

Identificação e estimativa do período de processos oscilatórios não turbulentos na camada limite estável através de funções de autocorrelação

Identification and estimation of the period of non turbulent oscillatory processes in the stable boundary layer through autocorrelation functions

Cristiano Henrique Schuster¹, Jean Jonathan Schuster¹, Eduardo Stüker¹, Daniel Michelon dos Santos¹, Luiz Eduardo Medeiros¹, Felipe Denardin Costa¹, Luis Gustavo Nogueira Martins², Giuliano Demarco² e Otávio Costa Acevedo²

¹ Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete, Alegrete, RS
cris.h.schuster@gmail.com; jeanjschuster@gmail.com; eduardostuker@gmail.com; danielmichelon@gmail.com; luizmedeiros@unipampa.edu.br; fdenardin@unipampa.edu.br;

²Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS
lgnm.sm@gmail.com; giulianofisico@gmail.com; otavio@ufsm.br

Resumo

A função de autocorrelação das componentes da velocidade de um escoamento, mensura a relação que a velocidade em um certo instante possui com a velocidade em um instante anterior. Em algumas condições, no escoamento atmosférico, esta autocorrelação apresenta uma forma oscilatória de baixa frequência, apresentando lobes negativos. Este comportamento é conhecido como meandro e torna-se predominante em condições de vento fraco. O objetivo deste trabalho é comparar os ajustes de funções de autocorrelações, presentes na literatura, com dados experimentais do experimento FLOOSS II para a determinação do período de oscilação do meandro. Inicialmente, três critérios de seleção foram utilizados para escolher as janelas de análise. Desentre os critérios, a magnitude do vento se mostrou o mais satisfatório. O ajuste das funções mostrou que ambas tiveram bom desempenho, mesmo com a grande variabilidade de períodos de oscilação encontrados. A grande variabilidade no período de oscilação do meandro pode estar associada à natureza do fenômeno responsável pela sua origem. Todavia, essa hipótese necessita de confirmação.

Palavras-chave: Camada limite estável, meandro, Função de autocorrelação.

Abstract

The autocorrelation function of the flow speed components, measures the relationship that the speed in a certain instant, has with the speed at an earlier instant. In some conditions, in the atmospheric flow, this autocorrelation presents a low frequency oscillatory shape, presenting negative lobes. This behavior is known as meandering phenomenon and becomes prevalent in low wind conditions. The objective of this study is to compare the adjustments of autocorrelation functions, present in the literature, with trial of the experimental data of FLOOSS II experiment, for determining the meandering oscillation period. Initially, three selection criteria were used to select the windows of analysis. Among the criteria the magnitude of the wind showed the most satisfactory. The fitting curves showed that both autocorrelation functions performed well, even with a large variability of oscillation periods that were found. The great variability in the oscillation period of the meandering phenomena can be associated with the nature of the physical phenomenon that is responsible for its origin. However, this hypothesis needs confirmation.

Keywords: Stable boundary layer, meandering, autocorrelation function.

1 Introdução

O escoamento na camada limite planetária (CLP) é particularmente complexo no período noturno. Em noites de céu claro e com vento fraco é comum a observação da alternância entre períodos nos quais a turbulência do escoamento é praticamente suprimida e períodos nos quais a turbulência ressurgem em todas as suas escalas, dando origem a um fenômeno conhecido como intermitência global, ou simplesmente intermitência (Mahrt, 1999).

Muitos são os fenômenos associados ao surgimento da intermitência na camada limite estável (CLE), sendo que a maioria são fenômenos com escala temporal maior que a escala da turbulência no escoamento, que causam perturbações que promovem o aumento do cisalhamento e conseqüentemente a produção de turbulência. Uma série de fenômenos oscilatórios, tais como, ondas gravitacionais internas, solitons, e outras estruturas complexas que individualmente ou superpostas dão origem a uma assinatura oscilatória, com período em torno de 1 h, para a direção horizontal do vento, conhecida como meandro (Anfossi et al., 2005; Oetl et al., 2005; Mahrt, 2007).

Geralmente, o cálculo do período do meandro é feito através do ajuste das funções de autocorrelação das componentes horizontais do vento (Degrazia et al., 2014). Assim, neste trabalho busca-se comparar o desempenho das equações para o ajuste da função de autocorrelação do vento propostas por Frenkiel (1953) e Moor et al. (2015). Os ajustes foram feitos utilizando dados experimentais oriundos do experimento FLOSS II (do inglês *Fluxes Over Snow Surfaces, Phase II*). Os intervalos, das séries temporais, utilizados na análise foram selecionados utilizando diferentes critérios de estabilidade atmosférica, sendo verificado, posteriormente, se existe relação entre o parâmetro que indica a intensidade do meandro nas funções de autocorrelação (m) com cada um dos critérios utilizados.

2 Metodologia

2.1 Funções de autocorrelação

As componentes horizontais das velocidades do vento, discretas em séries temporais, expressam a informação de uma medida em um certo instante, e geralmente esta possui algum grau de dependência com a medida do instante anterior (Brett e Tuller, 1991). Uma forma de mensurar esta relação é através de uma função de autocorrelação Euleriana:

$$R_i(\tau) = \frac{\overline{u_i(t)u_i(t+\tau)}}{\langle u_i^2 \rangle} \quad (1)$$

A Equação (1) fornece a autocorrelação ($R_i(\tau)$) em

um instante de tempo t como função da velocidade ($u_i(t)$, onde i é u para a componente zonal e v para componente meridional do vento) e a velocidade em um instante $t + \tau$ de forma normalizada pela variância $\langle u_i^2 \rangle$. Em condições de vento fraco a autocorrelação das velocidades horizontais do vento apresenta um comportamento oscilatório e não somente um decaimento exponencial, sendo este comportamento uma consequência do meandro (Oetl et al., 2005; Mortarini et al., 2013).

Neste contexto, Frenkiel (1953) descreveu um ajuste para a curva de autocorrelação de modo a levar em consideração possíveis eventos turbulento na camada limite planetária (CLP), como mostra a Equação (2), onde T e m são parâmetros associados a escala integral de tempo e características de meandro, respectivamente (Degrazia et al., 2014):

$$R_i(\tau) = e^{\frac{-\tau}{(m^2+1)T}} \cos\left(\frac{m\tau}{(m^2+1)T}\right) \quad (2)$$

Com o objetivo de obter uma expressão que seja capaz de descrever a forma geral e os *lobes* negativos que caracterizam a autocorrelação de dados experimentais com meandro, Moor et al. (2015) propôs uma nova função de autocorrelação (Equação (3)), que utiliza os mesmos parâmetros utilizados na Equação (2).

$$R_i(\tau) = \frac{\cos\left(\frac{m\tau}{(m^2+1)T}\right)}{\left(1 + \frac{\tau}{(m^2+1)T}\right)} \quad (3)$$

2.2 Critérios de seleção dos períodos de análise

O fenômeno de meandro é mais facilmente identificado em condições onde a intensidade turbulenta é muito fraca (Mahrt, 2007). Comumente os períodos de análise são selecionados levando em conta a velocidade do vento médio em uma determinada janela de observação. Geralmente, o valor da velocidade do vento utilizada na seleção das séries temporais é $\bar{U} < 1,5 \text{ m s}^{-1}$ (Anfossi et al., 2005). Outros critérios podem ser utilizados para identificar períodos nos quais a mistura turbulenta é pequena, desta forma, aqui, mais dois critérios independentes serão utilizados para selecionar os períodos para análise: o grau de estratificação térmica, representada pelo número de Richardson gradiente (Ri); e o desvio padrão da velocidade vertical (σ_w).

A produção de turbulência, no escoamento na CLE, é puramente mecânica devido ao cisalhamento do vento. Isto justifica a escolha dos parâmetros utilizados na seleção dos períodos com turbulência fraca. Pois, em situações com ventos calmos é esperado que a atividade turbulenta seja pequena. Pro outro lado, Ri é definido a relação entre os forçantes térmicos e mecânicos res-

ponsáveis pela produção e destruição no escoamento, definido como:

$$R_i = \left(\frac{g}{\Theta} \right) \frac{\Delta\theta\Delta z}{[(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2]}, \quad (4)$$

onde θ é a temperatura, Θ é a temperatura de referência, z é a altura, u é a componente zonal do vento, v é a componente meridional do vento, g é a gravidade e os índices 1 e 2 referem-se aos níveis de análise no cálculo do gradiente, respectivamente.

Finalmente, o escoamento turbulento é causado pela presença de flutuações nas componentes da velocidade do escoamento, por exemplo, quanto mais forte for a turbulência no escoamento maior será a amplitude das flutuações da componente vertical do vento (w), o que justifica a utilização de σ_w como um critério de seleção de períodos com pouca turbulência.

Assim, cada um dos três parâmetros anteriormente citados foi aplicado para selecionar períodos de 2 h que obedecessem as seguintes situações: magnitude média do vento à 5 m menor do que $1,5 \text{ m s}^{-1}$; $Ri > 0,2$; e $\sigma_w < 0,1 \text{ m s}^{-1}$. É importante destacar, que cada critério foi aplicado separadamente, permitindo que ocorressem períodos onde somente um dos critérios fosse obedecido.

2.3 Dados experimentais e procedimento de análise

Os dados utilizados para as análises das funções de autocorrelação foram obtidos do projeto FLOSS II. Este projeto consistiu em um estudo da meteorologia da superfície terrestre coberta por neve, foi realizado em North Park Basin, noroeste do Colorado próximo a cidade a Walden, Estados Unidos. Os dados foram coletados entre os meses de dezembro de 2002 a maio de 2003 Mahrt (2007). Os dados são compostos por séries temporais de 10 horas com início às 20 h e término às 6h, no horário local. As três componentes do vento e a temperatura foram medidas 7 níveis, fixados em 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m e 30 metros, com uma taxa de amostragem de 60 Hz. As componentes médias, as variâncias e os fluxos turbulentos foram calculados utilizando médias de 10 s.

A aplicação dos critérios, descritos anteriormente, foi realizada da seguinte forma: o desvio padrão para a componente vertical do vento e \bar{U} foram utilizados para selecionar janelas de duas horas onde, nas séries temporais a 5 m de altura. O número de Richardson gradiente foi calculado entre os níveis localizados a 1 m e 10 m.

Para o cálculo da função de autocorrelação, inicialmente, foi realizada a rotação do vento para alinhar a componente u à direção do escoamento médio (Kaimal e Finnigan, 1994), e partir disso, a função de autocorrelação foi calculada utilizando a Equação (1). Poste-

riormente, as funções de autocorrelação propostas por Frenkiel (1953) e Moor et al. (2015), foram ajustadas determinar os parâmetros m e T . Após a determinação destes dois parâmetros foi calculado o período da oscilação de meandro, pela seguinte equação (Anfossi et al., 2005):

$$T_* = \frac{2\pi T(m^2 + 1)}{m}$$

3 Resultados

Foram analisadas 75 noites buscando-se por intervalo de duas horas contínuas que obedecessem os três critérios de análise individualmente. Este intervalo foi utilizado pelo fato que o período característico do meandro é em torno de uma hora (Anfossi et al., 2005). A Tabela 1 traz o número de intervalos encontrado para cada critério (N), bem como quantos destes intervalos apresentaram um parâmetro de meandro (m das Equações (2) e (3)) maior que 1, que caracteriza a ocorrência de meandro (Mortarini et al., 2013), bem como as médias de m e do período de meandro (\bar{m} e \bar{T}_* , respectivamente) para todos os intervalos encontrados.

A Tabela 1 mostra que o parâmetro mais eficiente para a seleção de períodos com fraca intensidade turbulenta e presença de meandro foi a velocidade média do vento, onde 78% dos períodos selecionados apresentaram a presença de meandro. Por outro lado, a utilização do número de Richardson, se mostrou o parâmetro menos eficiente, sendo que apenas 57% dos períodos selecionados o m foi maior que 1. Outro resultado interessante apresentado na Tabela 1 é a grande diferença do período médio do meandro, entre os critérios de seleção, embora a variação de m não fosse tão grande. Isto pode estar relacionado com a natureza do fenômeno físico responsável pela ocorrência de meandro, todavia, uma investigação mais aprofundada é necessária para embasar tal informação.

Tabela 1: Número de intervalos de duas horas encontrados para cada critério.

Critério	N	$m > 1$	\bar{m}	\bar{T}_*
$Ri > 0,2$	243	140	2,15	5860,88
$\sigma_w < 0,1 \text{ m s}^{-1}$	32	20	2,00	3771,99
$\bar{U} < 1,5 \text{ m s}^{-1}$	61	48	2,35	4235,27

Como o critério de seleção que apresentou melhor desempenho foi $\bar{U} > 1,5 \text{ m s}^{-1}$, as análises apresentadas daqui para frente serão usando somente este critério, embora existam casos onde os períodos de seleção obedeceram mais de um critério.

A Figura 1 mostra o ajuste das funções de autocorrelação propostas por Frenkiel (1953) (linhas pretas) e

Moor et al. (2015) (linhas vermelhas) aos dados experimentais (linhas azuis). É possível observar que tanto o parâmetro de meandro, quanto o período de oscilação estimados pelas duas funções de autocorrelação foram bastante próximos, todavia, existe uma grande variabilidade entre as noites, como pode ser observado na Tabela 2.

A Tabela 2 mostra o parâmetro m e o período de meandro (T_*) obtidos das Equações (2) e (3) que foram utilizados para construir os gráficos mostrados na Figura 1. Verifica-se que os valores de período de meandro encontrados variaram de aproximadamente 1800 s a 4600 s, sendo que os valores típicos de T_* são da ordem de 2000 s (Anfossi et al., 2005). Apesar de apresentar valores superiores, T_* está de acordo com valores encontrados por Moor et al. (2015) que são da ordem de 1500 s e 3000s.

Tabela 2: Parâmetro m e T_* da função de autocorrelação de Frenkiel (ACF) e Moor et al. (2015) (ACM) para cada noite.

Noite	m (ACF)	T_* (ACF) [s]	m (ACM)	T_* (ACM) [s]
04 Dez.	2,82	4607,41	2,80	4627,82
07 Fev.	2,50	2475,77	2,48	2490,48
15 Fev.	4,20	4089,00	4,21	4072,65
18 Jan.	3,66	2658,82	3,65	2668,42
19 Fev.	5,28	2064,10	5,29	2060,73
21 Dez.	2,72	4245,44	2,77	4180,08
25 Fev.	5,71	1865,31	5,70	1866,40
28 Nov.	3,55	3111,58	3,53	3130,04

Como discutido anteriormente, a Tabela 1 mostra que o período é bastante distinto entre os intervalos mostrados, o que pode confirmar a hipótese da distinção na natureza da causa do meandro. Esta diferença pode ser vista claramente quando são comparadas as janelas de análise que apresentaram o maior período de oscilação (Figura 2, painel superior) e o menor período de oscilação (Figura 2, painel inferior). A Figura 2 mostra claramente que a função de autocorrelação proposta por Moor et al. (2015) é capaz de reproduzir outros lobes enquanto que a função proposta por Frenkiel (1953) ajusta de maneira satisfatória somente o primeiro lobe negativo.

4 Conclusões

Neste trabalho foram analisadas 75 noites do experimento FLOSS II, sendo extraídas janelas de observação, nas quais a intensidade da turbulência podia ser considerada fraca, seguindo 3 critérios: a velocidade do vento, a estabilidade atmosférica e amplitude das flutuações do escoamento turbulento. Destes três parâmetros, a velocidade do vento se mostrou o critério mais eficiente

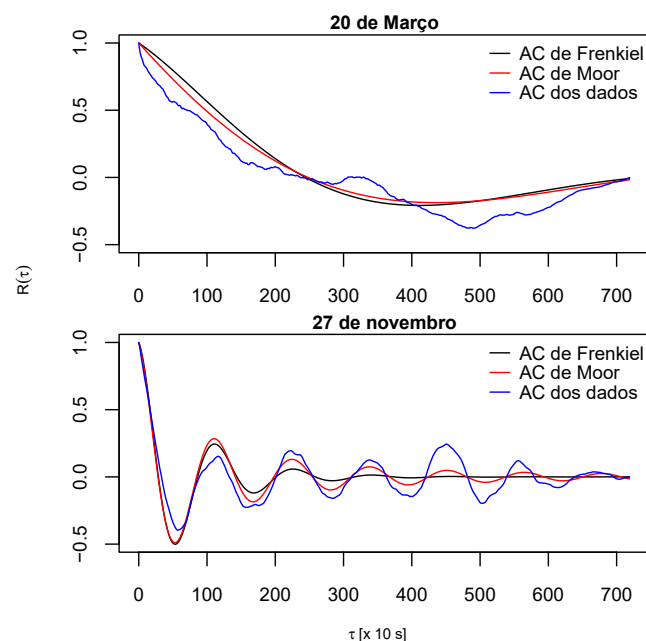


Figura 2: Autocorrelação da componente zonal de velocidade do vento para as noites indicadas nos títulos dos painéis. A linha preta representa a função de autocorrelação de Frenkiel, a linha vermelha representa a função de autocorrelação de Moor et al. (2015) e a linha azul é a autocorrelação dos dados experimentais. No painel superior é apresentada a janela de análise com maior período de oscilação ($T_* \approx 9780$ s), enquanto que no painel inferior é apresentada a noite no qual o meandro apresentou menor período de oscilação ($T_* \approx 1150$ s). No primeiro caso o valor do parâmetro de meandro foi $m \approx 1,8$, já no segundo caso $m \approx 4,4$, foi encontrado.

na identificação de períodos com turbulência fraca em que ocorreu meandro do vento.

O ajuste das funções de autocorrelação mostrados nas Figuras 1, 2 mostra que as funções propostas por Frenkiel (1953) e Moor et al. (2015) tiveram um bom ajuste com a autocorrelação dos dados experimentais da componente zonal de velocidade do vento. Porém, para intervalos nos quais o período do meandro é pequeno e o parâmetro de meandro é alto, a função de autocorrelação de Moor et al. (2015) apresentou melhor desempenho (Figura 2, painel inferior).

Finalmente, é importante destacar que este é um trabalho que se encontra em estágio inicial, porém, até o momento análises do parâmetro de meandro m e do período da oscilação T_* apresentaram uma grande variabilidade, que pode estar associada à natureza do fenômeno físico responsável pela ocorrência de meandro. Entretanto, uma investigação mais aprofundada, utilizando outros conjuntos de dados, é necessária. Sendo o estudo destes casos a próxima etapa do presente trabalho.

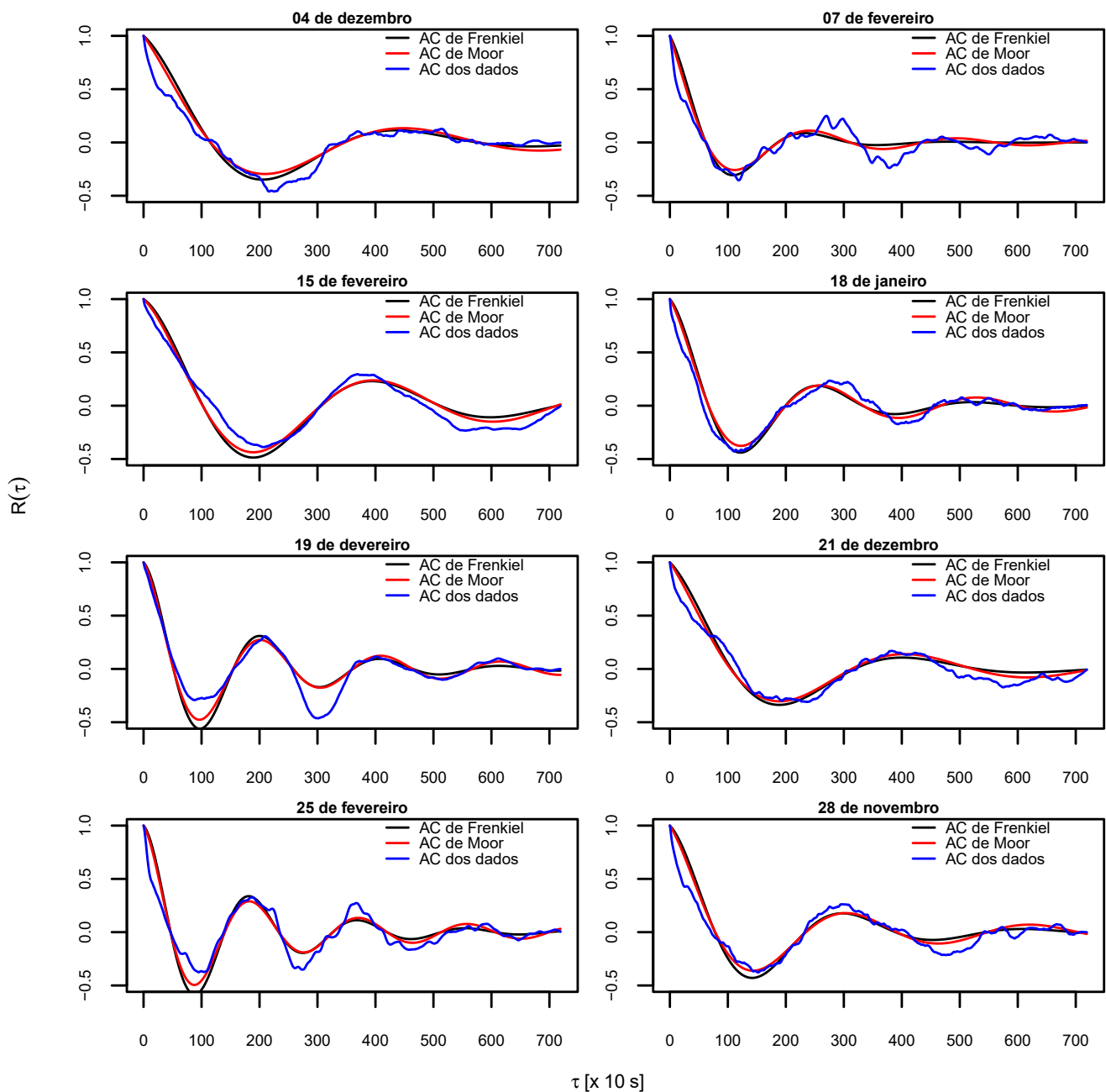


Figura 1: Autocorrelação da componente zonal de velocidade do vento para as noites indicadas nos títulos dos painéis. A linha preta representa a função de autocorrelação de Frenkiel, a linha vermelha representa a função de autocorrelação de Moor et al. (2015) e a linha azul é a autocorrelação dos dados experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências CAPES (Coordenação de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro e ao Dr. Larry Mahrt pelos dados experimentais gentilmente cedidos. O cluster computacional utilizado nas análises foi adquirido com recursos

do edital Edital 02/2014 - PqG (Edital Pesquisador Gaúcho) da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

Referências

Anfossi, D., Oettl, D., Degrazia, G., Goulart, I. (2005). An analysis of sonic anemometer observations in low

- wind speed conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 114(1), 179–203.
- Brett, A. C., Tuller, S. E. (1991). The autocorrelation of hourly wind speed observations. *Journal of Applied Meteorology*, 30(6), 823–833.
- Degrazia, G. A., Buligon, L., Szinvelski, C. R. P., Moor, L., Acevedo, O. C. (2014). A theoretical review of autocorrelation functions applied to high and low wind speed. *Ciencia & Natura*, 36(3), 101–107.
- Frenkiel, F. (1953). Flow field of homogeneous turbulence1. *Advances in applied mechanics*, 3, 61.
- Kaimal, J. C., Finnigan, J. J. (1994). *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. Oxford University Press.
- Mahrt, L. (1999). Stratified atmospheric boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 90(3), 375–396.
- Mahrt, L. (2007). Weak-wind mesoscale meandering in the nocturnal boundary layer. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(4), 331–347.
- Moor, L., Degrazia, G., Stefanello, M., Mortarini, L., Acevedo, O., Maldaner, S., Szinvelski, C., Roberti, D., Buligon, L., Anfossi, D. (2015). Proposal of a new autocorrelation function in low wind speed conditions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 438, 286–292.
- Mortarini, L., Ferrero, E., Falabino, S., Trini Castelli, S., Richiardone, R., Anfossi, D. (2013). Low-frequency processes and turbulence structure in a perturbed boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(673), 1059–1072.
- Oetl, D., Goulart, A., Degrazia, G., Anfossi, D. (2005). A new hypothesis on meandering atmospheric flows in low wind speed conditions. *Atmospheric Environment*, 39(9), 1739–1748.