessoal como profissional, cuja frase cai bem: "...de que nos adiantariam asas, se não houvessem pessoas como você, que nos ensinam a voar para o alto e com sabedoria?".

Àquele que ao mundo arquitetou e sutilmente em todas as coisas é e presente está.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Física

Universidade Federal de Santa Maria

DIFERENTES TÉCNICAS DE CONDICIONAMENTO EM SÉRIES TEMPORAIS TURBULENTAS

AUTOR: HANS ROGERIO ZIMERMANN

ORIENTADOR: OSVALDO LUIZ LEAL DE MORAES

Data e Local da Defesa: 09 de Dezembro de 2005, Santa Maria.

A dinâmica da atmosfera próxima à superfície é regida por dois forçantes principais, um mecânico e outro térmico. Esses processos são responsáveis pela variabilidade dos escoamentos na baixa atmosfera e, é essa variabilidade que caracteriza a turbulência atmosférica. A presença do fenômeno de turbulência, permite distinguir uma camada do restante da atmosfera, esta é chamada de Camada Limite Atmosférica (CLA). A importância de estudos nessa camada, está relacionada com o fato da turbulência representar um processo efetivo de transporte próximo à superfície. O tratamento adequado dos dados experimentais permite maior confiabilidade, tanto qualitativa quanto quantitativas, na interpretação e entendimento desse transporte, ou seja, é necessário para uma adequada caracterização dos fluxos turbulentos.

Nesta dissertação são investigadas algumas, das principais técnicas básicas, no tratamento de dados e condicionamento em séries temporais turbulentas. Os dados, experimentalmente coletados e separados em conjuntos de amostras com 27 minutos, são submetidos aos tratamentos com técnicas de média simples, média instantânea através de filtros digitais recursivos e remoção linear de tendência.

Observa-se as implicações da aplicação destas técnicas, como cada uma delas age nas séries temporais turbulentas de temperatura e velocidade vertical do vento, apresentando e discutindo os resultados dessa aplicação, nas estimativas dos fluxos turbulentos de calor sensível através do método de Covariância dos Vórtices (MCV), e também das densidades espectrais de temperatura e velocidade vertical.

Um dos grandes benefícios do estudo feito nessa dissertação, foi identificar que a correção do atraso de fase, que não era levada em consideração nos modelos de filtros digitais anteriores (FDR proposto por McMillen 1988) e, presente no modelo

(FFDR Franceschi e Zardi 2003) conduz à estimativas satisfatórias, principalmente para espectros de temperatura turbulenta, que são os mais difíceis de se minimizar os efeitos de não estacionariedade. Ficou claro, observando nos resultados gráficos dos espectros, que a remoção de baixas frequências nos espectros de temperatura, os deixou com o perfil típico de espectros classicamente esperados.

Palavras-chaves: Covariância dos Vórtices, Turbulência, Micrometeorologia, Filtros Digitais.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Física

Universidade Federal de Santa Maria

DIFERENTES TÉCNICAS DE CONDICIONAMENTO EM SÉRIES TEMPORAIS TURBULENTAS

AUTOR: HANS ROGÉRIO ZIMERMANN

ORIENTADOR: OSVALDO LUIZ LEAL DE MORAES

Data e Local da Defesa: 09 de Dezembro de 2005, Santa Maria.

The dynamics process of the atmosphere near Earth ground is controlled by two main forcings, thermal and mechanical. These processes are responsible for the atmospheric flow variability in this layer, and this variability characterizes the atmospheric turbulence. The presence of turbulence phenomena drives to distinguish it from the rest of atmosphere, such layer is commonly called Atmospheric Boundary Layer (ABL). So, the importance of studying ABL is the fact that turbulence represents an effective transport process near the ground surface. Adequate treating of the experimental data gives more truthful so qualitative as quantitative when we are interpreting and understanding these transports. This is very important for suitable trustful characterizing the turbulent fluxes.

This dissertation shows an overview about some basic turbulent data treatment techniques. The dataset, collected experimentally and separated into 27 minutes window samples, were subjected to simple mean, running mean through digital recursive filter and linear detrending.

Our focus are the implications of applying these techniques and how each of these acts in turbulent time series of temperature and vertical velocity of the wind data, showing and discussing about the results in the estimating fluxes of sensible heat by Eddy Covariance method and also spectral densities estimates of temperature and vertical wind velocity.

The main goal of the study done in this dissertation, was identifying that applying corrections on phase lag, not considered in older digital recursive filter (FDR as proposed by McMillen 1988) and, present into the model (FFDR proposed by Franceschi e Zardi 2003) leads for trustful estimates, mainly for turbulent temperature spectra, which

are the hardest ones for minimizing the non stationarity effects. Clearly, observing the graphical results of temperature spectra, we see that those low frequencies were better removed than the others technics, giving to spectral shape the classics expected shape.

Key-words: Eddy Covariance, Turbulence, Micrometeorology, Digital Filtering.

Lista de Figuras

1	Função de autocorrelação	p. 18
2	Exemplo de aplicação do filtro ASG numa série turbulenta de temperatura.	p. 35
3	Imagem topográfica georeferenciada do local da torre onde foram coletados os dados. Satélite IKONOS, resolução 90 quilômetros.	p. 37
4	Imagem na faixa do visível, do local da torre onde foram coletados os dados, Satélite IKONOS.	p. 38
5	Pastagem	p. 39
6	Torre Micrometeorológica	p. 42
7	Anemômetro Sônico 3D	p. 43
8	Medidor de concentração de CO ₂ e H ₂ O	p. 43
9	Anemômetro Sônico 2D	p. 44
10	Sistema de Energia Solar Híbrido	p. 44
11	Mosaico do Sítio Experimental	p. 45
12	Gráfico de velocidade vertical do vento sem nenhum tratamento, período de 24 horas, 30/08/02.	p. 47
13	Gráfico de temperatura sem nenhum tratamento, período de 24 horas, 30/08/02.	p. 48
14	Comparação entre uma série turbulenta sem tratamento e após a remoção linear de tendência com RLT.	p. 49
15	Comparação entre a filtragem por FDR e FFDR, com $\tau_R = 200$ s.	p. 50
16	Gráfico da correlação da covariância de w e T (vermelho) e ajuste exponencial (azul), período de 25 seg.	p. 52

17	Velocidade vertical amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000 s$, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.	p. 56
18	Temperatura amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000 s$, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.	p. 57
19	Flutuação da velocidade vertical amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000 s$, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.	p. 58
20	Flutuação da temperatura amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000 s$, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.	p. 59
21	Comparação entre RLT e FFDR, na estimativa da flutuação da velocidade, com $\tau_R = 10 - 1000 s$ para o FFDR, entre 02:00 e 02:27 hs, dia 30/08/02.	p. 60
22	Comparação entre RLT e FFDR, na estimativa da flutuação da temperatura, com $\tau_R = 10 - 1000 s$ para o FFDR, entre 02:00 e 02:27 hs, dia 30/08/02.	p. 61
23	Comparação entre FFDR com $\tau_R = 10 s$, e (Bruto), na estimativa das covariâncias e evolução do fluxo turbulento médio, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 30/08/02.	p. 62
24	Comparação entre FFDR com $\tau_R = 200 s$, e (Bruto), na estimativa das covariâncias e evolução do fluxo turbulento médio, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 30/08/02.	p. 63
25	Comparação entre FFDR com $\tau_R = 1000 s$, e (Bruto), na estimativa das covariâncias e evolução do fluxo turbulento médio, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 30/08/02.	p. 64
26	Comparação entre FFDR com $\tau_R = 5000 s$, e (Bruto), na estimativa das covariâncias e evolução do fluxo turbulento médio, entre 12:00 hs e 12:27 hs, dia 30/08/02.	p. 65
27	Comparação FFDR, RLT e (Bruto), na estimativa das densidades espectrais de temperatura, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02. . .	p. 66
28	Comparação FFDR, RLT e (Bruto), na estimativa das densidades espectrais de velocidade vertical do vento, entre 02:00 e 02:27 hs, dia 01/02/02.	p. 67

29	Decomposição de sinal em Série de Fourier	p. 75
----	---	-------

Lista de Tabelas

- 1 Esquema de média móvel para $s = q = 2$ p. 30
- 2 Lista de valores para a escala de tempo τ , comumente adotadas em filtros digitais recursivos. p. 33
- 3 Comparação dos fluxos para o período das **02:00** até **02:28** de **30/08/02**. p. 48
- 4 Comparativo do erro sistemático após o tratamento de séries temporais, com diferentes tipos e escala de filtro digital recursivo, no período das 12:00 hs até as 12:28 hs nos dias 04/02/02 e 30/08/02. p. 53

Conteúdo

1	Introdução	p. 8
2	Referenciais Teóricos	p. 13
2.1	Base Estatística	p. 13
2.1.1	Valor Esperado	p. 13
2.1.2	Flutuações	p. 14
2.1.3	Função Densidade de Probabilidade	p. 14
2.1.4	Correlações	p. 15
2.2	Hipótese de Taylor	p. 16
2.3	Estatística de Séries Temporais	p. 16
2.3.1	Escolha do tempo de média	p. 17
2.3.2	Média de Reynolds	p. 19
2.4	Método de Covariância dos Vórtices	p. 22
2.5	Tratamentos	p. 25
2.5.1	Rotação 3D	p. 26
2.5.1.1	Média Móvel	p. 28
2.5.1.2	Removedor Linear de Tendência	p. 30
2.5.2	Filtro Digital Recursivo.	p. 31
2.5.2.1	FDR - McMillen	p. 31
2.5.2.2	FDR - por Franceschi e Zardi	p. 32
2.5.3	Alisador tipo Sino Gradual	p. 34
3	Detalhes Experimentais	p. 36

3.1	Sítio Experimental	p. 36
3.2	Instrumentação	p. 39
3.3	Sistema de Energia e Aquisição de Dados	p. 40
4	Resultados	p. 46
4.1	Metodologia	p. 46
4.2	Fluxos	p. 54
4.3	Espectros	p. 55
5	Conclusões	p. 68
	Apêndice A – Estimativa Espectral de Sinais Aleatórios.	p. 71
	Apêndice B – Transformada de Fourier	p. 74
	Referências	p. 77

1 *Introdução*

Nesta dissertação, será feito um estudo teórico sobre as técnicas de tratamentos de dados, em séries temporais turbulentas. Num segundo momento, aplicar-se-ão algumas destas técnicas em dados experimentais.

Observaremos as implicações, da aplicação destas técnicas, nas séries temporais turbulentas de temperatura e velocidade vertical do vento, apresentando e discutindo os resultados da aplicação dessas, nas estimativas dos fluxos turbulentos de calor sensível e densidades espectrais de temperatura e velocidade vertical.

A dinâmica da atmosfera próxima à superfície é regida por dois forçantes principais, um mecânico e outro térmico. Esses processos são responsáveis pela *quasi* aleatoriedade do comportamento das variáveis dinâmicas e termodinâmicas dos escoamentos na baixa atmosfera e, é essa *quasi* aleatoriedade que caracteriza a turbulência atmosférica. A presença do fenômeno de turbulência, permite distinguir uma camada do restante da atmosfera, esta é chamada de Camada Limite Atmosférica (CLA).

A principal importância de estudos como o desenvolvido nessa dissertação, está relacionada com o fato da turbulência representar um processo efetivo de transporte próximo à superfície. O tratamento adequado dos dados experimentais permite maior confiabilidade, tanto qualitativa quanto quantitativas, na interpretação e entendimento desse transporte, ou seja, é necessário para uma adequada caracterização dos fluxos turbulentos.

Existem outros argumentos, que enlevam a importância de um melhor entendimento desses processos de transferências. Por exemplo, Lenschow (1986), lembra que a Biosfera está quase em sua totalidade contida na CLA, ou dela depende, e essa pode ser considerada como o sistema circulatório da Biosfera, em comparação com o sistema do corpo humano. Nela ocorrem os transportes de dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio (O_2) para plantas e animais, para fotossíntese e respiração. Também remove produtos excedentes, limpando a atmosfera através de processos como reações fotoquímicas, e

também os transportando para a atmosfera livre ou depositando-os sobre a superfície.

Em síntese, investigar e obter resultados mais confiáveis, sobre o comportamento dos fluxos turbulentos na CLA, é de grande importância prático-científica, pois, nessa camada acontecem as atividades humanas. Na prática, a turbulência transfere calor e umidade da superfície e as dispersa horizontalmente e verticalmente. Esse processo efetivamente "condiciona o ar" e alimenta energeticamente o sistema climático em todas as escalas, ou seja, a transferência de massa e energia na CLA é responsável por regular grande parte dos processos no conjunto atmosférico. O entendimento das transferências de quantidades como vapor d'água, dióxido de carbono, poluentes e outros escalares, é, portanto, fundamental para a caracterização do Tempo e Clima da superfície, (Moraes *et al.*, 2004) [34].

É comumente sabido que a dinâmica atmosférica apresenta dois comportamentos principais distintos em um ciclo diário. Em primeiro, o aquecimento da superfície da Terra resulta na formação de uma CLA fortemente convectiva, durante o período diurno. Uma turbulência vigorosa, bem desenvolvida, conduz a uma forte mistura vertical, caracterizando a que encontramos geralmente na literatura como *Camada de Mistura*. Em segundo, durante o período noturno, uma camada estável é formada sobre a superfície do planeta, devido ao resfriamento de sua superfície e, a turbulência decai sendo muito menos efetiva no processo difusivo.

Stull (1988) [35] define a turbulência, presente nos movimentos atmosféricos, como uma parte intrínseca e que deve ser quantificada, de maneira que se possa obter um melhor entendimento no estudo da dinâmica atmosférica. Observa ainda, que a aleatoriedade da turbulência, torna a descrição determinística da dinâmica um processo bastante difícil e, como consequência, é necessário a utilização da estatística como ferramenta matemática básica, limitando-se a valores médios ou medidas médias da turbulência e outros momentos estatísticos.

A turbulência nos processos atmosféricos, principalmente no período diurno, pode ser vista não somente como um campo de velocidades tridimensionais aleatório, mas também como um campo escalar aleatório de temperatura, vapor de água, poluentes e outros escalares criados por tal campo de velocidades, (Wingard, 1986). De acordo com Degrazia *et al.* (2004) [34], um campo turbulento geofísico caracterizado por um número de Reynolds muito elevado ($Re \approx 10^7$), é um tipo de fenômeno turbulento predominante na dinâmica atmosférica, ou seja, uma turbulência bem desenvolvida e, em um período de vinte e quatro horas (ciclo diário) notamos sua manifestação

principalmente no ciclo diurno.

Em pesquisas experimentais, estamos interessados naquilo que chamamos *medida física*, ou seja a ciência na interação entre o sensor e o ambiente. Devido à presença da turbulência, geralmente estudamos valores médios das amostras, pois o processo de fazer médias minimiza o *caos* existente no campo instantâneo. Será visto que durante o período diurno, principalmente, um processo adequado de média pode reduzir os efeitos de eventos de grande escala, que afetam na forma de ruído, as observações de pequena escala. Dentre os processos possíveis de média o usual é aquele em uma propriedade A , por exemplo, é decomposta em duas componentes, uma média e uma turbulenta:

$$A = \bar{A} + a',$$

onde \bar{A} é a componente média e a' é a componente turbulenta.

Existem várias maneiras de se efetuar o processo de média. A mais empregada por teóricos é a técnica de efetuar médias sobre um grande número de realizações, conhecida como média sobre ensemble, ou média de conjunto. Já os estudiosos em modelagem numérica utilizam médias sobre volume, como ferramenta adicional à média sobre ensemble. Os experimentalistas utilizam majoritariamente médias temporais.

Em estudos como o desenvolvido nesta dissertação, é necessário levarmos em consideração que ao aplicarmos quaisquer tipos de médias é preciso, previamente, determinarmos a escala de tempo onde será efetuada a média. A escolha desse intervalo, deve ser feito de tal forma que siga as propriedades da Média de Reynolds, ou seja as flutuações devem ser estatisticamente estacionárias no período escolhido para a análise. Uma maneira prática para determinar o tempo em que a média deve ser tomada, consiste em previamente escolher o erro aceitável.

O método mais utilizado para estimar as trocas entre os ecossistemas e a atmosfera, é a técnica de covariância dos vórtices (MCV), a qual através da amostragem dos movimentos ascendentes e descendentes que transportam escalares específicos na CLA, determina a diferença líquida desses através de uma interface (Dennis d. Baldocchi, 2003)[4].

A MCV requer que assumamos algumas condições básicas, as quais nunca são estritamente completas, assim, são necessários certos procedimentos matemáticos como filtro passa-alta e rotações de coordenadas para satisfazê-las. Nessa técnica, esses procedimentos são necessários para o cálculo da estimativa dos fluxos turbulentos. A superposição dos ciclos diurnos nas escalas de tempo do movimento turbulento,

mudanças nas condições meteorológicas e oscilações dos sensores, adicionam ruídos aos dados de turbulência, manifestando-se através de tendência ou mudanças de baixa-frequência nas séries turbulentas. A tendência, que contamina o sinal, precisa ser removida com um adequado método de remoção linear de tendência, mas a técnica mais apropriada para este procedimento ainda não é bem clara, (Rannik *et al.*, 1999) [30].

Para estudos na CLA as amostras são divididas em conjuntos. Esses, abrangem as escalas que contém a maior parte do vórtices turbulentos mais energéticos. Estas escalas, conhecidas como escalas turbulentas, têm períodos inferiores à uma hora (1h), conforme indicado por diversos autores como Degrazia *et al.* 2005; Stull 1988; Van Der Hoven 1957 *apud* Lumley e Panofsky 1964. Degrazia *et al.* [8] se referem aos turbilhões (vórtices) que possuem a maior parcela da energia turbulenta total, como sendo aqueles que mais influenciam no processo dispersivo. Uma consequência disto, é a necessidade de estimar uma escala de comprimento em termos das características destes turbilhões. Esta escala é necessária na parametrização dos fluxos turbulentos.

Atualmente, os processos de média utilizados para contornar os problemas descritos anteriormente, são a Técnica de Média Móvel (McMillen, 1988; Moncrieff *et al.*, 1997); Remoção Linear de Tendência (Üllar Rannik and Tīmo Vesälä 1999); Filtros Digitais Recursivos (McMillen, 1988); Nesta Dissertação dar-se-á ênfase na correção, sugerida por Franceschi e Zardi (2003) [11] para o filtro digital recursivo que foi inicialmente proposto por McMillen em 1988.

Franceschi e Zardi propõem correções para minimizar os efeitos do deslocamento de fase, que ocorre ao aplicar esse filtro em uma série temporal turbulenta.

O porquê de se investigar as diferentes técnicas de tratamentos das séries temporais turbulentas na CLA está baseado na necessidade do tratamento prévio dos dados das grandezas sendo medidas. Ou seja, é uma maneira de minimizar os erros que conduzem a uma interpretação "equivocada" ou incompleta da dinâmica atmosférica, uma vez que ao utilizar dados "brutos", pode-se estar superestimando ou subestimando as grandezas físicas presentes no processo [30].

Em síntese, quando efetuamos as amostragens em tempo real, estes sinais possuem, embutidos ou sobrepostos, tendências de escalas sinótica, escalas diurnas e ruídos dos próprios equipamentos. Desta forma, um processo estatístico de média aritmética simples, conduz a uma superestimação sistemática das variâncias das quantidades turbulentas e, uma superestimação ou subestimação dos fluxos turbulentos, dependendo do comportamento da tendência linear. Quando removemos a tendência, através de

um filtro (incluindo o cálculo de média e remoção linear da tendência, sobre um tempo de observação limitada), removemos algumas componentes de baixas frequências, produzindo uma subestimação sistemática. Franceschi e Zardi (2003) [11] lembram, que uma série temporal turbulenta, geralmente é considerada como uma realização com período limitado, de um ensemble de possíveis realizações e o melhor que o investigador pode fazer é usualmente corrigir a subestimação da estatística turbulenta, incluindo a covariância (fluxo), devido à remoção linear da tendência sob condições similares de estacionariedade, (Rannik *et al.*,1999) [30].

O planejamento de estudos observacionais requer o conhecimento das capacidades e limitações dos sensores, como estratégias para implementação de experimentos de campo, bem como as técnicas de tratamentos, análise e síntese de dados, ou seja, escalas de tempo de média, tipos de filtros e outros tratamentos [19].

Neste trabalho as diferentes técnicas discutidas, sucintamente nesta introdução, serão aplicadas a um conjunto de dados experimentais coletados em uma torre de fluxo no sítio 77, quilômetro 77 da rodovia Santarém-Cuiabá (BR 163), pertencente ao projeto LBA-ECO, cujos detalhes serão apresentados no capítulo 3. O Objetivo é verificar quais das técnicas apresentam-se mais adequadas na estimativa dos fluxos turbulentos. Um objetivo adicional é verificar a influência da mesma nos cálculos espectrais.

Esta dissertação está dividida como segue: No capítulo 1 a introdução corrente; No capítulo 2 faremos uma revisão teórica sobre os processos estatísticos envolvidos, além de algumas considerações e conceitos relevantes, todavia, com propósitos didáticos, as quais auxiliam em certas hipóteses e condições de contorno que são assumidas, como exemplo: ergodicidade, estacionariedade estatística, homegeneidade, etc...; No capítulo 3 serão apresentados os detalhes experimentais, como a descrição do sítio, instrumentos e sistema de dados. Esta seção contém informações além das necessárias para o desenvolvimento desta dissertação, porém, tendo como objetivo registrar informações que possam ser, de nível didático-científico, úteis ao leitor sobre a estrutura do LBA-ECO e equipamentos disponíveis nas torres; No capítulo 4 apresentamos a metodologia aplicada e alguns resultados e discussões sobre os mesmos; No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões observadas nas aplicações das diferentes técnicas de tratamento em séries temporais turbulentas; No capítulo 6 as conclusões; Nas seções subseqüentes apresentam-se os apêndices e por fim as referências bibliográficas.

2 Referenciais Teóricos

2.1 Base Estatística

A base do tratamento estatístico, na dinâmica atmosférica, é análoga as bases estatísticas utilizadas no estudo termodinâmico dos gases, porém constituída sobre as equações de Navier-Stokes (Reynolds, 1895) [31].

2.1.1 Valor Esperado

Seja uma certa grandeza A , que possa adotar uma série de N valores a_i , $i = 1, \dots, N$. Define-se o valor esperado, ou média de A como:

$$\langle A \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \quad (2.1)$$

Em geral, temos que distinguir se o valor esperado é sobre conjunto (ensemble), temporal ou espacial. No primeiro caso, os valores distintos a_i são obtidos de amostras diferentes do mesmo experimento (realização). Se o processo que gera as medidas de A é estacionário, o valor esperado em ambos os casos será idêntico para $N \rightarrow \infty$, veremos a implicação deste fato na formulação do *Teorema de Ergodicidade*.

No caso de obtermos a grandeza A como uma função contínua no tempo, o valor esperado sobre um certo intervalo de T é definido como:

$$\langle A \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \quad (2.2)$$

A obtenção da grandeza A como uma função contínua no tempo, só é possível nos casos de expressões analíticas.

Em geral, quaisquer instrumentos utilizados em campanhas experimentais, coletam amostras discretas de uma quantidade em questão; nestes casos é comum substituir o

operador integral na expressão 2.2, pelo operador somatório, sem perda de generalidade.

2.1.2 Flutuações

Uma vez sendo possível expressar a grandeza A como uma função contínua do tempo, ela tenderá ao valor esperado $\langle A \rangle$ definido por 2.2 no dado intervalo T . Num instante qualquer, por exemplo $t \in [0, T]$, define-se a flutuação de A como:

$$a'(t) = a(t) - \langle A \rangle. \quad (2.3)$$

É direto que, $\langle a' \rangle = 0$.

Uma grandeza importante no estudo da turbulência, é o desvio quadrático da média da flutuação, $\langle a'^2 \rangle^{1/2}$, porquê ela indica a escala de variação de $a(t)$ em torno do seu valor médio.

Outra medida também muito importante, principalmente para a estimativa de uma tolerância de erro, é a flutuação relativa:

$$\epsilon = \frac{\langle a'^2 \rangle^{1/2}}{\langle A \rangle}. \quad (2.4)$$

2.1.3 Função Densidade de Probabilidade

Quando efetuamos medidas experimentais, geralmente não estamos muito interessados especificamente na magnitude do valor $a(t)$, mas sim nas características de suas propriedades estatísticas, uma forma apropriada de fazer tal caracterização, é através de uma Função de Densidade de Probabilidade (**FDP**).

A FDP, é uma função que tem a propriedade de indicar a probabilidade $P(a)$, com que \mathbf{A} tenha um valor entre a e $a + da$. Libby [20] descreve de forma muito clara, como calcular a FDP, a partir de dados experimentais.

As relações da FDP, entre uma certa grandeza e suas propriedades estatísticas são:

$$1 = \int_{-\infty}^{\infty} P(a) da, \quad (2.5)$$

$$\langle A \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} a P(a) da, \quad (2.6)$$

$$\langle a'^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} (a - \langle A \rangle)^2 P(a) da. \quad (2.7)$$

Observando 2.7, podemos concluir que se pode, em geral, calcular momentos de qualquer ordem, a partir da FDP, mediante:

$$\langle a^n \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} (a - \langle A \rangle)^n P(a) da. \quad (2.8)$$

2.1.4 Correlações

Uma forma de se medir a velocidade, tanto no tempo quanto no espaço, com que um sinal flutua, é através da autocorrelação.

Assumindo que uma variável $a(t)$, com um valor médio $\langle A \rangle$ e uma flutuação $a'(t)$ em um certo instante, podemos construir outra, a partir desta, introduzindo um deslocamento ξ de tempo, tal que

$$a(t + \xi) = \langle A \rangle + a'(t + \xi)$$

Se multiplicarmos as flutuações destas duas variáveis e realizarmos uma média temporal, obteremos um número que será diferente para cada valor de ξ . Se ξ for infinitesimalmente pequeno, este número se aproximará de $\langle a'^2 \rangle$, de forma que o coeficiente de correlação temporal,

$$R(\xi) = \frac{\langle a'(t)a'(t + \xi) \rangle}{\langle a'^2 \rangle}, \quad (2.9)$$

é uma função de ξ com a propriedade de $R(\xi) \rightarrow 1$ quando $\xi \rightarrow 0$.

Por outro lado, se o sinal é estatisticamente estacionário, a função de autocorrelação será simétrica em relação à $\xi = 0$, e, portanto, sua primeira derivada será nula na origem.

Experimentalmente, e, em todos os estudos de turbulência, se observa que a função de autocorrelação tende assintoticamente para zero para grandes valores de ξ , conforme ser observado na figura idealizada (Figura 1) na seção 2.3.1, e na (Figura 16) obtida de dados experimentais.

Uma escala de tempo associada à autocorrelação, surge diretamente de sua integral, assumindo que esta seja convergente, e é denominada escala de tempo integral, expressa como:

$$\Gamma_1 = \lim_{\xi \rightarrow \infty} \int_0^{\xi} R(\xi') d\xi' \quad (2.10)$$

2.2 Hipótese de Taylor

As dimensões características de espaço e tempo, em um campo turbulento, são definidas a partir das autocorrelações das flutuações das velocidades. Em certas ocasiões é possível relacionar as correlações, temporais e espaciais, com base na Hipótese de Taylor.

Se um fluxo é homogêneo¹ e com uma velocidade média U na direção x , e a flutuação u' for muito menor que a velocidade média U [17], se pode assumir que:

$$\frac{\partial}{\partial t} = -U \frac{\partial}{\partial x}. \quad (2.11)$$

É importante ressaltar que para um sinal puramente aleatório, a escala integral é nula, porém, não é nula para a turbulência, o que mostra que o sinal turbulento não é totalmente aleatório.

Um estudo mais profundo deste problema, foi efetuado por Lin (1953) [22], que demonstrou que, para uma turbulência homogênea e altos números de Reynolds, a hipótese de Taylor é válida se:

$$\frac{\langle (\frac{du}{dt})^2 \rangle}{U^2 \langle (\frac{\partial u}{\partial x})^2 \rangle} \approx 5 \frac{\langle u'^2 \rangle}{U^2}. \quad (2.12)$$

Degrazia *et. al* [34], refere-se a um campo turbulento geofísico, caracterizado por um número de Reynolds da ordem de ($Re \approx 10^7$), como sendo típico na CLA.

A interpretação física de hipótese de Taylor 2.11, permite considerar as flutuações de velocidade no tempo, em um ponto fixo no espaço, criadas por um campo turbulento "congelado" movendo-se como um todo, como sendo, do ponto de vista estatístico, idênticas às flutuações de velocidade das flutuações em um dado instante ao longo do eixo dos x .

2.3 Estatística de Séries Temporais

Para cálculos de médias e outros momentos de ordem maiores, necessita-se de séries temporais que sejam longas o suficiente, para incluir todas as contribuições de baixas frequências, e amostradas a uma taxa rápida o suficiente para captar o máximo possível das contribuições de altas frequências.

¹Invariante frente à translações

A inadequada escolha do tempo de média e taxa de amostragem podem comprometer o cálculo estatístico envolvido. É necessário entender como estes dois fatores afetam as medidas, com objetivo de tomar as decisões sobre o tempo e frequência de coleta de uma amostra [19].

2.3.1 Escolha do tempo de média

Quando efetuarmos o cálculo do valor médio de uma quantidade $f(t)$, sobre um intervalo de tempo T , então a variância ($\sigma_{\bar{f}(t)}^2$) no ensemble (conjunto) deve convergir para um valor estável quando $T \rightarrow \infty$. (Para um caso mais geral observe o Apêndice A).

$$\sigma^2 = \overline{\left[\frac{1}{T} \int_0^T f(t + \xi) d\xi - \overline{f(t)} \right]^2} \rightarrow 0 \text{ quando } T \rightarrow \infty, \quad (2.13)$$

onde a barra representa a média sobre o ensemble. A expressão acima pode ser reescrita como:

$$\sigma^2 = \overline{\frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T f(t + \xi_1) f(t + \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 - \frac{2}{T} \overline{f(t)} \int_0^T f(t + \xi) d\xi - \overline{f(t)}^2}, \quad (2.14)$$

podemos agora rearranjá-la, obtendo a seguinte expressão:

$$\sigma^2 = \overline{\frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T f(t + \xi_1) f(t + \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 - \overline{f(t)}^2}. \quad (2.15)$$

Introduzindo a função de autocorrelação 2.9 da seguinte forma,

$$R(\xi_1 - \xi_2) = \frac{\overline{f(t + \xi_1) f(t + \xi_2)} - \overline{f(t)}^2}{\overline{f'^2}}, \quad (2.16)$$

substituindo os termos dentro da integral em 2.15 pela expressão 2.16, obtemos:

$$\sigma^2 = \frac{\overline{f'^2}}{T^2} \int_0^T \int_0^T R(\xi_1 - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = \frac{\overline{f'^2}}{T^2} \int_0^T \int_{-\xi_1}^{T-\xi_1} R(\xi) d\xi d\xi_1, \quad (2.17)$$

que pode ainda ser reescrita como:

$$\sigma^2 = \frac{\overline{f'^2}}{T^2} \left[(T + \xi) R(\xi) d\xi + \int_0^T (T - \xi) R(\xi) d\xi \right] = 2 \frac{\overline{f'^2}}{T^2} \int_0^T \left(1 - \frac{\xi}{T} \right) R(\xi) d\xi. \quad (2.18)$$

Quando $T \rightarrow \infty$, a expressão 2.18 se torna:

$$\sigma^2 = 2 \frac{\overline{f'^2}}{T^2} \int_0^T R(\xi) d\xi. \quad (2.19)$$

O argumento de estacionariedade estatística de uma série temporal $f(t)$, necessita que as variâncias e covariâncias se aproximem de valores estáveis, à medida que o tempo de média aumenta. Isto implica que uma escala de tempo integral $\Gamma_{f(t)}$, para série temporal, deve existir.

A escala integral deve, todavia, depender da autocorrelação da variável $f(t)$, expressamos esta dependência como:

$$\Gamma_{f(t)} = \int_0^{\infty} R(\xi) d\xi. \quad (2.20)$$

Neste ponto, podemos substituir o último termo em 2.19 pela escala de tempo integral 2.20, obtendo a variância no ensemble como:

$$\sigma^2 \simeq 2 \frac{\overline{f'^2}}{T} \Gamma_{f(t)}. \quad (2.21)$$

Observando a expressão 2.21, fica evidente o fato de que $\sigma^2 \rightarrow 0$ quando $T \rightarrow \infty$.

O significado físico, associado à esta escala de tempo integral 2.20, está relacionado ao tempo em que a variável mantém sua "memória" em relação a um instante anterior, ou seja, é o tempo em que existe forte correlação entre as medidas.

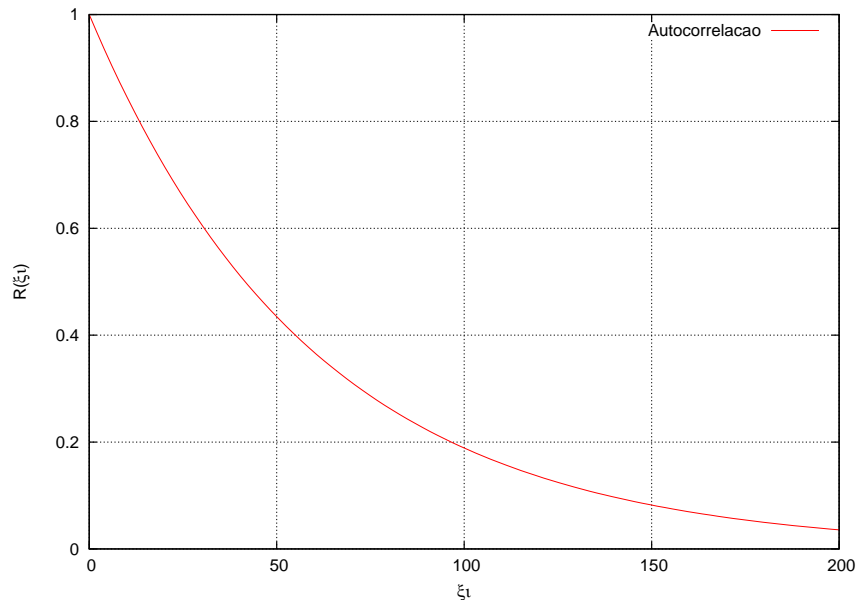


Figura 1: Função de autocorrelação.

Na figura 1, que representa uma função de autocorrelação exponencial, é possível entender seu significado físico observando que, para $\xi = 0$ a variável observada apre-

senta correlação máxima, ao passo que para $\xi > 200$ s, a variável "perdeu a memória"². A escala integral pode ser aproximada pela área sob a curva $R(\xi)$, assim, a variância calculada em 2.21, só tem significado se existir tal memória, e, que esta seja finita.

Podemos estimar o intervalo de tempo (janela) necessário para que o erro seja inferior ao aceitável, ou seja para que não exceda o valor $\epsilon = \frac{\sigma}{f(t)}$ por:

$$T \simeq 2 \frac{\sigma^2 \Gamma_{f(t)}}{f(t)^2 \epsilon^2}. \quad (2.22)$$

De maneira prática, para estimarmos o tempo adequado para o cálculo da média temporal, utilizando 2.22, devemos substituir a variância no ensemble pela variância temporal, fazendo uso da hipótese ergódica (Kaimal e Finnigan, 1994), conforme definição na seção 2.3.2. Para valores típicos de $\sigma_u = 1$ m/s, $\Gamma_u = 10$ s e $\bar{u} = 5$ m/s, e especificando $\sigma_{\bar{u}} = 0.1$ m/s, por exemplo, para um erro $\epsilon = 0.02$, obteremos $T=2000$ s $\simeq 30$ min.

Aumentando o período T de média, ϵ ainda continua em níveis inexpressíveis, porém, com períodos de 1 hora ou mais, podemos esperar erros da ordem de 3,5-5 % para valores de σ_w^2 e $\overline{(w'\theta')}$ e, para $\overline{(v'w')}$, da ordem de 10 – 50 %, em medidas próximas à superfície [16].

2.3.2 Média de Reynolds

As equações de Reynolds, muito denominadas na literatura por *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), contituem a base matemática nas equações de estudos da dinâmica atmosférica (Silvestrini *et. al*, 2004) [34].

Antes da apresentação da formulação do processo de média de Reynolds, é necessário termos em mente algumas definições importantes sobre os processos aleatório na CLA, os quais serão severamente assumidos como condições necessárias, na teorização dos cálculos sobre fluxos e espectros.

Tais definições seguem:

1. **Turbulência Estacionária:** Um processo físico que pode ser representado por uma série numérica é dito estacionário quando seus valores médios não variam com o tempo, isto é, são invariantes ante uma translação no tempo;

²As medidas estão descorrelacionadas, ou sua correlação é desprezível.

2. **Turbulência Homogênea:** Um processo físico é dito homogêneo quando seus valores médios não se modificam com a posição, isto é, são invariantes ante uma translação no espaço, por exemplo: escoamentos uniformes.;
3. **Turbulência Isotrópica:** A turbulência é dita isotrópica quando os seus valores médios independem da direção, isto é, são invariantes ante rotações. Por exemplo: as intensidades da turbulência são equivalentes em todas as direções,

$$\langle u_x'^2 \rangle = \langle u_y'^2 \rangle = \langle u_z'^2 \rangle. \quad (2.23)$$

É visível, neste caso, que a turbulência independe da direção. Para isto ser possível, o tamanho dos vórtices deve ser pequeno, pois somente pequenos vórtices podem ser isotrópicos. Grandes vórtices sofrem o efeito do cisalhamento do escoamento principal e de vórtices vizinhos, produzindo assim, através desse constante processo de deformação e divisão, intensidades de turbulência diferentes nas direções ortogonais;

4. **Processo Ergódico:** Um dado processo físico é dito ergódico quando seus valores médios independem da amostragem (realização) (Brendat e Pierzol, 1986) [6]. Em particular, a hipótese de ergodicidade, permite considerar que as médias de conjunto $\langle [\cdot] \rangle$ (ensemble) possam ser avaliadas através de médias no tempo $\overline{[\cdot]}$,

$$\langle A \rangle \equiv \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.24)$$

se o processo for também estacionário, ou através de médias numa direção homogênea, se o processo é estatisticamente homogêneo nessa direção (Lesieur, 1997) [24].

Em operações de análise de turbulência, tais como a derivação de equações de fluxo, ou fluxos turbulentos, é necessário se isolar as escalas de movimento, por exemplo, através de medidas de uma grandeza A, sobre um período de 30 minutos, pode-se determinar os valores médios dos desvios positivos e negativos da porção turbulenta em torno da média, Stull (1998) [35].

Com intuito de obter estas flutuações, Reynolds propõe que uma variável seja composta em uma parte média e outra parte flutuante (turbulenta) [35], conforme a expressão:

$$A(t) = a'(t) + \langle A \rangle. \quad (2.25)$$

A expressão 2.25, é comumente citada na literatura como *Decomposição de Reynolds*.

O argumento de Reynolds permite, ao coletarmos dados experimentalmente, decompor o sinal, revelando sua flutuação em torno do seu valor esperado.

Geralmente, é utilizado um operador, denotado por uma barra superior, que simbolizando a Média calculada utilizando a decomposição de Reynolds:

$$\overline{A(t)} = \overline{a'(t) + \langle A \rangle} \quad (2.26)$$

A expressão 2.26, é comumente descrita na literatura como *Média de Reynolds*.

Todas as regras estatísticas definidas na seção 2.1, podem, sem perda de generalidade, ser aplicadas às novas variáveis.

Este operador possui certas propriedades:

- i. A média da flutuação é nula ($\overline{w'} = 0$);
- ii. A correlação entre a flutuação e quantidades médias é nula ($\overline{w'\bar{\theta}} = 0$);
- iii. A média de uma média é igual a própria média ($\overline{\bar{w}} = \bar{w}$);
- iv. A derivação espacial e temporal comutam com o operador média:

$$\frac{\partial \overline{w}}{\partial x_i} = \overline{\frac{\partial w}{\partial x_i}}; \quad \frac{\partial \overline{w}}{\partial t_i} = \overline{\frac{\partial w}{\partial t_i}}$$

A literatura [19] indica que quando se calcula fluxo, por correlação vórtica, geralmente fazemos $\overline{w'\theta'} = \overline{w_i\theta_i} - \bar{w}\bar{\theta}$, e negligenciamos os termos $\overline{w'\bar{\theta}}$ e $\overline{\bar{w}\theta'}$, que por definição (ii), são nulos se a barra superior representar a Média de Reynolds.

Se espera que somente médias sobre ensemble obedeçam, precisamente, as regras da Média de Reynolds, embora na prática sempre usamos médias temporais, fazendo uso da hipótese ergódica A.5, que diz que a média temporal pode ser assumida como média sobre ensemble.

Stull [35], diz que se a turbulência for homogênea e estacionária, pode-se fazer uso da hipótese ergódica.

Kaimal [19], alerta que, caso a série temporal não seja estaticamente estacionária sobre relevante escala de tempo, a condição ergódica deve ser aplicada com cautela.

2.4 Método de Covariância dos Vórtices

Técnicas micrometeorológicas como o Método de Covariância dos Vórtices (**MCV**), têm se mostrado eficazes para a monitorização das trocas gasosas e de escalares entre a biosfera e a atmosfera (Moncrieff *et al.*, 1997a) [27].

Atualmente, o método mais utilizado para estimar as trocas turbulentas na CLA, é a MCV ou, comumente conhecida na literatura como *Eddy Covariance*, a qual através da amostragem dos movimentos ascendentes e descendentes (que transportam escalares específicos), determina a diferença líquida destes escalares através de uma interface. Na prática, é desejável que esta tarefa seja acompanhada por uma análise da evolução temporal da densidade do escalar associado ao fluxo medido (Dennis D. Baldocchi, 2003) [4].

Para entender melhor as trocas gasosas e escalares, vamos fazer uma pequena digressão sobre algumas expressões e conceitos físicos importantes.

A equação de conservação de um escalar é dada por (Aubinet *et al.*, 1998) [2]:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_s}{\partial z} = S + D. \quad (2.27)$$

Onde ρ_s é a massa específica do escalar, u , v , e w são as componentes da velocidade do vento, na direção dominante no plano horizontal (x), direção lateral no plano horizontal (y), e normal à superfície (z) respectivamente. S é o termo que representa a fonte/sumidouro e D é difusão molecular. Aplicando à u , v , e w a decomposição de Reynolds, em que cada uma das componentes é decomposta numa componente média e numa flutuação, por exemplo:

$$x_i = \bar{x}_i + x'_i; \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.28)$$

A integração ao longo de z e assumindo ausência de fluxos horizontais divergentes, levam a uma alteração da expressão 2.27 para:

$$\underbrace{\int_0^{h_m} S dz}_I = \underbrace{\int_0^{h_m} \overline{w' \rho'_s} dz}_{II} + \underbrace{\int_0^{h_m} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial t} dz}_{III} + \underbrace{\int_0^{h_m} \bar{u} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial x} dz}_{IV} + \underbrace{\int_0^{h_m} \bar{v} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial y} dz}_V + \underbrace{\int_0^{h_m} \bar{w} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial z} dz}_{VI} \quad (2.29)$$

Onde:

I representa o termo de transferência do escalar proveniente da fonte (sumidouro).

II representa o fluxo correspondente à covariância turbulenta a uma altura h_m .

III representa o armazenamento (acumulação) do escalar abaixo de h_m .

IV – *V* representam as advecções horizontais do fluxo.

VI representa a advecção vertical do fluxo.

Em condições de estacionariedade atmosférica e homogeneidade horizontal, os termos *III* – *VI* da expressão 2.29 podem ser desprezados, e o termo de covariância (que representa o fluxo) pode ser igualado ao termo correspondente à fonte/sumidouro.

O termo de advecção horizontal (*IV*) é significativo quando existe um gradiente horizontal do escalar, ou seja, em terreno heterogêneo ou à noite em terrenos de declive significativo, por exemplo quando o CO_2 proveniente da respiração do ecossistema é drenado.

A velocidade vertical (w) e conseqüentemente a advecção vertical (*V*) são tipicamente nulas sobre culturas baixas, contudo, tal evidência não se verifica sobre vegetações elevadas, Lee (1998) [21] e Baldocchi *et al.* (1998) [3] sugerem que este mecanismo não pode ser negligenciado, podendo inclusive ser mais importante que o transporte turbulento durante os períodos noturnos e calmos.

O MCV, é uma técnica que permite calcular o fluxo de um escalar pretendido, usando a covariância entre as flutuações da velocidade do vento e as flutuações da concentração do escalar.

A vantagem deste método em relação a outros, por exemplo o método aerodinâmico, é a de permitir leituras mais diretas, sem a necessidade de medidas de valores da velocidade horizontal do escoamento atmosférico, da rugosidade da superfície ou da distância relativamente ao solo a que são feitas as medições.

Outra vantagem é a possibilidade, através de medições diretas, armazenar os dados na sua forma bruta, para pós processamento.

A turbulência cria vórtices na atmosfera que se movem constantemente. Estes vórtices são os principais responsáveis pelo transporte das propriedades desse volume de ar. Todas as propriedades atmosféricas mostram períodos curtos de flutuações em torno do seu valor médio a longo termo. Pode-se assim decompor qualquer propriedade pela soma algébrica entre seu valor médio no tempo e a sua flutuação, ou desvio instantâneo da média conforme a expressão 2.28.

O fluxo vertical médio de uma propriedade S é dado por:

$$S = \overline{(\bar{w} + w')(\bar{s} + s')}. \quad (2.30)$$

Expandindo as multiplicações em 2.30:

$$S = \overline{\bar{w}\bar{s}} + \overline{\bar{w}s'} + \overline{w'\bar{s}} + \overline{w's'}. \quad (2.31)$$

A expressão 2.31 ainda pode ser muito simplificada, utilizando-se das propriedades da média de Reynolds.

Pode-se ainda desprezar o termo que envolve a velocidade média vertical, pois em terrenos uniformes e após a aplicação da Rotação 3D, conforme seção 2.5.1, a média da componente vertical da velocidade é induzida a ser nula.

A expressão 2.31 pode ser então, simplificada, ser escrita como:

$$S = \overline{w's'} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w'_k s'_k, \quad (2.32)$$

onde N é o número de amostras.

Então, o fluxo vertical de uma propriedade da CLA turbulenta, pode ser entendido como o produto da sua viscosidade turbulenta pelo seu gradiente vertical, isto é, a sua habilidade para transferir essa propriedade, convertida nas unidades convenientes de fluxo. (Fazer demonstração como apendice $F\bar{\rho}\vec{U} \rightarrow \rho_z w' s' \dots$)

Segundo (McMillen, 1988), pode-se, de uma maneira geral, definir o fluxo total médio, F_{tot} , de uma quantidade atmosférica, U , incluindo os termos advectivos, como:

$$F_{tot} = \frac{1}{T} \int_0^T v \Phi dt \quad (2.33)$$

onde v é o vento médio e T é o tempo de média. A quantidade escalar Φ deve ser uma componente do *momentum*, calor sensível ou latente, ou densidade de um poluente.

O fluxo advectivo, F_{ad} , na direção da linha media local de escoamento, é definido como:

$$F_{ad} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T v dt \right] \left[\frac{1}{T} \int_0^T \Phi dt \right] = \bar{v}\bar{\Phi}, \quad (2.34)$$

o produto da média da velocidade do vento e a media de Φ para o período de média T . A diferença entre F_{tot} e F_{ad} é o fluxo turbulento, F_{turb} , de Φ . A componente de F_{turb} normal à superfície da linha média de escoamento local, é o desejado fluxo turbulento vertical.

Usando esta definição, o conceito de fluxo turbulento deve ser associado com o transporte entre as superfícies de linhas médias de escoamentos. Na prática, é usual expressar as integrais por somatórios

$$F_{turb} = \frac{1}{N} \sum (v - \bar{v})(\Phi - \bar{\Phi}) = \frac{1}{N} \sum v' \Phi' \quad (2.35)$$

onde N é o número de medidas no tempo de média T , as barras denotam valores médios e v' e Φ' são desvios da média, também chamadas flutuações. A quantidade F_{turb} é, por definição, a covariância de v e Φ .

2.5 Tratamentos

Para obtermos informações físicas consistentes sobre a dinâmica da atmosfera próxima à superfície, CLA, ao utilizarmos um conjunto de dados adquiridos experimentalmente, é necessário que se apliquem alguns tratamentos nesses dados. Por exemplo, o comportamento "tendencioso" que existe em uma série turbulenta de temperatura, que necessita ser minimizado para satisfazer as condições estatísticas de estacionariedade.

Vários métodos de remoção da tendência de séries têm sido propostas pela literatura, por exemplo (Lloyd *et al.*, 1984; McMillen, 1988; Gash e Culf, 1996; Deholm-Price e Rees, 1997; *apud* Franceschi, 2003). Os filtros são aplicados antes de proceder ao cálculo espectral através da Transformada de Fourier. Baldocchi (2003) [4] indica que a MCV tem sido o método mais utilizado, porém têm suas limitações, uma delas se refere ao caso de condições de não estacionariedade. A necessidade, da condição de estacionariedade em uma série temporal, para estimativa mais precisa dos fluxos calculados utilizando MCV, geralmente é suprida através do uso de procedimentos de filtragem. Estes procedimentos suprimem os efeitos da não estacionariedade, tipicamente causada pelos eventos com escalas de tempo além da janela de 30 min, comumente utilizada em estudos atmosféricos, Franceschi (2003) [11].

Estes tratamentos devem seguir procedimentos bem determinados, como se mostra a seguir, através de algumas técnicas como rotação 3D, média móvel, alisador tipo sino gradual e filtros digitais recursivos.

2.5.1 Rotação 3D

Comumente, observa-se um significativo erro no cálculo das covariâncias, resultantes da MCV, devido à inapropriada orientação do sensor, reportado por diversos pesquisadores como (Pond, 1968; Kaimal e Haugen, 1969; e Dyer e Hicks, 1972). Estes erros variam de 8% à mais de 100% por grau de desalinhamento.

Geralmente os anemômetros estão montados na extremidade de hastes horizontais, afastados suficientemente do corpo da torre, para minimizar a distorção do fluxo, causado pelo corpo da mesma. Porém os erros associados ao movimento (balanço) da haste, representa um grande problema.

Outro problema, que exige tratamento posterior, é o fato de que, mesmo os sensores estando corretamente na posição vertical, a linha média de escoamento pode não ser perfeitamente horizontal, em consequência da obstrução por outros sensores, torre ou a topografia do terreno ser irregular (inclinada por exemplo).

Fatores como estes, tornam a medição direta dos fluxos verticais em sítios não ideais ³ uma prática tradicionalmente considerada difícil [26].

Em geral, a estimativa das covariâncias, com cada uma das três componentes (u , v e w) da velocidade do vento, é calculada utilizando ferramentas computacionais que permitam a rotação de coordenadas, das covariâncias, no final do período de média, conforme descrito por (Wesley, 1970; *apud* [26]).

A rotação de coordenadas, alinha o sistema de coordenadas com a linha média de escoamento local, efetivamente removendo o Fluxo Advectivo representado na equação 2.34 do Fluxo Total representado na equação 2.33.

Na prática, a Técnica de Rotação Tridimensional (R3D) de coordenadas, que minimiza os erros devido ao desalinhamento dos sensores de velocidade vertical do vento, em relação à linha média de escoamento, é aplicada efetuando a rotação 3D do tensor de stress e o vetor vento médio $\vec{U} = \overline{u}_i + \overline{v}_j + \overline{w}_k$, no final de cada período de média.

Os ângulos das rotações, são determinados pelas componentes do vetor vento médio, que é uma função do período de média [19].

As coordenadas são inicialmente rotadas de maneira que a componente após a primeira rotação, \overline{v}_{R1} , seja anulada. $R1$ denota primeira rotação, matematicamente isto é:

³Terreno uniforme, plano.

$$\begin{aligned}\bar{u}_{R1} &= \bar{u}_1 \cos \theta_1 + \bar{v}_1 \sin \theta_1 \\ \bar{v}_{R1} &= \bar{v}_1 \cos \theta_1 - \bar{u}_1 \sin \theta_1 \\ \bar{w}_{R1} &= \bar{w}_1\end{aligned}$$

onde:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{v}_1}{\bar{u}_1} \right)$$

é o ângulo da primeira rotação.

A Segunda rotação, força a componente vertical média após a segunda rotação, \bar{w}_{R2} ser anulado:

$$\begin{aligned}\bar{u}_{R2} &= \bar{u}_{R1} \cos \theta_2 + \bar{w}_{R1} \sin \theta_2 \\ \bar{v}_{R2} &= \bar{v}_{R1} \equiv 0 \\ \bar{w}_{R2} &= \bar{w}_{R1} \cos \theta_2 - \bar{u}_{R1} \sin \theta_2\end{aligned}$$

onde

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{w}_{R1}}{\bar{u}_{R1}} \right)$$

é o ângulo da segunda rotação.

Estas duas rotações simplesmente alinham o eixo \vec{u}_i com o vetor vento médio, \vec{U} .

Neste ponto, somente o eixo \vec{u}_i é fixado, e os eixos \vec{v}_j e \vec{w}_k são livres para rotar em torno de \vec{u}_i .

Três métodos de posicionamento de \vec{v}_j e \vec{w}_k são geralmente possíveis de serem adotados:

1. \vec{w}_k pode ser posicionado de modo que o plano $\vec{w}_k - \vec{v}_j$ seja tangente à geopotencial vertical;
2. \vec{w}_k pode ser posicionado de forma que o plano $\vec{w}_k - \vec{v}_j$ seja perpendicular ao plano da superfície do terreno;
3. Forçar a anulação da covariância, $\overline{v'w'} = 0$

Quando o método **3** for utilizado, a flutuação w' corresponderá ao vetor normal à linha média de escoamento, mais eficientemente do que à geopotencial, mas a diferença angular entre o eixo \vec{w}_k e a geopotencial geralmente é menor do que 5° e as correções no cosseno são ignoradas, porquê erros em inclinações de até 10° são inferiores à 10% [26].

O eixo \vec{w}_k também pode ser perpendicular à superfície local, porém, se o terreno

for complexo, apresentando inclinação superficial considerável, ele deve ser perpendicularizado à linha média de escoamento, a qual é mais paralela à superfície do terreno na direção do escoamento.

Segundo McMillen [26], a terceira rotação deve ser aplicada com cautela, uma vez que esta não é bem definida, especialmente em condições de pouco vento (ou ventos com baixa velocidade). A rotação deve ser limitada a 10° . Se o ângulo, calculado para a terceira rotação, exceder á 10° , a rotação é omitida.

Kaimal [19], define a terceira rotação por:

$$\begin{aligned}\bar{u}_{R3} &= \bar{u}_{R2} \\ \bar{v}_{R3} &= \bar{v}_{R2} \cos \theta_3 + \bar{w}_{R2} \operatorname{sen} \theta_3 \\ \bar{w}_{R3} &= \bar{w}_{R1} \cos \theta_3 - \bar{v}_{R2} \operatorname{sen} \theta_3\end{aligned}$$

onde

$$\theta_3 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\bar{v}_{R2}\bar{w}_{R2}}{(\bar{v}_{R2}^2 - \bar{w}_{R2}^2)} \right]$$

2.5.1.1 Média Móvel

Um procedimento usual em análise de séries temporais com tendência, consiste na aplicação de *filtros lineares*.

Um *filtro linear* converte uma série x_t em outra y_t através da operação linear:

$$y_t = \sum_{j=-q}^s a_j x_{t+j}, \quad (2.36)$$

onde a_j é um conjunto de pesos.

Quando se quer fazer uma estimativa da média local, os pesos deve ser tais que:

$$\sum_{j=-q}^s a_j = 1, \quad (2.37)$$

o que garante a condição de $\min x_t < y_t < \max x_t$.

Quando a condição 2.37 é satisfeita, a expressão 2.36 é chamado *Média Móvel*.

Na maior parte dos casos, as médias móveis são simétricas, ou seja $s = q$ e $a_{-r} = a_r$. Por exemplo, assumindo $s = q = 2$, e fazendo a expansão dos termos de 2.36, se obtém:

$$y_t = a_2 x_{t-2} + a_1 x_{t-1} + a_0 x_t + a_1 x_{t+1} + a_2 x_{t+2}. \quad (2.38)$$

Segundo Ehlers (2004) [10], o mais simples dos casos é quando todos os pesos a_j tem o mesmo valor, e, devido à condição 2.37 resulta que $a_j = \frac{1}{2q+1}$, para $j = -q, \dots, q$. Casos deste tipo implicam num filtro suavizador de x_t que pode ser expresso como:

$$y_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{t+j}. \quad (2.39)$$

Uma desvantagem (em alguns casos) do filtro simétrico, é o fato dos valores suavizados serem calculados apenas para $t = q+1, \dots, n-q$, assim, a nova série suavizada irá conter $n - 2q$ valores.

De acordo com Kaimal e Finnigan (1994), a média móvel, geralmente é utilizada como filtro antes de aplicarmos as propriedades de Média de Reynolds.

Em muitas situações, a média móvel (filtro passa-baixa), é aplicada à série temporal para subestimar os ruídos de fundo. A série filtrada pela média móvel é então subtraída do sinal original, resultando as flutuações.

Devemos observar que os termos $\overline{w'\theta}$ e $\overline{w\theta'}$ (a barra inferior significa quantidades da média móvel) não necessariamente se anulam, porque $\underline{w'}$ e $\underline{\theta'}$ podem não ter médias nulas, e \underline{w} e $\underline{\theta}$ têm energia espectral sobre uma banda finita. Assim, os espectros de $\underline{w'}$ e $\underline{\theta}$, por exemplo, podem se sobrepor na região onde os filtros passa-alta e passa-baixa também se sobrepõem. Como resultado, podemos assumir $\overline{w'\theta} = 0$ somente se um *gap* espectral existir em w ou θ , na região onde os dois filtros se sobrepõem. Os mesmo comentários se aplicam no cálculo das variâncias, desde que, pelo mesmo argumento, $\overline{w'w}$ e $\overline{\theta'\theta}$ não sejam nulos.

Estas considerações são importantes, se os momentos calculados desta forma, forem usados nos cálculos de balanço, que são baseados nas equações derivadas pela Média de Reynolds. Sakai (2000) [32] utilizou média móvel centrada Cf. 2.39, com $s = q = N/2$ para estimativa de fluxos, obtendo a seguinte expressão para o filtro:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N+1} \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} x_j \quad (2.40)$$

onde \bar{x}_i é o valor filtrado, e x_j é o sinal bruto (original) centrado no intervalo $[-N/2, N/2]$ onde é efetuada a média.

A Tabela 1 representa um esquema de uma média móvel, calculada com $N = 5$, centrada em $x_j = 3$. O ponto inferior $-N/2 \equiv 1$ e ponto superior $N/2 \equiv 5$, englobam

o intervalo, $[-N/2, N/2]$, para cálculo da média.

Tabela 1: Esquema de média móvel para $s = q = 2$.

Série Original	Média Móvel	Flutuação
1	-	$x'_1 = x_{j1} - \sum_1^5$
2	-	$x'_2 = x_{j2} - \sum_2^6$
x_{j1}	\sum_1^5	$x'_3 = x_{j3} - \sum_3^7$
x_{j2}	\sum_2^6	$x'_4 = x_{j4} - \sum_3^7$
x_{j3}	\sum_3^7	$x'_5 = x_{j5} - \sum_3^7$
x_{j4}	\sum_4^8	
x_{j5}	\sum_5^9	
8		
9		

É importante notar também, que a remoção de tendência por média móvel, causa a redistribuição espectral da energia de maneira indesejável, necessitando uma adicional correção espectral. Esta correção, através da Função de Transferência espectral, pode ser encontrada em (Kaimal *et al.*, 1968).

Existem situações, em que se deseja obter os valores suavizados até um período $n = t$. Nestes casos, a alternativa é a utilização de um filtro *assimétrico*, que usa apenas os valores atual e passados de x_t , esta técnica é conhecida como *alisamento exponencial*, onde os valores suavizados são dados por:

$$y_t = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha(1 - \alpha)^j x_{t-j}, \quad (2.41)$$

onde $0 < \alpha < 1$. Os pesos $\alpha(1 - \alpha)^j$ decaem geometricamente com j , embora as observações passadas sejam usadas no filtro.

2.5.1.2 Removedor Linear de Tendência

Esta técnica de filtragem de dados é conhecida, comumente, na literatura como *Linear Detrend (LD)* ou *Trend Removal*, que daqui em diante será referida por **RLT**.

Na RLT, as flutuações são calculadas como desvios de um valor médio específico.

Este valor médio é dado por uma curva de ajuste linear (pode-se chamar regressão linear) do tipo:

$$X_t = S_t + I, \quad (2.42)$$

sobre um período $T = N_i \delta t$, o ângulo de regressão S e a intersecção I , são determinados

pelas seguintes expressões:

$$S = \frac{N_i \sum t x_t - \sum t \sum x_t}{N_i \sum t^2 - (\sum t)^2}, \quad (2.43)$$

$$I = \frac{\sum x_t - S \sum t}{N_i}, \quad (2.44)$$

onde $t = i\delta t$ e o somatório é executado sobre $i = 1, \dots, N_i$

Uma vantagem da técnica RLT, é que os efeitos da complexidade topográfica do terreno e despresíveis condições de não estacionariedade, podem ser parcialmente atenuados com este método (McMillen, 1988; Grelle and Lindroth, 1996; Moncrieff *et al.*, 1997; Weidinger *et al.* 1999; *apud* Barcza, 2001) [5], enquanto estes problemas não podem ser detectados facilmente nos cálculos de perfis dos fluxos.

A realização de testes sensitivos (com dados de 3 dias escolhidos aleatoriamente) para escolher a técnica de remoção de tendência, conforme Barcza *et al.* [5], mostrou que uma janela de 1000 s parece ser a mais apropriada para remoção da tendência. 1000 s é o limite máximo de tempo geralmente utilizado em sistemas de medidas localizados na parte inferior da camada superficial (McMillen, 1988).

Janelas com tempos menores podem causar a remoção de freqüências que contribuem para o transporte turbulento.

A remoção de tendência linear de cada série temporal de 60 min, dos dados usados para cálculos dos fluxos turbulentos (componentes de vento, temperatura, H_2O e CO_2) filtra o sinal para obter as flutuações necessárias para os cálculos dos fluxos turbulentos.

2.5.2 Filtro Digital Recursivo.

Outra técnica usada na tratamento de dados são os filtros digitais recursivos. Segundo Franceschi (2004) [12], a razão da utilização de filtros digitais recursivos, é a redução dos efeitos da não estacionariedade que, embora bem mais suprimida, permanece após a escolha adequada do período de média, porém, seu efeito já não é mais tão significativo.

2.5.2.1 FDR - McMillen

McMillen (1988), na tentativa de correção dos efeitos da não estacionariedade, utilizando procedimentos anteriormente empregados por Enochson e Otnes (1968; *apud* McMillen 1988), apresenta a formulação para um Filtro Digital Recursivo (**FDR**), com

uma especificada constante de tempo τ .

Este filtro FDR é análogo a um filtro resistivo-capacitivo, *Filtro-RC* ideal, permitindo o cálculo dos fluxos através das medidas analógicas em tempo real (*ou quase real*).

O FDR proposto por McMillen é expresso por:

$$Y_i = \alpha Y_{i-1} + (1 - \alpha)x_i \quad (2.45)$$

onde x_i é a amostra original no tempo t_i da série de dados, Y_i é o a amostra filtrada no tempo t_i , e α é definido por:

$$\alpha = \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right) \quad (2.46)$$

onde δt é intervalo de tempo entre cada medida e τ é a constante de tempo do filtro, em segundos.

A partir deste ponto, a média instantânea é obtida através do filtro passa-baixa 2.45.

As novas flutuações serão calculadas como $x'_i = x_i - Y_i$.

2.5.2.2 FDR - por Franceschi e Zardi

Franceschi e Zardi [11], com base nos conceitos da análise de séries, em particular nas Funções Transfêrncia (Mitra, 1998; *apud* Franceschi, 2003), sugerem uma correção, de 2.45, através da inserção de uma freqüência de corte adimensional:

$$\omega_c = 2\pi \frac{\delta t}{\tau}, \quad (2.47)$$

e uma correção na definição de 2.46:

$$\alpha = 2 - \cos \omega_c - \sqrt{\cos^2 \omega_c - 4\cos \omega_c + 3} \cong 1 - \omega_c \quad (2.48)$$

substituindo 2.47 no último termo de 2.48 obtemos:

$$\alpha = 1 - 2\pi \frac{\delta t}{\tau} \quad (2.49)$$

Com estas modificações, é levado em conta o efeito do fenômeno conhecido como *Atraso de Fase*(Stull, 1998) [35], de maneira a compensar o retardo temporal sistemático na amostra em que se está efetuando a média, com relação à série temporal

Tabela 2: Lista de valores para a escala de tempo τ , comumente adotadas em filtros digitais recursivos.

Autor	Constante de Tempo τ
McMillen (1988)	200 s
Rannick (1988)	200 s
Sakai (2000)	200 s
Baldocchi et al. (2000a)	400 s
Baldocchi et al. (2000b)	400 s
Janssens et al. (2001)	50 s
Lamaud et al. (2001)	200 s
Baldocchi et al. (2001)	400 s
Sakai et al. (2002)	200 s
Franceschi et al. (2003)	300 s

Fonte: Franceschi 2004 [12], em parte.

original. Isto poderia levar a uma super estimativa das flutuações, (Horst, 2000 *apud* Franceschi, 2003).

De maneira análoga ao algoritmo de McMillen, as componentes turbulentas serão calculadas como:

$$x'_i = x_i - Y_{i+N}. \quad (2.50)$$

onde N é deslocamento de fase em número de pontos:

$$N = \frac{1}{\omega_c} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \operatorname{sen} \omega_c}{1 - \alpha \operatorname{sen} \omega_c} \right). \quad (2.51)$$

Uma ponto controverso, que ainda tem merecido bastante atenção, é a questão da escolha adequada para a escala de tempo do filtro τ . O valor proposto inicialmente por McMillen (1988), após testes em conjuntos de dados adequadamente condicionados, foi de 200 s, porém não é muito claro o processo de escolha deste valor.

Rannick e Vesala (1999) [30] argumentam sobre a possibilidade se utilizar tempos maiores para τ , obtendo valores mais aceitáveis na estimativa dos fluxos, sugerindo $\tau = T/4$, sendo $T \approx 30 \text{ min}$.

Na tabela 2, a seguir, são apresentados alguns valores comumente empregados em diferentes estudos.

2.5.3 Alisador tipo Sino Gradual

Após o tratamento de remoção da tendência linear, a série temporal ainda apresenta espécies de "cantos" agudos em suas extremidades, resultando novamente em um *ruído vermelho*. Como solução para este problema, se deve forçar as extremidades da série, suavemente, tender à zero, utilizando o artifício matemático de alisar o início e o final da série temporal.

Este artifício consiste em multiplicar a série temporal por uma função apropriada, por exemplo, termos de seno ou cosseno quadrados. Um exemplo que pode ser utilizado [35] para sua expressão matemática é dada por:

$$W(k) = \begin{cases} \text{sen}(5\pi k/N) & 0 \leq k \leq 0.1N \\ 1 & \text{qualquer} \\ \text{sen}(5\pi k/N) & 0.9N \leq k \leq N \end{cases} \quad (2.52)$$

A expressão 2.52, por sua forma, é comumente conhecida na literatura como Alisador tipo Sino Gradual (**ASG**) *Smoother Bell Taper*.

Seu resultado é uma nova série modificada, na qual as flutuações têm amplitudes gradualmente alisadas nos primeiros e últimos 5% dos dados da série temporal original, conforme observa-se na (Figura 2).

Pode-se entendê-lo como uma *clássica* função tipo degrau, porém com seus cantos gradualmente alisados.

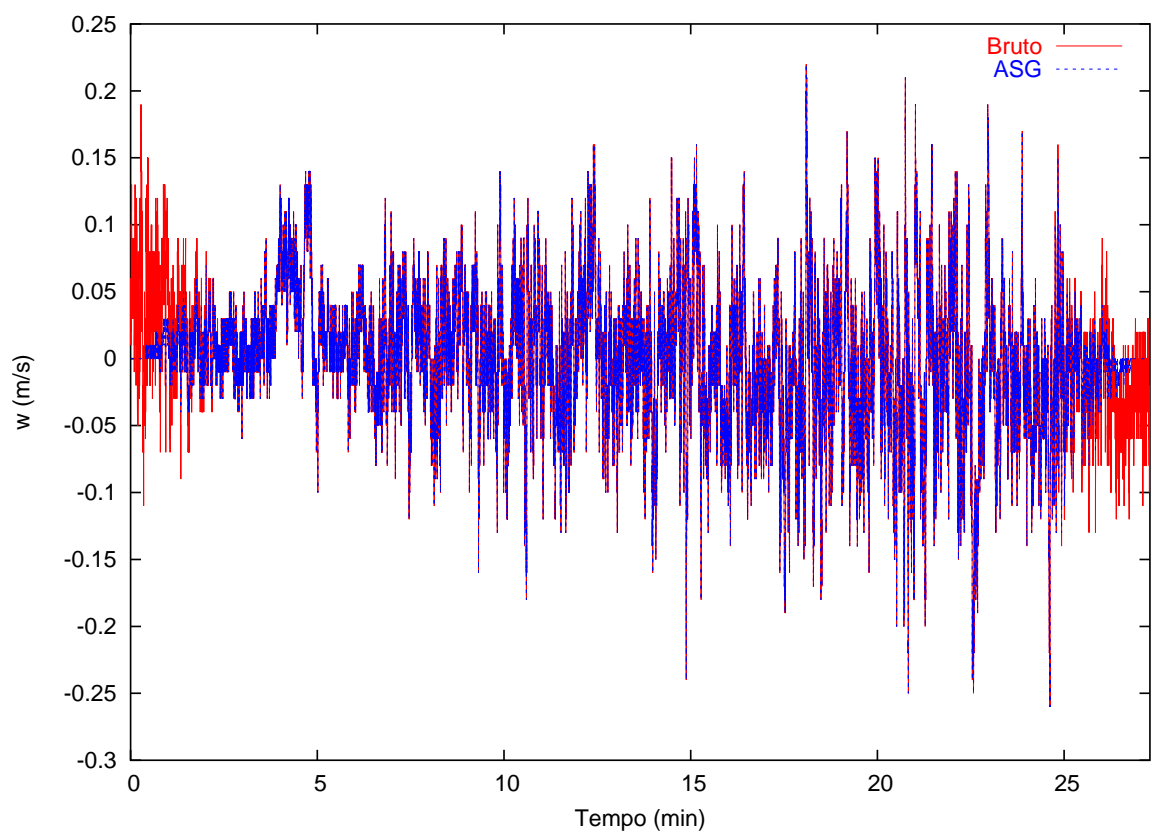


Figura 2: Exemplo de aplicação do filtro ASG numa série turbulenta de temperatura.

3 *Detalhes Experimentais*

3.1 Sítio Experimental

As informações contidas neste capítulo são superiores às necessárias para o trabalho desenvolvido nesta dissertação. Contudo, detalhar o sítio experimental nos permite ter uma idéia mais ampla do sítio e da estrutura das torres e equipamentos disponibilizados pelo projeto LBA-ECO.

Os conjunto de dados utilizados, desta dissertação, são partes do banco de dados do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera Amazônica (LBA-ECO).

As três torres de fluxos, do projeto LBA-ECO (floresta primária, sítio seletivo de extração de madeira e pastagem) na região de Santarém, estão localizadas no município de Belterra, próximo a confluência entre os rios Amazonas e Tapajós no estado do Pará. A torre micrometeorológica, da qual os dados desta dissertação foram coletados, está instalada à leste da Flona Tapajós e próxima ao quilômetro 77 da rodovia Santarém-Cuiabá (BR 163), nas coordenadas ($3^{\circ}10'7,82''S$; $54^{\circ}53'36,34''W$), (Figura 3), em uma área de pastagem com aproximadamente 500ha, (Figura 4), rodeada pelas florestas primária e secundária, com altura média da copa em 40 metros.

A torre dista aproximadamente 25 quilômetros do Rio Tapajós. A inclinação do terreno é de aproximadamente $4,8^{\circ}$ no sentido leste-oeste.

Na localidade, em 1989, a floresta foi clareada e o campo foi utilizado como pastagem, sendo coberto com plantação de grama da espécie *Brachiara Brizantha*, (figura 5), cerca de 80% das raízes deste tipo de grama restringem-se aos primeiros 30 centímetros de profundidade no solo, [15]. A densidade populacional de bovinos era de aproximadamente um animal por hectare.

No processo de introdução da plantação de arroz, a pastagem foi queimada no dia 14 de novembro de 2002, e nos dias que se seguiram o solo foi arado. No local, no dia 24 de fevereiro de 2002, foi plantado arroz da espécie *Oryza Sativa L.*, um tipo de arroz

Mapa Topografico SRTM

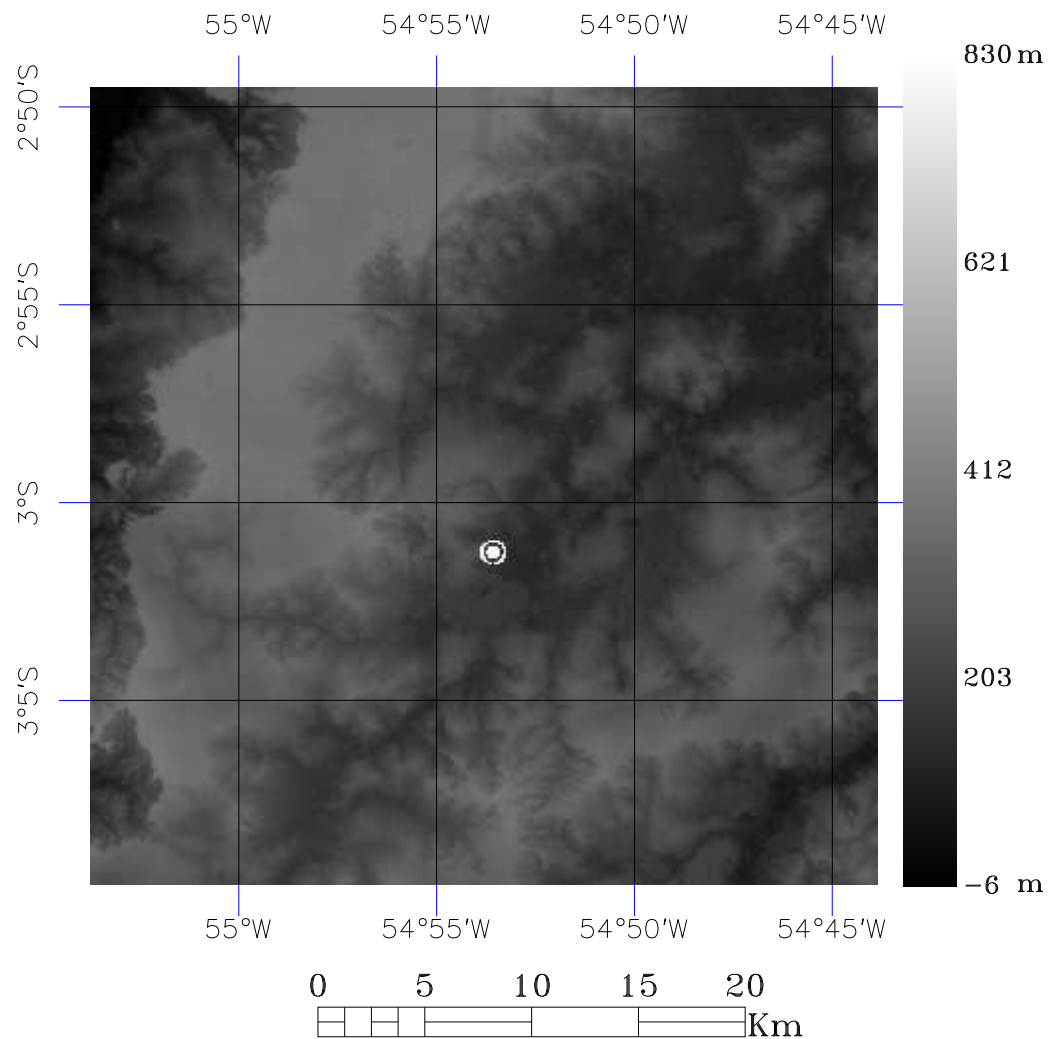


Figura 3: Imagem topográfica georeferenciada do local da torre onde foram coletados os dados. Satélite IKONOS, resolução 90 quilômetros.

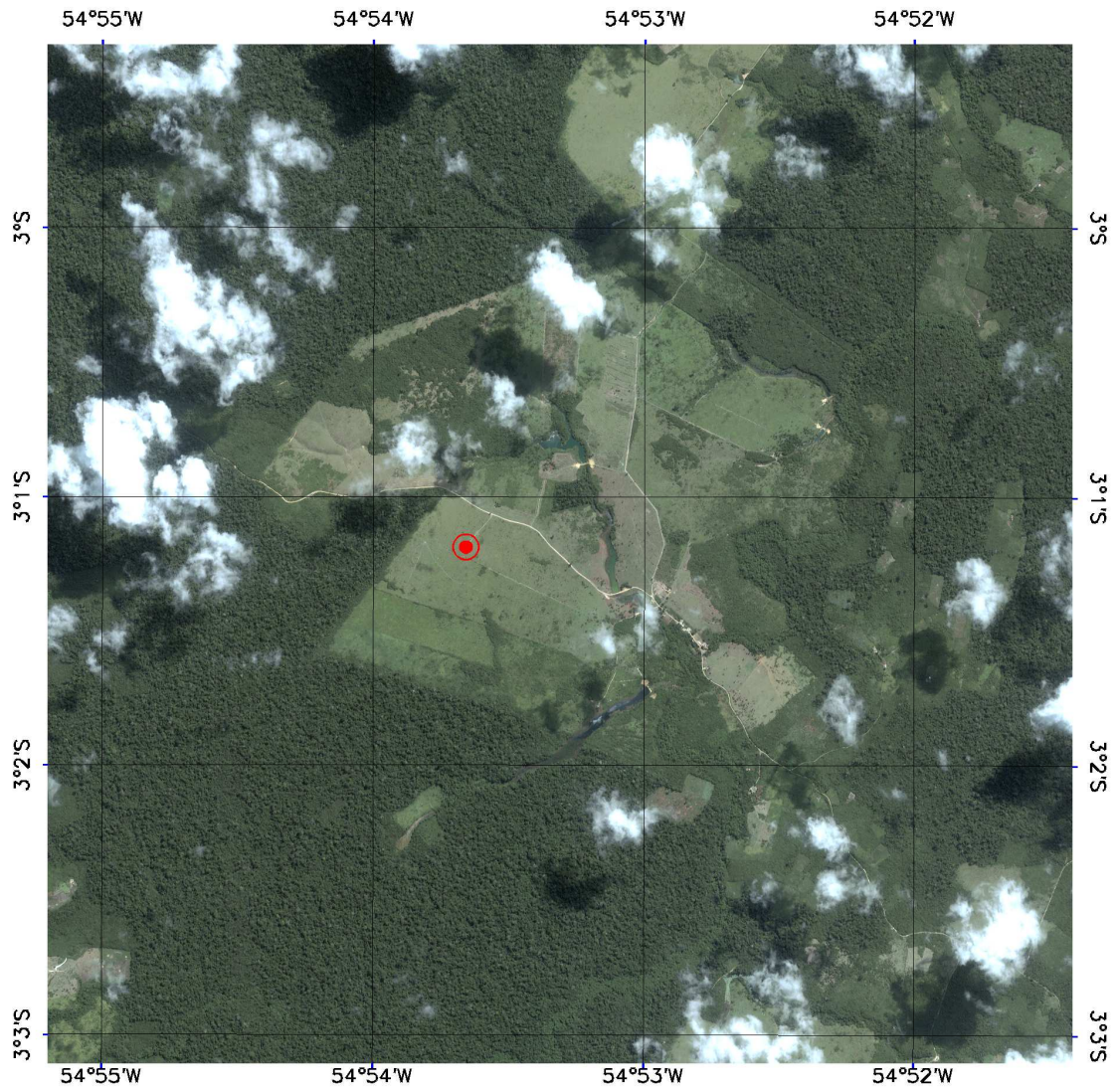


Figura 4: Imagem na faixa do visível, do local da torre onde foram coletados os dados, Satélite IKONOS.



Figura 5: Pastagem com grama da espécie *Brachiara Brizantha*.

não irrigado. O campo foi fertilizado duas vezes, uma tão logo o arroz nasceu e outra 60 dias após, quando as folhas começaram a aparecer. Em ambos os casos, 50Kg/ha de fertilizante à base de uréia (8% N, 28% P_2O_5 , 16% K_2O , 0,3% Zn) foram utilizados. O arroz foi ceifado nos dias 13 e 14 de Junho de 2002. Este sítio experimental está ativo desde setembro de 2000, realizando medidas contínuas.

3.2 Instrumentação

Uma torre de 28 metros, (figura 6), é utilizada para coleta contínua, de medidas micrometeorológicas e de gases traço.

Um sistema de CT (*Eddy Covariance*), constituído de um anemômetro sônico 3D (*Applied Technologies, Inc, SATI/3K*), (figura 7), e um analisador de gás (*IRGA, Licor 6262*), (figura 8), para medir concentrações de CO_2 e H_2O , estão instalados a 8,75 metros.

O tubo para o analisador de CO_2 turbulento, tem 2 metros de comprimento, com diâmetro de 0,64 centímetros. A integridade do tubo é checada semanalmente.

O sistema de CT está apontado para a direção leste, devido ser esta a direção

predominante do vento. As árvores mais próximas, na direção leste, estão cerca de 1 quilômetro distantes da torre.

As observações de perfil incluem as componentes horizontais do vento, medidas por anemômetros sônicos 2D (*Applied Technologies, Inc. CATI/2*), (figura 9), posicionados a 12,2 metros, 5,7 metros e 3,1 metros. Sensores de temperatura e umidade, com protetores de radiação solar em sistema aspirado (*Vaisala Humitter, CS500*), (figura 9), estão montados à 6,1 metros, 4,1 metros e 2,2 metros, e as ponteiras de entrada de amostras de CO₂ (*Licor 6262, sampling inlets*), estão posicionadas à 11,8 metros, 5,3 metros, 2,7 metros e 0,5 metros. Uma bomba com capacidade de sucção de 5 litros por minuto (5 ℓ/min), é utilizada para a condução das amostras de ar, para cada um dos analisadores de gás (*IRGA*). O ciclo automático de calibração do CO₂ é realizado duas vezes ao dia, uma às 05 horas e outra às 17 horas (*LST*).

Próximo ao topo da torre, a 17,8 metros, estão montados sensores de radiação de onda curta incidente e refletida (*Kipp and Zonen, CM11/14*), onda longa e fluxos radiativos (*Kipp and Zonen, CG2*), e radiação fotossinteticamente ativa (*Kipp and Zonen, PAR, 400-700nm*). A escolha dessa altura para o posicionamento dos sensores, é uma tática, fazendo a Área de Atuação¹ do sensor de radiação ser a máxima possível.

A temperatura do solo é medida por termômetros (*Campbell, T108*), posicionados à 1 centímetro, 24 centímetros, 50 centímetros, 1,5 metros e 2,0 metros abaixo do solo.

O fluxo de calor no solo é medido por um fluxímetro de solo (*Campbell, HFT3*) à 30 centímetros abaixo do solo, a umidade do solo é medida com o sensor (*Campbell, CS615*), posicionado à 30 centímetros abaixo do solo.

3.3 Sistema de Energia e Aquisição de Dados

Para garantir que o sistema de medidas opere continuamente, sem a necessidade da criação de uma rede de energia elétrica convencional, todos os instrumentos e o sistema de aquisição de dados são alimentados por um sistema de energia solar híbrido (*SunWize, Inc. Hybrid Power System*), (figura 10).

Este sistema de energia, foi projetado levando em conta a minimização dos riscos de degradação ambiental e minimização da influência do gerador nos ruídos das medidas de CO₂,

¹*Footprint*

O sistema, constituído de painéis fotovoltaicos, um banco de bateria, um gerador à diesel de reserva e um inversor, foi projetado para garantir a geração de 500 Watts a uma tensão de 120 Volts AC (*Alternated Current*), continuamente durante todo o dia.

O anemômetro sônico 3D e o analisador de gás *IRGA*, envia dados seriais de 10 Hz e 5 Hz, respectivamente.

O dados de perfil vertical de vento, medidos pelos anemômetros sônicos 2D, coletados a 1 Hz.

As medidas analógicas, tomadas por sensores de baixo tempo de resposta, são armazenadas por um *DataLogger* (*Campbell Sci, 23X*), que envia os sinais seriais à 0,2 Hz.

Um aplicativo dedicado, desenvolvido para sistema operacional padrão UNIX, roda em uma plataforma baseada em Linux, sincronizando todos os dados, recebidos pelas portas seriais, e executa o processamento dos dados quase em tempo real.

Este processamento consiste em fazer médias, calcular momentos estatísticos de 2^a, 3^a e 4^a ordem e cálculos das covariâncias (fluxos) a cada período de 30 minutos. Executa também os cálculos dos espectros, co-espectros e correlações, para os sinais de resposta rápida².

Os dados são manualmente descarregados e gravados, na forma digital, em discos compactos (*CD*), com intervalos de uma semana, estes ainda são enviados pela internet, via protocolo seguro de transferência de arquivos (*SFTP*), para serem armazenados nas instalações do Centro de Pesquisas de Ciências Atmosféricas (*ASRC*), da Universidade de Albany em Nova York (*SUNY*) e no Laboratório de Micrometeorologia, na Universidade Federal de Santa Maria.

²Frequência de amostragem superior à 1 Hz.



Figura 6: Torre de 28m, com sistema de CT, análise de gás Traço e perfil, Km77 - Santarém/PA.



Figura 7: Anemômetro Sônico 3D.



Figura 8: Medidor de concentração de CO_2 e H_2O , IRGA, Licor 6262.



Figura 9: Anemômetro Sônico 2D (Extremidade do braço) e Sensores de temperatura e umidade.



Figura 10: Sistema de Energia Solar Híbrido, *SunWize, Inc. Hybrid Power System*.



Figura 11: Mosaico do sítio Experimental, montagem da torre (acima à direita), quadro de comandos *SunWize* (acima à direita), painéis solares e banco de bateria (inferior à esquerda) e visão do conjunto (inferior à direita).

4 *Resultados*

4.1 Metodologia

O conjunto de dados utilizados neste estudo compreendem 8 dias, amostrados à uma taxa de 10 Hz com anemômetro sônico 3D:

- 4 dias consecutivos (01 à 04 de fevereiro de 2002)
- 4 dias consecutivos (27 à 30 de agosto de 2002)

Não há nenhuma razão especial para a escolha deste conjunto de dados, uma vez que o estudo proposto nesta dissertação é analisar diferentes técnicas para tratar séries temporais turbulentas, independente de condições sinóticas por exemplo.

Para a análise e tratamento dos dados, utilizou-se programas computacionais, desenvolvidos especificamente para cálculos de fluxos e espectros, utilizando linguagem de programação matemática (FORTRAN). Para a automação e obtenção de saídas gráficas dos resultados, utilizou-se programação em *shell*, padrão UNIX e pacotes estatísticos como o R-Project e Gnuplot, para sistemas UNIX.

Em cada dia foram extraídas, em vários horários distintos, séries temporais de 2^{14} pontos, que compreende um período de 27 minutos. A cada uma destas séries, foi estimado o fluxo de calor sensível e calculada a densidade espectral unidimensional da velocidade vertical e da temperatura nas seguintes condições:

1. Sem nenhum tratamento;
2. Tratando com RLT;
3. Tratando com FDR;
4. Tratando com FFDR.