

XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

Aplicação da análise de multiresolução no estudo da estrutura da turbulência sobre a Floresta Amazônica

Application of multiresolution analysis to study the structure of turbulence over the Amazon rainforest

Luís Gustavo Nogueira Martins¹ , Otávio Costa Acevedo² ,
Gervásio Annes Degrazia¹ , Cláudio Alberto Teichrieb¹ ,
Franciano Scremin Puhales¹ , Giuliano Demarco¹ 

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

²School of Meteorology, University of Oklahoma, OK, EUA

RESUMO

No presente trabalho, medidas de anemometria sônica em 16 níveis verticais da torre ATTO foram utilizadas para avaliar a variação temporal dos (co)espectros de multiresolução das componentes da velocidade do vento e temperatura. Esta metodologia tornou possível visualizar, em uma grande extensão vertical, quais as escalas do movimento turbulento que mais contribuem para a energia cinética turbulenta e no transporte turbulento de uma quantidade sobre a Floresta Amazônica. Ainda neste aspecto, foi possível identificar as escalas dos turbilhões mais efetivos no processo de entrainment no início da manhã. A análise de multiresolução também evidenciou a necessidade de se determinar a escala da lacuna espectral para a obtenção de estimativas mais robustas dos fluxos turbulentos, mesmo que para o período diurno.

Palavras-chave: Camada Limite Atmosférica; Floresta Amazônica; Fluxos turbulentos; Análise de multiresolução; Torre ATTO

ABSTRACT

In this study, sonic anemometry measurements at 16 vertical levels of the ATTO tower were used to evaluate the temporal variation of the multiresolution (co)spectra of the wind speed and temperature components. This methodology made it possible to visualize, over a large vertical extent, which scales of turbulent movement contribute most to turbulent kinetic energy and turbulent transport of a quantity over the Amazon rainforest. In this respect, it was also possible to identify the turbulent scales most effective in the entrainment process in the early morning. The multiresolution analysis also highlighted the need to determine the scale of the spectral gap in order to obtain more robust estimates of

turbulent fluxes, even for the daytime period.

Keywords: Atmospheric Boundary Layer; Amazon Forest; Turbulent fluxes; Multiresolution analysis; ATTO tower

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a Floresta Amazônica tem despertado cada vez mais o interesse da comunidade científica, principalmente do ponto de vista climático. Por ser a maior floresta tropical do mundo, a Floresta Amazônica apresenta um grande potencial de desempenhar um papel importante nos cenários de mudanças climáticas. Além disso, a grande quantidade de água disponível na bacia amazônica influencia o ciclo das águas em grande parte da América Latina Andreae et al. (2015).

A turbulência na Camada Limite Atmosférica (CLA) é a principal responsável pelo transporte de umidade e dióxido de carbono (CO_2) da superfície para os níveis mais altos da atmosfera. Portanto, a compreensão desses processos turbulentos sobre a Floresta Amazônica é de grande importância, tanto do ponto de vista teórico, quanto ao aspecto prático, já que serve como parâmetro de validação e aprimoramento de modelos numéricos. Neste contexto, é fundamental ressaltar a importância científica da torre de 325 m do projeto ATTO (*Amazon Tall Tower Observatory*), pois a medição contínua de variáveis turbulentas em uma grande extensão vertical proporciona uma condição única de estudo das propriedades da turbulência na CLA sobre a floresta.

Análise de multiresolução de ondaletas, proposta inicialmente por Mallat (1989), é uma ferramenta de análise digital que decompõe um objeto original, como uma série temporal, nas componentes de diferentes escalas que compõem este objeto. Portanto, permite avaliar a contribuição das componentes de diferentes escalas/tamanhos na formação do sinal original. Em micrometeorologia, esta análise possibilita avaliar a contribuição dos diferentes movimentos do escoamento atmosférico nas estimativas dos fluxos e da energia cinética turbulenta Mahrt (2009); Vercauteren et al. (2016), além de ser amplamente utilizada para determinar a lacuna espectral (escala de tempo) que separa os movimentos turbulentos dos de submesoescala, possibilitando filtrar a contribuição desses últimos na estimativa dos fluxos turbulentos Howell and Mahrt (1997); Voronovich and Kiely (2007).

O presente estudo tem como objetivo utilizar a análise de multiresolução para determinar a contribuição dos turbilhões de diferentes escalas nos perfis verticais das variáveis turbulentas ao longo de toda extensão da torre.

2 DESCRIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

O sítio da torre ATTO está localizado à 150 km ao norte de Manaus-AM (02° 08.752' S - 59° 00.335' O). Neste sítio, a altura média do dossel é de aproximadamente 37 metros. As medidas de alta frequência (10 Hz) das componentes da velocidade do vento e temperatura do ar foram obtidas por 16 anemômetros sônicos: quatro CSAT3b (Campbell Sci.), instalados à 5, 25, 81 e 196 m de altura, e doze THIES Ultrasonic 3D (Kintech Engineering) instalados nos níveis de 15, 35, 43, 50, 100, 127, 151, 172, 223, 247, 274 e 298 m. Os anemômetros estão distribuídos em duas torres distantes 670 m uma da outra, a torre ATTO, de 325 m, e outra de 80 m. Medidas da radiação de onda curta à 84 m de altura também foram utilizadas. O conjunto de dados utilizados corresponde ao período de julho a novembro de 2022. Uma descrição mais detalhada do sítio experimental está disponível em Andreae et al. (2015)

3 METODOLOGIA

A análise de multiresolução empregada neste trabalho utiliza uma transformada discreta ortogonal de ondaletas baseada no algoritmo de transformada rápida de Haar. Uma descrição detalhada deste método pode ser encontrada em Katul and Parlange (1994). Importante ressaltar que esta transformada satisfaz as propriedades da média de Reynolds. Neste caso, considere o espectro de multiresolução $S_\phi(\tau)$ obtido a partir de uma série de medidas de uma variável turbulenta ϕ , a integração de $S_\phi(\tau)$ até uma escala de tempo τ é igual à variância calculada para um seguimento de comprimento τ da série. Para uma série com período T igual a $2^N/sf$:

$$\overline{\phi^2}_T = \sum_{n=1}^N (S_\phi)_n, \quad (1)$$

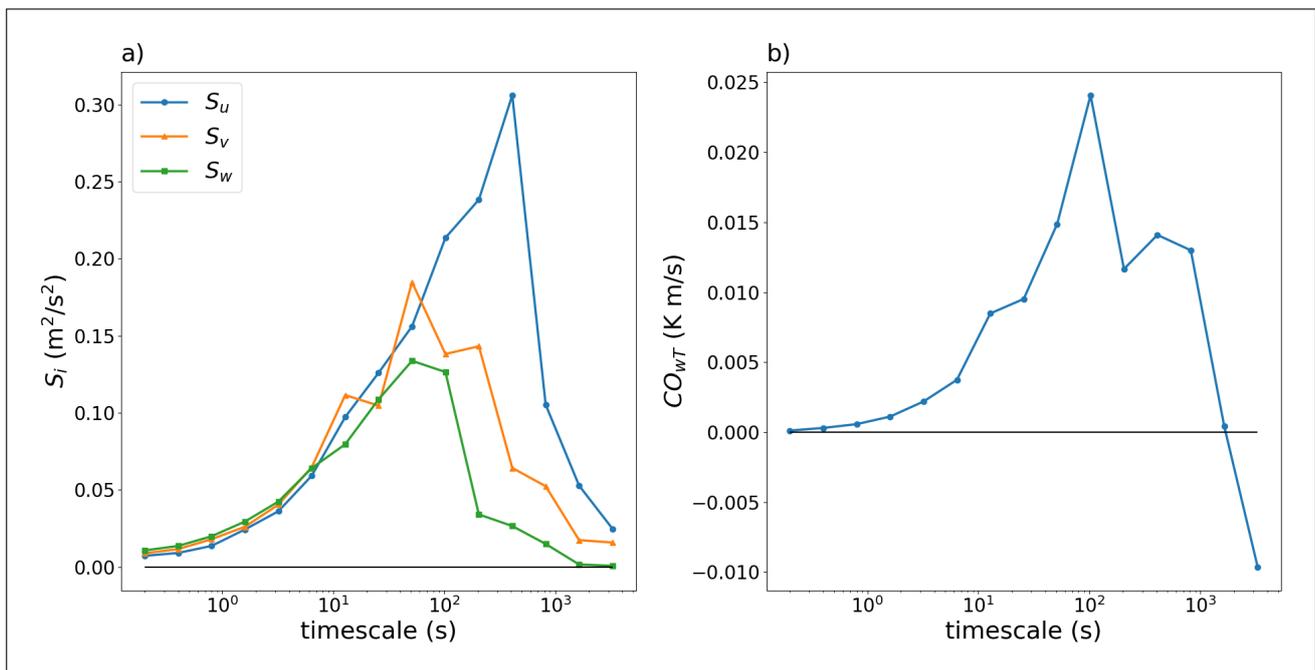
onde sf é a frequência de aquisição e $\tau_n = 2^n/sf$ é o conjunto de escalas de tempo da decomposição.

Da mesma forma, podemos associar o coespectro de multiresolução $CO(\tau)$ ao fluxo cinemático de duas variáveis turbulentas ϕ e w por:

$$\overline{w'\phi'}_T = \sum_{n=0}^N (CO_{w\phi})_n. \quad (2)$$

A figura 1 apresenta exemplos de espectros (figura 1a) e coespectro (figura 1b) de multiresolução calculados utilizando séries de 2^{15} pontos (≈ 54 min) das componentes da velocidade do vento e temperatura do ar. Portanto, as escalas de tempo representadas por esta metodologia variam de 0.2 s até aproximadamente 54 min. Na figura 1b, pode-se notar uma mudança de sinal do fluxo, em aproximadamente 1620 s. Esta escala de tempo indica a lacuna espectral que separa as escalas de tempo da turbulência daquelas associadas aos movimentos de submesoescala Howell and Mahrt (1997).

Figura 1 - a) Espectro de multiresolução S_i ($i = u, v, w$) das componentes da velocidade do vento. b) Coespectro de multiresolução CO_{wT} calculado a partir das medidas da componente vertical do vento e temperatura



Fonte: Autores (2023)

Tabela 1 – Características da CLA nos casos analisados. Variáveis determinadas no topo do dossel ao meio-dia (hora local)

Casos	15/08/22	10/09/22	24/09/22	06/10/22	07/10/22
\bar{U} (m/s)	1,88	2,77	0,81	1,72	1,89
Direção do vento (graus)	101,26	70,61	85,20	89,52	76,49
u_* (m/s)	0,59	0,75	0,30	0,54	0,51
He (W/m ²)	239,13	219,39	215,82	193,19	228,94
z/L	-0,52	-0,23	-3,69	-0,59	-0,79

Fonte: Autores (2023)

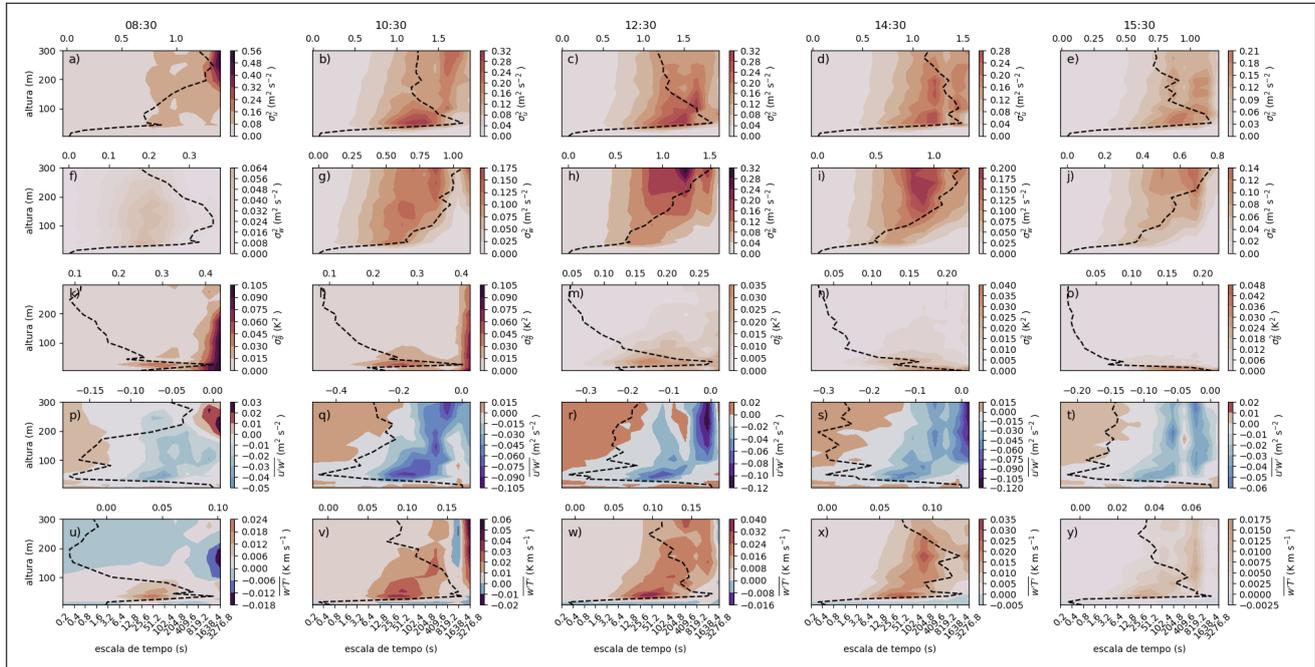
4 RESULTADOS

Com o intuito de eliminar o efeito da presença de nuvens na dinâmica da CLA, apenas casos em condições de céu claro durante o período diurno foram selecionados. Esta etapa foi realizada através de inspeção visual das medidas da radiação de onda curta incidente. A tabela 1 apresenta um resumo das variáveis que caracterizam o escoamento no interior da CLA, calculadas para os cinco casos selecionados, às 12 horas (horário local). Pode-se observar que as condições do escoamento entre os diferentes dias são muito semelhantes. Este fato possibilita determinar (co)espectros de multiresolução médios dos casos selecionados, que fornecem uma informação mais generalizada sobre a distribuição da energia e os fluxos turbulentos associados aos turbilhões de diferentes tamanhos.

A figura 2 apresenta as distribuições verticais dos (co)espectros médios das variáveis σ_u^2 , σ_w^2 , σ_θ^2 , $\overline{u'w'}$ e $\overline{w'T'}$ em diferentes horas do dia, bem como, os perfis verticais médios destas variáveis obtidas pela integração dos (co)espectros.

Com relação aos espectros e perfis verticais das componentes longitudinal ($0,5\sigma_u^2$) e vertical ($0,5\sigma_w^2$) da energia cinética turbulenta e das flutuações de temperatura (σ_θ^2), nota-se comportamentos distintos entre eles. Às 08:30, os espectros de u apresentam uma distribuição vertical homogênea de energia com maior contribuição dos turbilhões de escalas maiores que 25,6 s (figura 2a). No meio da manhã (figura 2b), vemos um distribuição de energia com duas regiões de máximos bem evidentes: um máximo próximo à superfície, associado aos pequenos turbilhões e outro nos níveis

Figura 2 – Variação vertical dos (co)espectros de multiresolução calculados em diferentes horários do período diurno. A linha preta tracejada representa o perfil vertical da respectiva variável obtidos a partir da integração do (co)espectros em cada nível



Fonte: Autores (2023)

acima de 200 m, associados aos turbilhões de maiores escalas. Com o passar do dia, observamos uma contribuição bem homogênea dos turbilhões de escalas maiores que 50 s até a altura de 200 m.

Para a componente w , observa-se que no início da manhã (figura 2b), os turbilhões que mais contribuem para a componente vertical da energia cinética turbulenta são aqueles da ordem de 25 s. A distribuição vertical dos espectros dessa variável é quase constante até a altura de 200 m, altura da camada convectiva neste horário (ver discussão abaixo). No decorrer do dia, os turbilhões de escalas maiores vão tornando-se relevantes, ou seja, mais energéticos, em níveis cada vez mais altos.

Diferentemente do que ocorre com as componentes do vento, as flutuações de temperatura são muito intensas apenas em uma região muito próxima do dossel e estão associadas a turbilhões muito menores do que observado nas outras variáveis. Durante o período da manhã observa-se uma forte presença de movimentos de maiores escalas não-turbulentos (figuras 2k e 2l), que gradualmente perdem relevância no decorrer do dia. À tarde, observa-se um aumento nas flutuações de temperatura em níveis mais altos, associadas à turbilhões de maiores escalas, mas de

intensidade muito menores do que as flutuações observadas na altura do dossel (figura 2m). A partir das 14:30, o pico de energia vai se deslocando para os níveis abaixo do dossel e distribuídos em um intervalo maior de escalas turbulentas.

Os perfis verticais integrados podem servir como um parâmetro de validação da análise de multiresolução. Ao meio dia, onde a CLA aproxima-se de sua altura máxima (≈ 1400 m) Dias-Júnior et al. (2022) e a camada de mistura está bem estabelecida, o perfil vertical integrado de σ_u^2 apresenta um pico no topo do dossel e tende a um valor constante menor acima da subcamada rugosa (figura 2c). Por outro lado, o perfil de σ_w^2 aumenta com a altura em toda a extensão vertical da torre (figura 2h). No caso das flutuações de temperatura (figura 2m), o perfil de variância apresenta um máximo na altura do dossel e decai com a altura. Qualitativamente, os três perfis apresentam o mesmo comportamento observado para essas variáveis em experimentos de camada convectiva realizados em diferentes ambientes Caughey and Palmer (1979); Dias-Júnior et al. (2019); Martins et al. (2021).

Com relação ao transporte turbulento, o padrão mais evidente que pode ser observado é que, nas primeiras horas após o amanhecer, o transporte turbulento é mais intenso próximo à superfície, associado aos turbilhões de menores escalas ($\approx 51,2$ s) (figuras 2p e 2u). À medida que a CLA cresce, os turbilhões convectivos de maiores escalas passam a ser relevantes. Importante notar, que por volta da 10:30, ainda podemos observar a presença da lacuna espectral nas escalas da ordem de 819 s (figuras 2q e 2v). Nestes casos, os perfis integrados das variáveis turbulentas estão “contaminados” pelas flutuações associadas a esses movimentos não-turbulentos. Para filtrar a contribuição desses movimentos é necessário, neste caso específico, integrar o coespectro até a escala de tempo anterior à lacuna ou calcular as covariâncias das séries temporais em janelas menores que 819 s (≈ 15 min). A partir das 13 horas, os turbilhões convectivos crescem ao ponto que suas escalas temporais começam a se sobrepor aos movimentos de submesoescala.

A análise dos perfis verticais de todas as variáveis mostra que tanto a energia cinética turbulenta quanto os fluxos turbulentos começam a decair a partir das 14:30 e 15:30.

Outra estrutura importante que pode ser observada na figura 2u é o fluxo de entranhamento nas primeiras horas após o amanhecer. No caso do fluxo de calor

sensível, a zona de entranhamento pode ser identificada como a região na qual o perfil do fluxo de calor é negativo, aproximadamente entre 100 e 300 m. Nesta região, podemos notar um intenso fluxo negativo associado ao engolfamento de ar mais quente na camada convectiva, causada principalmente pelos turbilhões com escalas de tempo de ≈ 1600 s. Acima do topo da camada convectiva, podemos observar um aumento do fluxo de *momentum* nas grandes escalas (figura 2p), indicando um intenso cisalhamento do vento, podendo estar associado à ocorrência de jatos de vento logo acima da camada convectiva.

5 CONCLUSÃO

A torre do projeto ATTO representa um marco histórico no estudo da CLA sobre uma região de floresta tropical. A grande quantidade de instrumentos realizando medições contínuas em alta frequência de variáveis no interior da camada representa uma condição inédita de estudar as características do transporte de grandezas vetoriais e escalares associado à turbulência. Os resultados apresentados neste trabalho são um exemplo da riqueza de detalhes que podem ser obtidos sobre o escoamento da CLA acima da Floresta Amazônica. Por fim, a análise de multiresolução mostrou-se uma ferramenta muito útil, que permitiu compreender melhor o papel dos turbilhões de diferentes escalas na estrutura da turbulência atmosférica, e como esse aspecto varia verticalmente e temporalmente.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pós-doutorado. Os autores agradecem ao Ministério Federal da Educação e Pesquisa da Alemanha, a Sociedade Max Planck (Alemanha), ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil, assim como a Universidade Estadual do Amazonas (UEA), FAPEAM, LBA/INPA, e SDS/CEUC/RDS-Uatumã pela manutenção do projeto ATTO.

REFERÊNCIAS

- Andreae, M. O., Acevedo, O. C., Araùjo, A., Artaxo, P., Barbosa, C. G., Barbosa, H., Brito, J., Carbone, S., Chi, X., Cintra, B., et al. (2015). The amazon tall tower observatory (atto): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18):10723–10776.
- Caughey, S. & Palmer, S. (1979). Some aspects of turbulence structure through the depth of the convective boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(446):811–827.
- Dias-Júnior, C. Q., Carneiro, R. G., Fisch, G., D'Oliveira, F. A. F., Sörgel, M., Botía, S., Machado, L. A. T., Wolff, S., Santos, R. M. N. d., & Pöhlker, C. (2022). Intercomparison of planetary boundary layer heights using remote sensing retrievals and era5 reanalysis over central amazonia. *Remote Sensing*, 14(18):4561.
- Dias-Júnior, C. Q., Dias, N. L., dos Santos, R. M. N., Sörgel, M., Araújo, A., Tsokankunku, A., Ditas, F., de Santana, R. A., Von Randow, C., Sá, M., et al. (2019). Is there a classical inertial sublayer over the amazon forest? *Geophysical Research Letters*, 46(10):5614–5622.
- Howell, J. & Mahrt, L. (1997). Multiresolution flux decomposition. *Boundary-Layer Meteorology*, 83:117–137.
- Katul, G. G. & Parlange, M. B. (1994). On the active role of temperature in surface-layer turbulence. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(15):2181–2195.
- Mahrt, L. (2009). Characteristics of submeso winds in the stable boundary layer. *Boundary-layer meteorology*, 130:1–14.
- Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 11(7):674–693.

Martins, L. G. N., Acevedo, O. C., Puhales, F. S., Degrazia, G. A., & Oliveira, P. E. (2021). Vertical profiles of turbulence parameters in the thermal internal boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 179:423–446.

Vercauteren, N., Mahrt, L., & Klein, R. (2016). Investigation of interactions between scales of motion in the stable boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699):2424–2433.

Voronovich, V. & Kiely, G. (2007). On the gap in the spectra of surface-layer atmospheric turbulence. *Boundary-layer meteorology*, 122:67–83.

Contribuições dos autores

1 – Luís Gustavo Nogueira Martins

Físico, Doutor em Física

<https://orcid.org/0000-0001-9631-4976> • lgnm.sm@gmail.com

Contribution: Conceituação; Metodologia; Análise Formal; Escrita – Primeira Redação

2 – Otávio Costa Acevedo

Meteorologista, PhD em Ciências Atmosféricas

<https://orcid.org/0000-0003-2606-4726> • otavio@ufsm.com

Contribution: Conceituação; Recursos; Escrita – Revisão e Edição

3 – Gervásio Annes Degrazia

Físico, PhD em Ciências Naturais

<https://orcid.org/0000-0002-4304-1748> • gervasiodegrazia@gmail.com

Contribution: Escrita – Revisão e Edição

4 – Cláudio Alberto Teichrieb

Físico, Doutor em Física

<https://orcid.org/0000-0002-4164-6639> • teichrieb@gmail.com

Contribution: Escrita – Revisão e Edição

5 – Franciano Scremin Puhales

Físico/Meteorologista, Doutor em Física

<https://orcid.org/0000-0001-6112-3803> • franciano.puhales@ufsm.br

Contribution: Escrita – Revisão e Edição; Recursos

6 – Giuliano Demarco

Físico, Doutor em Física

<https://orcid.org/0000-0003-2052-3514> • giulianofisico@gmail.com

Contribution: Escrita – Revisão e Edição

Como citar este artigo

Martins, L. G. N., Acevedo, O. C., Degrazia, G. A., Teichrieb, C. A., Puhales, F. S., & Demarco, G. (2024)., Aplicação da análise de multiresolução no estudo da estrutura da turbulência sobre a Floresta Amazônica. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 46, esp. 2, e87600. <https://doi.org/10.5902/2179460X87600>