

SIMULAÇÃO DA CAMADA-LIMITE ATMOSFÉRICA NEUTRA DA FLORESTA AMAZÔNICA USANDO *LARGE-EDDY SIMULATION*

Mateus I. M. Popoff¹ e Livia S. Freire¹

¹Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP

Resumo

Simular a camada limite atmosférica (CLA) da Amazônia é importante devido à necessidade de conhecer os fenômenos químicos e de transporte que ocorrem nessa região. A turbulência na CLA é responsável por transportar os componentes químicos no dossel da floresta amazônica, além de realizar o transporte desses elementos desde a superfície da floresta até o topo da CLA. Uma das limitações no uso do *Large-Eddy Simulation* (LES) está na simulação da CLA em condições instáveis, pois a simulação inevitavelmente requer um domínio vertical maior, o que limita a resolução do modelo perto da superfície devido ao aumento do custo computacional. A solução proposta nesse trabalho é o uso do modelo de parede *One-Dimensional Turbulence* (ODT). Esse modelo acoplado ao LES substitui a necessidade de refinamento da malha ao produzir vórtices estocásticos, gerados estatisticamente no intuito de imitar os efeitos da turbulência nessa região. No presente trabalho são apresentados resultados de uma simulação da CLA Amazônica sob condições neutras de estabilidade. Na região da vegetação, os resultados da velocidade média e tensão de cisalhamento são similares aos de dados medidos em campo no experimento *GoAmazon*. Por outro lado, as variâncias e assimetrias apresentam diferenças.

Palavras-chave: Turbulência; Large-Eddy Simulation; Camada Limite Atmosférica, Amazônia

Abstract

Simulating the atmospheric boundary layer (ABL) of the Amazon is important because of the chemical and transport phenomena occur in this region. The turbulence in the ABL is responsible for the transport in the canopy of the Amazon forest, carrying out the elements from the surface of the forest to the top of the ABL. The use of Large-Eddy Simulation (LES) is limited for simulations of the ABL in unstable conditions, since the simulation inevitably requires a larger vertical domain, which limits the resolution of the model close to the surface due to the increase of the computational cost. The solution proposed in this work is the use of the One-Dimensional Turbulence (ODT) wall model. This model coupled to the LES replaces the need for mesh refinement by producing stochastic vortices, statistically generated in order to mimic the effects of turbulence in this region. In the present work, results of a simulation of the Amazon ABL under neutral stability conditions are presented. In the vegetation region, the average velocity and shear stress results are similar to data measured in the field in the *GoAmazon* experiment. On the other hand, variances and asymmetries show differences.

Keywords: Turbulence; Large-Eddy Simulation; Atmospheric Boundary Layer; Amazon Rainforest

1. Introdução

A floresta amazônica possui uma importância ambiental devido a diversos aspectos (PACHAURI et al., 2014), contudo, o projeto está interessado na região da atmosfera mais próxima do solo da Amazônia, a troposfera. Essa região é sensível aos eventos que ocorrem na floresta, logo é necessário considerar os fenômenos do dossel amazônico que são significativos, para realizar uma predição assertiva dos eventos de troca entre a superfície e a atmosfera da Amazônia (FREIRE,

2022). Portanto, o objetivo desse trabalho é validar os resultados obtidos em uma simulação da camada limite atmosférica (CLA) neutra da floresta amazônica. Os dados do experimento GoAmazon, obtidos no trabalho de Gerken, Chamecki e Fuentes (2017), serão usados para comparar com esses resultados. Contudo, o objetivo do projeto em que esse trabalho faz parte é simular a CLA instável com o mesmo modelo de parede utilizado no presente artigo. As simulações de CLA requerem um refinamento próximo à superfície, pois a turbulência é responsável por transportar os componentes químicos gerados pela floresta para cima do seu dossel, até o topo da CLA, elevando o custo computacional (GERKEN; CHAMECKI; FUENTES, 2017).

2. Large-Eddy Simulation

A simulação de grandes vórtices, também conhecida como *Large-Eddy Simulation* (LES), é um método numérico computacional que simula apenas as maiores escalas de flutuações, enquanto modela as menores (POPE, 2000). Grande parte do esforço computacional na simulação de fluidos é devido às escalas dissipativas, que exigem um maior refinamento da discretização do campo conforme se aumenta o número de Reynolds do escoamento (DAVIDSON, 2015). A decomposição da velocidade para o LES é feita através de um operador de filtro de grade. Esse operador delimitará o que será simulado e modelado, sendo necessário que esse filtro esteja definido dentro das escalas inerciais (POPE, 2000). Sendo assim, a equação da continuidade filtrada para simulações atmosféricas é

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

onde \tilde{U}_i é a componente i do vetor de velocidade filtrada, enquanto x_i é a componente i do vetor posição, com $i = \{1, 2, 3\}$. A equação de quantidade de movimento filtrada pode ser escrita como

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}_i \tilde{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{P}^r}{\partial x_i} + f(\tilde{U}_2 - V_g)\delta_{i1} - f(\tilde{U}_1 - U_g)\delta_{i2} - g\frac{\tilde{\Theta}'}{\Theta_0}\delta_{i3} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j}, \quad (2)$$

em que t é o tempo, g é a aceleração da gravidade, \tilde{P}^r é a pressão filtrada modificada, τ_{ij}^r é o tensor de tensão residual anisotrópico, f é o parâmetro de Coriolis, U_g e V_g são componentes horizontais do vento geostrófico, $\tilde{\Theta}$ é a temperatura potencial filtrada, $\tilde{\Theta}'$ é o desvio da média planar horizontal dada por Θ_0 e δ é o Delta de Kronecker.

Ao resolver numericamente o sistema de equações dados por 1 e 2, é necessário modelar as variáveis do tensor de tensão residual para que o sistema se torne possível e determinável (POPE, 2000). Esse tensor, escrito em função de uma viscosidade residual ν^r , compensa os efeitos dissipativos que não são capturados na escala das células do LES (FREIRE, 2022). O modelo submalha utilizado nesse trabalho é o *Lagrangian-averaged scale-dependent dynamic model*, apresentado no artigo de Bou-Zeid, Meneveau e Parlange (2005).

Por fim, a equação de transporte de temperatura potencial filtrada é

$$\frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\Theta} \tilde{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$q_j = -\frac{\nu^r}{Pr^r} \frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial x_j}, \quad (4)$$

sendo q_j o fluxo de calor e Pr^r o número de Prandtl submalha. Note que os efeitos da viscosidade molecular são desprezados nessas equações porque ela é significativamente menor quando comparado com a viscosidade residual (FREIRE, 2022).

3. One-Dimensional Turbulence

O modelo de parede utilizado nesse trabalho é o *One-Dimensional Turbulence* (ODT), criado por Kerstein (1999), utilizado inicialmente como um modelo independente (KERSTEIN, 1999). O

domínio do ODT é unidimensional, tal que as três componentes da velocidade e a temperatura potencial são calculadas independentemente. Semelhante às equações governantes para simulações da CLA, o conjunto de equações do ODT possui o termo temporal, o termo advectivo, a força de Coriolis e o divergente de tensão residual. A maior diferença está nos vórtices estocásticos, que imitam os efeitos do termo não-linear. Esse efeito é modelado, pois a turbulência só ocorre em domínios tridimensionais. Uma vez que o ODT é utilizado com o LES, é possível expressar as equações do ODT ao aplicar o filtro de grade, resultando em:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{v}_j}{\partial x_j} = f(\tilde{u}_2 - V_g) \delta_{i1} - f(\tilde{u}_1 - U_g) \delta_{i2} - \frac{\partial \tau_{i3}^{r*}}{\partial x_3} + \text{vórtices estocásticos}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\theta} \tilde{v}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_3^{r*}}{\partial x_3} + \text{vórtices estocásticos}, \quad (6)$$

tal que

$$\tau_{i3}^{r*} = -\nu_{r*} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_3}, \quad (7)$$

$$q_3^{r*} = \frac{\nu_{r*}}{Pr^r} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_3}, \quad (8)$$

onde \tilde{u}_i é a velocidade resolvida, \tilde{v}_j é a velocidade média espacial resolvida, $\tilde{\theta}$ é a temperatura potencial resolvida, Pr^r é o número de Prandtl submalha, ν_{r*} é a viscosidade submalha, q_3^{r*} é o fluxo de calor vertical submalha e τ_{i3}^{r*} é a tensão de cisalhamento vertical submalha, todos na escala do ODT (FREIRE; CHAMECKI, 2018).

Os vórtices estocásticos são determinados de acordo com uma distribuição probabilística com base nas velocidades e na temperatura potencial, que, por sua vez, expressam a quantidade de energia cinética e potencial instantânea presente no vórtice estocástico do ODT. Seja um escoamento turbulento, a distribuição de probabilidade do tamanho e localização do vórtice para o ODT, ao longo dos passos de tempo, é dada pela função $\lambda(l, z_b; t)$, em que

$$\lambda(l, z_b; t) = \frac{C_\lambda}{l^3} \sqrt{\frac{1}{3} \left(u_{1,K}^2 + u_{2,K}^2 + u_{3,K}^2 + \frac{8gl}{27} \frac{\theta_K}{\theta_0} \right)}, \quad (9)$$

onde l é o tamanho do vórtice estocástico e C_λ é uma constante que regula a frequência de ocorrência de vórtices relativo à quantidade de energia do escoamento, ajustando a intensidade da turbulência. Além disso, os valores de u_K e θ_K são valores médios referentes ao vórtice selecionado, como discutido em Freire e Chamecki (2018) (FREIRE; CHAMECKI, 2018).

4. Resultados Preliminares

Os resultados são apresentados nos gráficos das figuras 1 e 2 e são referentes à simulação da CLA neutra com a inclusão da floresta amazônica em uma topografia plana. Os dados do ODT para a velocidade horizontal média, a variância e a assimetria são comparados com o que foi obtido experimentalmente no projeto *GoAmazon* (GERKEN; CHAMECKI; FUENTES, 2017). A variável u_h é a velocidade horizontal do fluido na altura do dossel, que nessa simulação é de 36 metros, representada por uma linha verde tracejada nas figuras. Os parâmetros da simulação estão apresentados na tabela 1. O índice de área foliar, a densidade de área foliar e a altura do dossel foram obtidos do trabalho de Tota et al. (2012) e Gerken, Chamecki e Fuentes (2017).

A velocidade horizontal dada pela figura 2a possui um ponto de inflexão no perfil da curva na altura do dossel, o que é um comportamento esperado pois dentro da floresta ela sofre uma resistência devido à força de arrasto. Essa velocidade calculada pelo ODT apresenta proximidade com os resultados do *GoAmazon*, porém, sua intensidade é menor em comparação aos dados empíricos. Na figura 1a, os dados da velocidade horizontal do LES estão condizentes com o esperado pela

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	
Domínio [km]	$5.888 \times 5.888 \times 2.944$
Altura da CLA [km]	1.5
nº de pontos da malha ($n_x \times n_y \times n_z, n_{ODT}$)	$64 \times 64 \times 64, 48$
Índice de área foliar [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$]	6
u_* [ms^{-1}]	0.491
$f; U_g; V_g$	$-7.887 \times 10^{-6}; 16; 0$

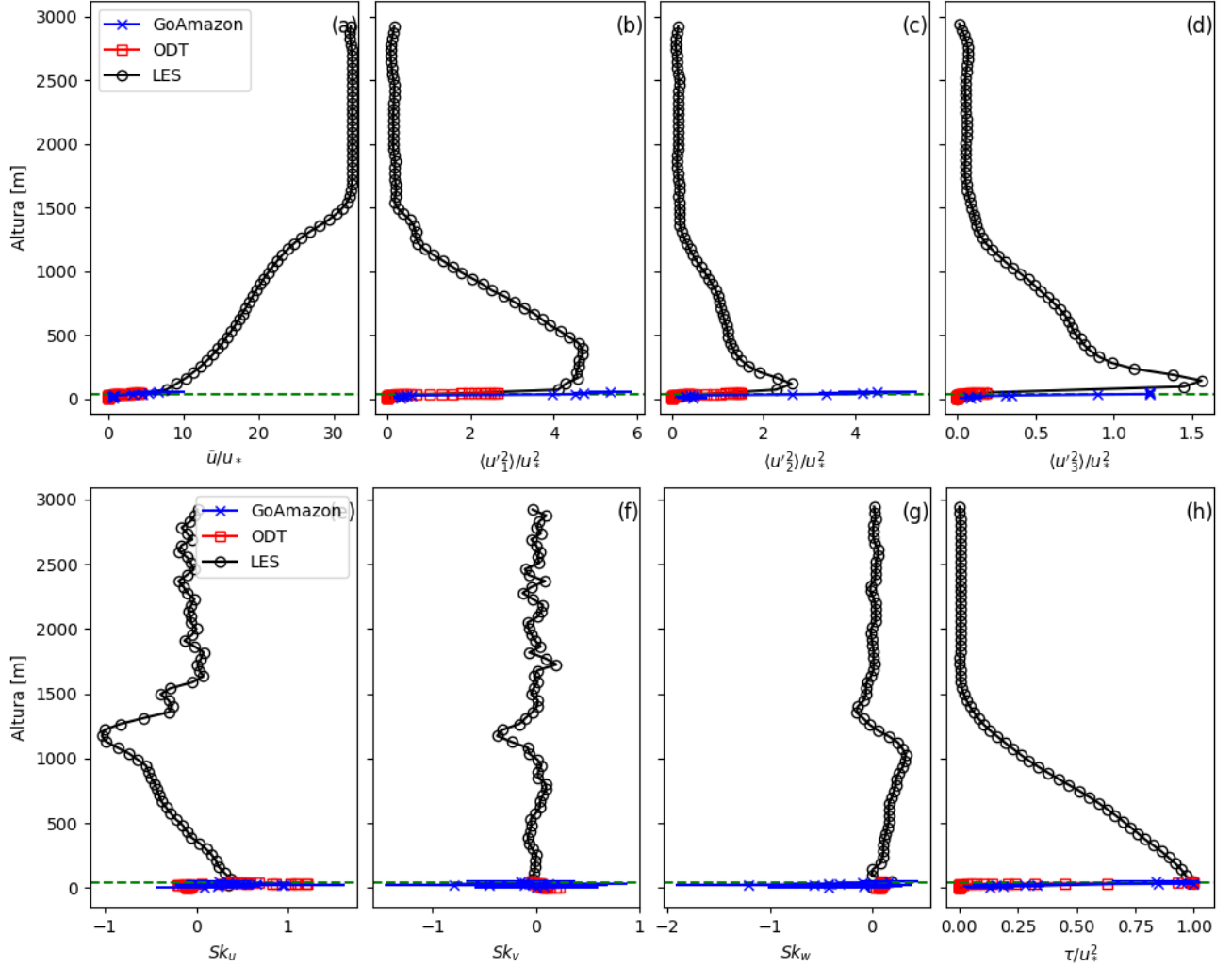


Figura 1 – Resultados da média horizontal e temporal da simulação ilustrando todo o domínio vertical, sendo que a linha verde tracejada é a altura do dossel. A imagem (a) é a magnitude da velocidade horizontal, (b), (c) e (d) são as variâncias relativas às três direções $i = 1, 2, 3$ respectivamente, (e), (f) e (h) são as assimetrias (*skewness*) relativas às três direções e (h) é a tensão de cisalhamento.

literatura. Acima da CLA a velocidade média é constante e as outras estatísticas são zero, devido à presença do gradiente de temperatura potencial positivo que estabiliza o fluxo através do empuxo.

As variâncias do ODT geralmente possuem um comportamento similar, mas que tende a subestimar o valor real (FREIRE; CHAMECKI, 2018). Isso é evidente na figura 2b–d, quando comparado seu valor com os dados medidos no GoAmazon. A assimetria (*skewness*) obtidas pelo ODT na figura 2e possui uma ordem de grandeza semelhante e sinal igual ao valor de referência, apesar do comportamento da curva ser diferente. Enquanto na figura 2f, a maior parte dos resultados simulados da assimetria estão de acordo com os dados empíricos, porém, existe uma divergência

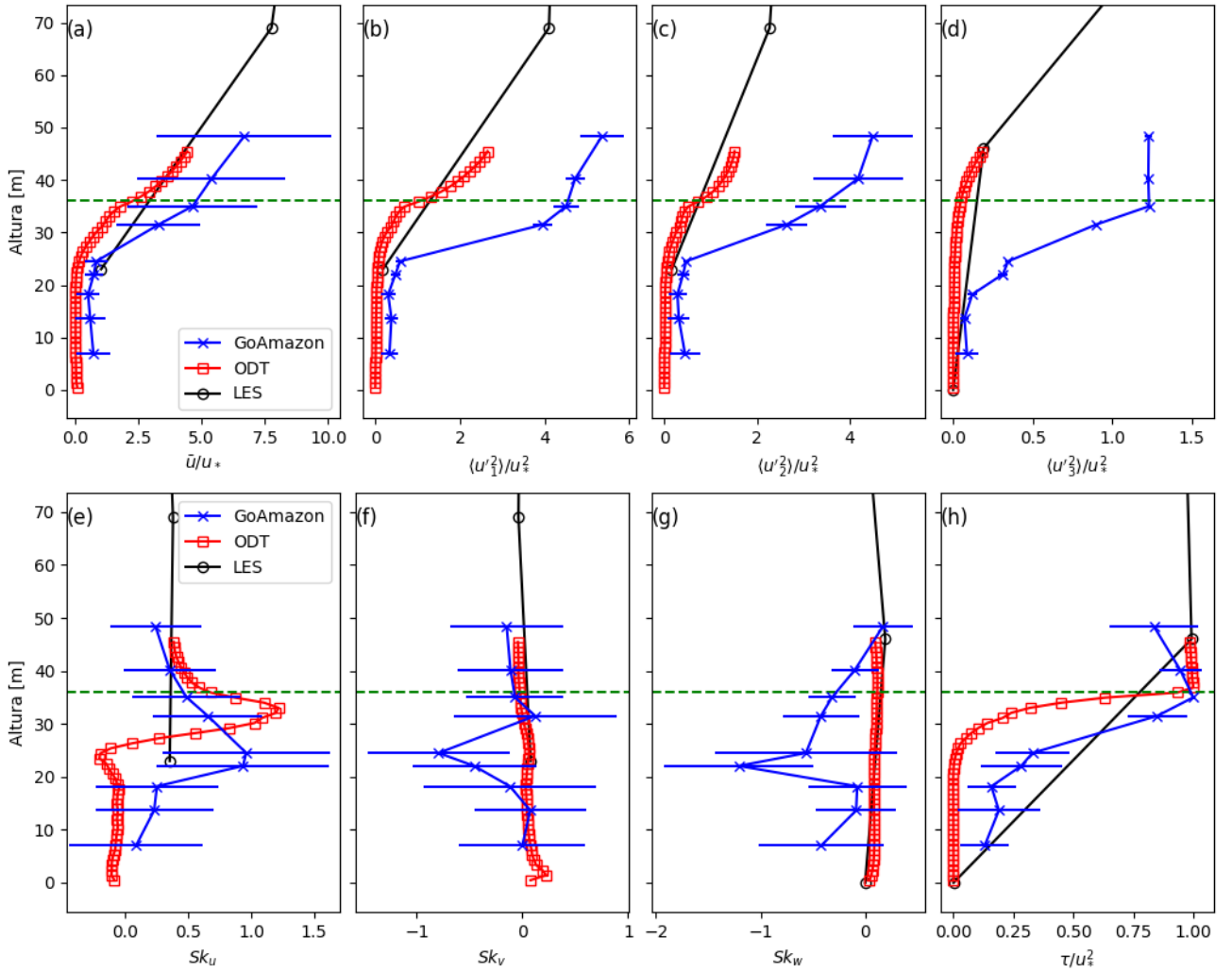


Figura 2 – Resultados da figura 1 na região do dossel.

no meio do dossel. Devido à força de arrasto no topo do dossel, os vórtices que se encontram logo acima tendem a entrar com maior velocidade, resultando em uma assimetria positiva nas estatísticas horizontais. Contudo, a assimetria negativa na estatística vertical nos dados empíricos da figura 2g é consequência da perda de energia cinética, causada pelas forças de arrasto com relação aos processos de intrusão e exaustão de ar no dossel. Entretanto, esse efeito não foi capturado pelo ODT.

A tensão de cisalhamento total do ODT no gráfico da figura 2h possui um comportamento similar ao do *GoAmazon*. Uma das divergências ocorre logo acima do dossel, pois segundo os dados experimentais a reta da tensão já se inclina, enquanto para o ODT, a reta se mantém vertical (dentro da margem de erro dos dados). Quando alcança a altura da CLA, a tensão zera porque o regime do escoamento na atmosfera livre é aproximadamente laminar (figura 1h). Outra divergência entre os resultados ocorre dentro do dossel, onde os valores de tensão do ODT estão subestimados em relação aos do *GoAmazon*, indicando a necessidade de se usar uma força de arrasto menor na simulação. Devido à resistência causada pelo arrasto da floresta, a turbulência de dentro é menos intensa que acima, contudo, no topo da floresta ocorre o cisalhamento máximo e seu valor, dado por u_*^2 , é utilizado na normalização de todas as estatísticas.

5. Conclusões

É possível concluir que o ODT é capaz de detalhar diversas propriedades estatísticas do escoamento próximo à superfície, porém, os resultados das variâncias são geralmente subestimados. Esse modelo de parede acoplado no LES se apresenta como uma ferramenta apta a realizar simulações em grandes domínios, mas considerando apenas as suas estatísticas, devido à natureza dos

vórtices estocásticos do ODT (FREIRE; CHAMECKI, 2018). Apesar desse modelo ser computacionalmente mais custoso que outros modelos de parede, como o observado no trabalho de Freire (2022), seu tempo de processamento da simulação deverá ser factível para realizar a simulação da CLA da floresta amazônica sob condições instáveis.

Esse artigo é parte de um projeto em andamento. É esperado que, até ao final desse projeto, as simulações da CLA da Amazônia em condições instáveis sejam concretizadas e validadas com dados experimentais.

Agradecimentos

Esse estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, concedido pelo processo 2022/04691-7 como processo vinculado ao 2018/24284-1) e apoiado pelo Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas a Indústria (CEPID-CeMEAI) através do uso do cluster Euler (concedido pelo processo 2013/07375-0 da FAPESP).

Referências Bibliográficas

BOU-ZEID, E.; MENEVEAU, C.; PARLANGE, M. A scale-dependent lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows. **Physics of fluids**, American Institute of Physics, v. 17, n. 2, p. 025105, 2005.

DAVIDSON, P. A. **Turbulence: an introduction for scientists and engineers**. [S.l.]: Oxford university press, 2015.

FREIRE, L. S. Large-eddy simulation of the atmospheric boundary layer with near-wall resolved turbulence. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 184, n. 1, p. 25–43, 2022.

FREIRE, L. S.; CHAMECKI, M. A one-dimensional stochastic model of turbulence within and above plant canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 250, p. 9–23, 2018.

GERKEN, T.; CHAMECKI, M.; FUENTES, J. D. Air-parcel residence times within forest canopies. **Boundary-Layer Meteorology**, Springer, v. 165, p. 29–54, 2017.

KERSTEIN, A. R. One-dimensional turbulence: model formulation and application to homogeneous turbulence, shear flows, and buoyant stratified flows. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 392, p. 277–334, 1999.

PACHAURI, R. K.; ALLEN, M. R.; BARROS, V. R.; BROOME, J.; CRAMER, W.; CHRIST, R.; CHURCH, J. A.; CLARKE, L.; DAHE, Q.; DASGUPTA, P. et al. **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S.l.]: IPCC, 2014.

POPE, S. B. **Turbulent flows**. [S.l.]: Cambridge university press, 2000.

TOTA, J.; FITZJARRALD, D. R.; DIAS, M. A. da S. et al. Amazon rainforest exchange of carbon and subcanopy air flow: Manaus Iba site—a complex terrain condition. **The Scientific World Journal**, Hindawi, v. 2012, 2012.