

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA TROCA LÍQUIDA ECOSSISTÊMICA EM TORRES DE MONITORAMENTO POR EDDY COVARIANCE NA AMÉRICA DO SUL

Heitor de Sousa Pantarotto¹; Samuel Almeida Dutra Júnior², Luiza Jardim Machado³ & Jamil Alexandre Ayach Anache⁴

Abstract: The global scenario of greenhouse gas emissions—particularly carbon dioxide (CO₂)—highlights the urgency of meeting the reduction targets established by various international agreements, such as the 2015 Paris Agreement. South America, a key contributor to global food security, is experiencing the effects of climate change, with an increasing number of extreme temperature and precipitation events. This study aimed to analyze the monitoring towers of Net Ecosystem Exchange (NEE) that use the Eddy Covariance (EC) methodology across South America. Data were obtained from the AmeriFlux and FLUXNET databases, identifying nine stations with at least twelve consecutive months of NEE records. The results showed that at more than half of the stations (five), the monitoring period was shorter than four years, and in two cases, shorter than two years. Regarding NEE values, areas with a greater presence of native vegetation had lower average NEE values compared to areas affected by human interventions or low vegetation density, indicating a carbon sink effect in vegetated regions. There is a need to expand the number of monitoring stations to cover different ecosystem types and to include studies involving additional environmental variables.

Resumo: O cenário das emissões de gases de efeito estufa no mundo, principalmente do dióxido de carbono (CO₂) reforça a urgência no cumprimento das metas de redução propostas por diversos acordos mundiais como o Acordo de Paris de 2015. A América do Sul, importante agente da segurança alimentar global, sofre com as mudanças climáticas, com registros crescentes de eventos extremos de temperatura e precipitação. O objetivo deste estudo foi analisar as torres de monitoramento da Troca Líquida Ecossistêmica (*Net Ecosystem Exchange* - NEE) que utilizam a metodologia *Eddy Covariance* (EC) na América do Sul. Os dados das estações foram extraídos da base de dados do Ameriflux e Fluxnet e foram encontradas nove estações com informações de NEE de pelo menos doze meses consecutivos. Os resultados mostraram que em mais da metade das estações (cinco) o período de monitoramento foi inferior a quatro anos, e que, em duas, foram menos de dois anos. Em relação aos valores de NEE, as áreas com maior presença de vegetação nativa tiveram valores menores médios de NEE em relação às áreas com intervenções humanas ou com baixa densidade vegetal, o que mostra atuação de sumidouro de carbono das áreas vegetadas. Há necessidade de ampliação da quantidade de estações de monitoramento para análise em diferentes tipos de ecossistemas e estudos incluindo outras variáveis ambientais.

Palavras-Chave – NEE, uso da terra, FLUXNET.

¹) Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Departamento de Hidráulica e Saneamento (heitor.pantarotto@usp.br)

²) Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Departamento de Hidráulica e Saneamento (samuel.dutrajr@usp.br)

³) Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Departamento de Hidráulica e Saneamento (luizajm@gmail.com)

⁴) Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Departamento de Hidráulica e Saneamento (jamil.anache@usp.br)

INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2025), a temperatura média global ultrapassou 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais (1850–1900), causada majoritariamente por atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e as práticas industriais e agropecuárias. Embora esse valor exceda o limite estabelecido pelo Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), a WMO ressalta que o não cumprimento do tratado somente será caracterizado caso esse patamar seja mantido por várias décadas. Ainda assim, o cenário atual reforça a urgência de avançar no cumprimento das metas de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Há décadas, a comunidade científica alerta sobre os impactos das mudanças climáticas, destacando a elevação da concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases (metano e óxido nitroso, por exemplo) como um dos principais fatores associados ao aquecimento global, sobretudo em decorrência da queima de combustíveis fósseis (Revelle e Suess, 1957; Nobre e Nobre, 2002). A esse processo somam-se práticas de degradação ambiental, como o desmatamento ilegal, que comprometem o balanço entre emissão e sequestro de CO₂, contribuindo para o acúmulo desse gás na atmosfera e para o aumento das temperaturas globais (Nobre e Nobre, 2002).

A América do Sul tem sido particularmente afetada por essas transformações, com o registro crescente de eventos extremos de temperatura e alterações nos regimes pluviométricos. A continuidade e intensificação desses fenômenos impõem desafios adicionais à produtividade dos setores agrícola, pecuário e pesqueiro, especialmente em uma região que desempenha papel estratégico na segurança alimentar global (Reyer et al., 2017).

Nesse contexto, o monitoramento contínuo das emissões e trocas de gases de efeito estufa torna-se um passo fundamental para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Compreender as dinâmicas dos fluxos de CO₂ e sua relação com os ecossistemas é essencial para embasar políticas públicas e estratégias de adaptação. Uma das principais metodologias empregadas para a quantificação desses fluxos é o método de *eddy covariance* (EC), amplamente utilizado por diversos pesquisadores (Garcia et al., 2017; Perez-Quezada et al., 2024; Dalmagro et al., 2022; Santos e Silva et al., 2024).

Baseado em princípios da micrometeorologia, o método EC permite a medição do fluxo de CO₂ entre a vegetação e a atmosfera, cobrindo áreas que variam de metros quadrados a quilômetros quadrados. Por sua precisão e abrangência espacial, essa técnica é considerada essencial para a estimativa da Troca Líquida Ecossistêmica (*Net Ecosystem Exchange* - NEE) (Hu et al., 2022).

Entre os principais repositórios de dados baseados nessa técnica, destacam-se o AmeriFlux e o Fluxnet. O primeiro reúne informações provenientes de estações de EC distribuídas pelo continente americano (Balocchi et al., 2001.), enquanto o segundo integra dados de redes regionais — incluindo o próprio AmeriFlux — e abrange diversas regiões do globo. No entanto, nem todos os dados disponíveis são atualizados continuamente, e algumas séries apresentam inconsistências ou falhas de medição.

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo quantificar e espacializar as estações com dados disponíveis de NEE na América do Sul, identificar o período de operação de

cada uma delas e apresentar a variação dos valores observados de NEE ao longo do respectivo período de monitoramento.

METODOLOGIA

Apesar do Fluxnet englobar informações do AmeriFlux, nem todas as estações estavam presentes na maior base de dados. Além disso, nem todos os dados estavam disponíveis no AmeriFlux. Portanto foram utilizadas estações das duas bases de informações. Foram selecionados dados do Ameriflux e do Fluxnet, com três critérios de escolha adotados para a seleção das estações, seguidos em sequência: 1. Estações necessariamente da América do Sul; 2. Estações com dados de NEE e 3. Dados de NEE com no mínimo 12 meses de informações.

Após a filtragem dos dados, foram selecionadas seis estações no Ameriflux e três no Fluxnet, totalizando nove estações. Elas estão distribuídas por quatro países da América do Sul, sendo eles: Argentina, Brasil, Chile e Peru (Figura 1). A Tabela 1 apresenta a localização (país e coordenadas geográficas, SIRGAS 2000) junto com os códigos das estações.

Tabela 1. Código, país e coordenadas geográficas

Código	País	Lat/long
AR-CCg	Argentina	-35.9244 / -61.1855
AR-TF	Argentina	-54.9733 / -66.7335
AR-Vir	Argentina	-28.2395 / -56.1886
BR-CST	Brasil	-7.9682 / -38.3842
BR-Npw	Brasil	-16.498 / -56.412
BR-Sa1	Brasil	-2.8567 / -54.9589
BR-Sa3	Brasil	-3.018 / -54.9714
CL-SDF	Chile	-41.883 / -73.676
PE-QFR	Peru	-3.8344 / -73.319

Figura 1. Espacialização das estações de monitoramento. Fonte: autor



Outra informação relevante para interpretação dos resultados que estão disponíveis na descrição de cada estação é o tipo de vegetação classificado pelo IGPB (International Geosphere-Biosphere Programme), que separa em 17 categorias de vegetação. Dentre elas, 6 estão presentes nas estações selecionadas (Tabela 2).

Tabela 2. Tipo de vegetação de cada estação.

Estação	Tipo	Descrição
AR-CC	GRA	Pastagem: Terras com cobertura herbácea. A cobertura arbórea e arbustiva é inferior a 10%. Terras húmidas permanentes com uma mistura permanente de água e vegetação herbácea ou lenhosa. A vegetação pode estar presente em água salgada, salobra ou doce.
AR-TF	WET	Áreas úmidas permanentes: Terrenos com uma mistura permanente de água e vegetação herbácea ou lenhosa que cobrem áreas extensas. A vegetação pode estar presente em água salgada, salobra ou doce.
AR-Vir	ENF	Florestas Perenes de folha aciculada: Terras dominadas por vegetação lenhosa com uma cobertura superior a 60% e altura superior a 2 metros. Quase todas as árvores permanecem verdes durante todo o ano. A copa nunca fica sem folhagem verde.
BR-CST	DNF	Florestas decíduas de folhas aciculadas: Terrenos dominados por vegetação

		lenhosa com uma cobertura superior a 60% e altura superior a 2 metros. Consistem em comunidades sazonais de árvores de folhas agulhadas com um ciclo anual de períodos de folhagem e queda de folhas.
BR-Npw	WSA	Savanas arborizadas: Terras com sistemas herbáceos e outros sistemas de sub-bosque, e com cobertura florestal entre 30-60%. A altura da cobertura florestal excede 2 metros.
BR-Sa1	EBF	Florestas de folhas largas perenes: Terras dominadas por vegetação lenhosa com uma cobertura superior a 60% e altura superior a 2 metros. Quase todas as árvores e arbustos permanecem verdes durante todo o ano. A copa nunca fica sem folhagem verde.
BR-Sa3	EBF	A mesma de BR-Sa1.
CL-SDF	EBF	A mesma de BR-Sa1.
PE-QFR	WET	A mesma de AR-TF.

Em relação ao tratamento dos dados, foram excluídos valores que não estejam no intervalo entre -50 e $+30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, pois representam extremos dos observados de NEE (Wutzler et al., 2018; Pastorello et al., 2020). Além disso, foram multiplicados os valores de NEE por fator de conversão diário, 1.037, visando a transformação dos valores para $\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Fluxnet, 2025), para obter resultados em função de massa de carbono capturada ou emitida por estação.

Os arquivos foram organizados em planilhas contendo as médias mensais dos valores de NEE, juntamente com os respectivos meses e anos das medições, para posterior análise e geração de gráficos utilizando a linguagem de programação *Python*.

Toda a estrutura metodológica é resumida no fluxograma a seguir (Figura 2).

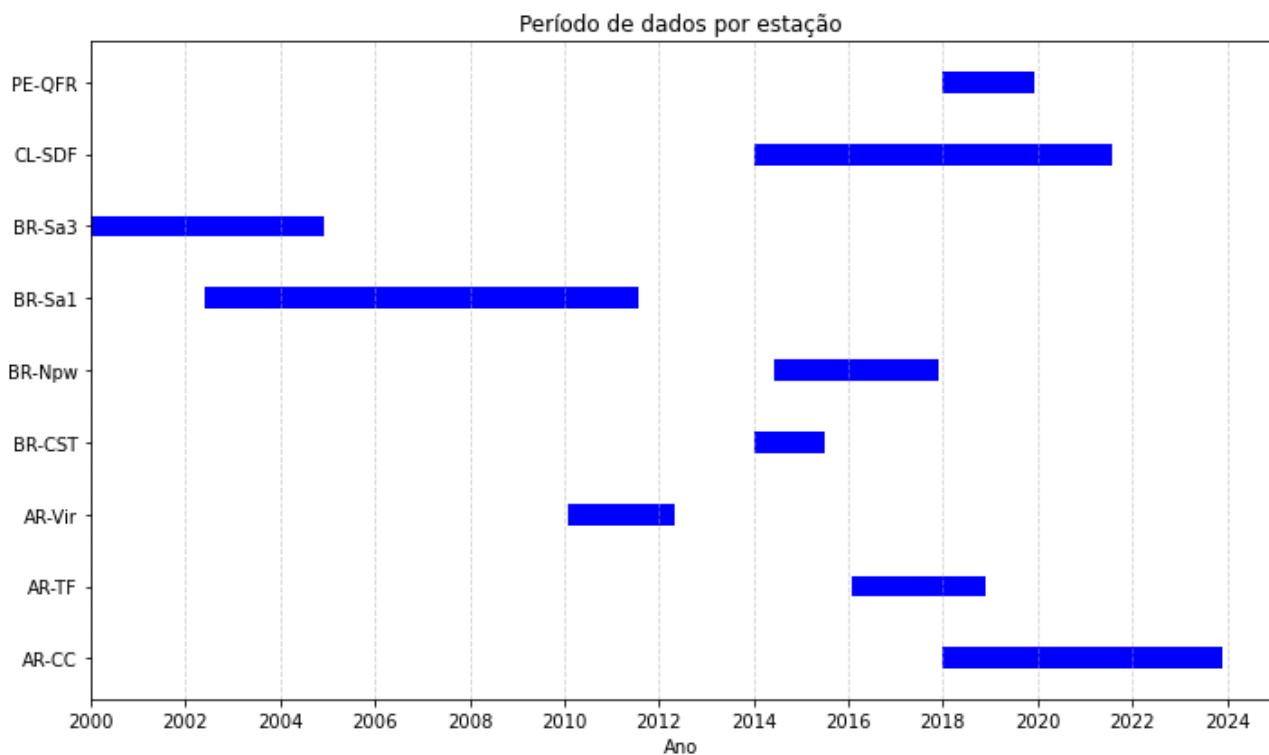
Figura 2. Fluxograma das metodologias utilizadas no trabalho. Fonte: autor.



RESULTADOS

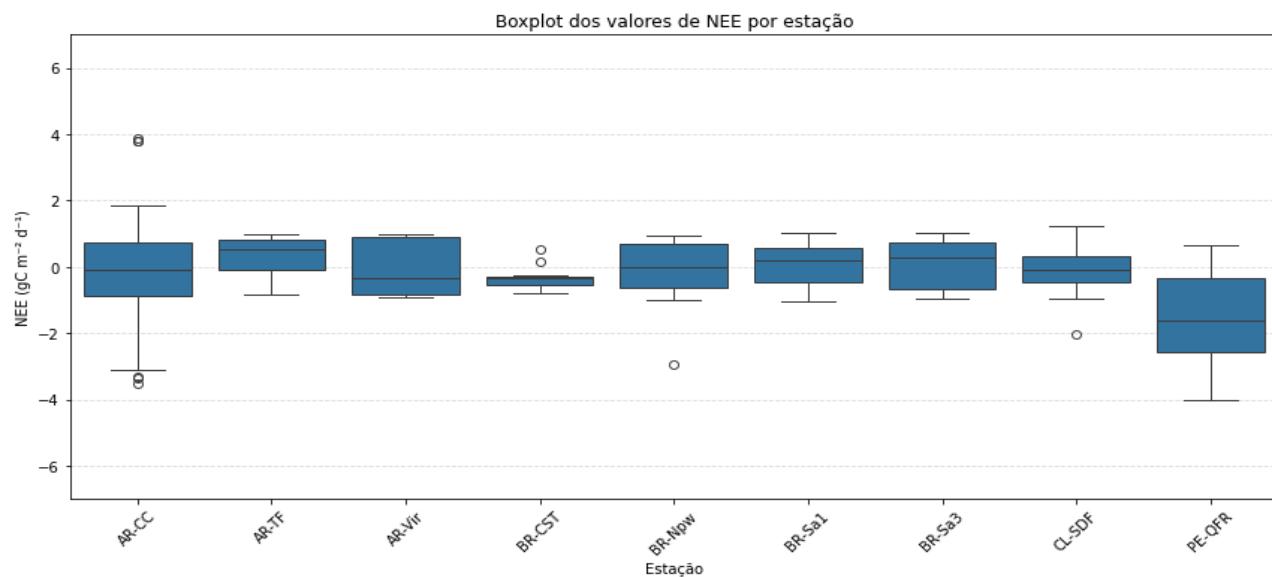
Um dos primeiros aspectos a serem destacados refere-se ao espaçamento temporal das atividades de monitoramento nas nove estações analisadas. Mais da metade das estações (cinco) apresentou séries temporais inferiores a quatro anos, sendo que duas delas foram monitoradas por, no máximo, dois anos. Apenas as estações BR-Sa1, AR-CC e CL-SDF mantiveram registros contínuos por um período igual ou superior a seis anos (Figura 3).

Figura 3. Períodos de monitoramento por estação. Fonte: autor (2025).



Em relação aos valores de NEE obtidos, foi gerado um gráfico box plot (Figura 4) dos resultados medidos pelas estações e apenas três tiveram mediana positiva, entretanto variaram entre negativos em algumas medições.

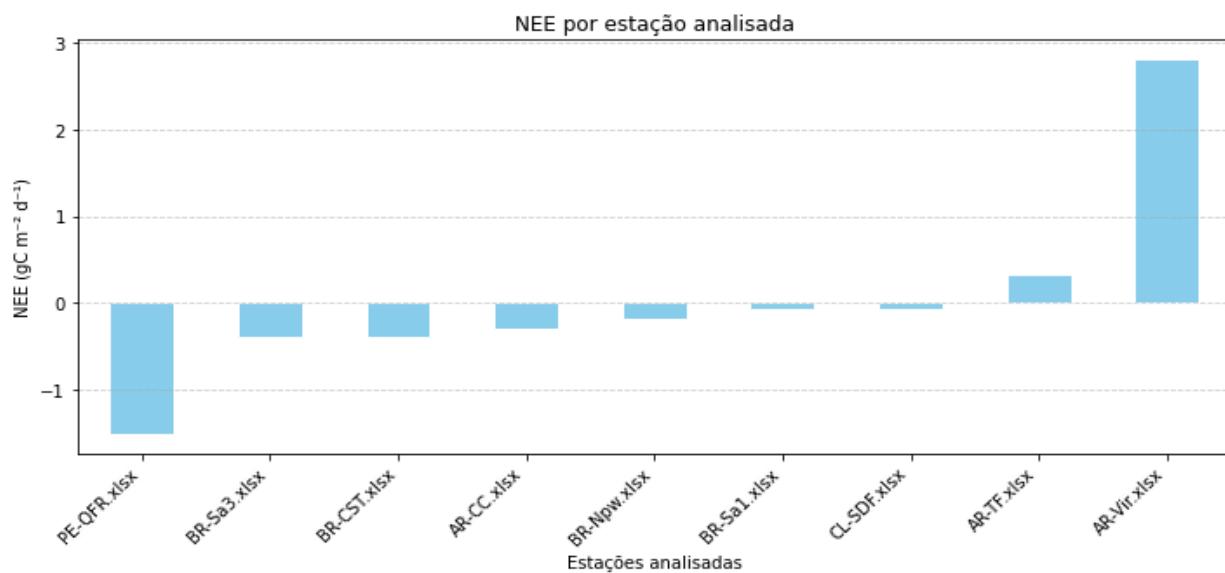
Figura 4. Boxplot com os valores de NEE por estação. Fonte: autor (2025).



Esse resultado corrobora com a afirmação de que em áreas naturais, a vegetação atua como sumidouro de carbono ao invés de fonte (Balocchi; Chu; Reichstein, 2018). Por exemplo, ao analisar os valores médios por estação (Figura 5), nota-se duas estações de destaque: PE-QFR e AR-Vir. A primeira, com valores médios negativos, está localizada em área definida como úmida permanente (WET) e possui vegetação nativa preservada, mantendo valores de NEE negativos. Ou seja, atua como sumidouro de carbono.

Entretanto, a segunda (AR-Vir), mesmo sendo definida como área de Floresta Perene de Folha Aciculada (ENF), está presente em uma área de plantação de ocupação humana (silvicultura), com ciclos de plantação, manejo e colheita. Devido à ausência de vegetação nativa, o NEE médio monitorado pela estação foi positivo, ou seja, atuando como fonte de carbono.

Figura 5. Valores médios de NEE por estação. Fonte: autor.



CONCLUSÕES

O estudo analisou nove estações de monitoramento de dióxido de carbono em quatro diferentes países da América do Sul. Foram analisados os períodos de medição de cada, além do Net Ecosystem Exchange (NEE) para entender se as áreas de estudo atuam como fonte ou sumidouro de carbono.

Mais da metade das estações (cinco) realizaram monitoramento por menos de quatro anos, o que mostra ausência de continuidade das medições de gases no continente sul-americano, tão importante para a produção de alimentos no contexto global. Além disso, destaca-se a quantidade total de estações com dados disponíveis, com falta de monitoramento em importantes biomas brasileiros, como Cerrado e Mata Atlântica, o que reforça a necessidade de instalação de novas torres de monitoramento em diferentes regiões e manutenção das mesmas para obtenção de dados mais precisos e a longo prazo.

Outra importante observação realizada foi a presença de NEE negativo em áreas vegetadas, atuando como armazenadoras de carbono, o contrário do que apresentaram áreas com baixa

presença de vegetação e atividades humanas, que tiveram valores positivos de NEE, atuando como fonte de carbono durante o período monitorado. Apesar dos baixos períodos de monitoramento e quantidade de estações, o trabalho mostra a importância da manutenção de vegetação nativa para redução de gases de efeito estufa na atmosfera,

A necessidade de inserção de outras variáveis meteorológicas como temperatura, pressão de vapor e radiação solar, além de características da vegetação como respiração ecossistêmica e produção primária bruta para melhor entendimento da dinâmica do fluxo de gases das regiões analisadas.

REFERÊNCIAS

BALDOCCHI, D. et al (2001). *FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities*. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 82, n. 11, p. 2415-2434.

BALDOCCHI, D.; CHU, H.; REICHSTEIN, M (2018). *Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: A review*. Agricultural and Forest Meteorology, v. 249, p. 520-533.

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (UNFCCC). (2015) *The Paris Agreement*. Bonn: UNFCCC Secretariat, 2016. FCCC/CP/2015/10/Add.1. Edição comemorativa. Disponível em: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang_en. Acesso em: 11 jun. 2025.

DALMAGRO, H. J. et al (2022). *Net carbon dioxide exchange in a hyperseasonal cattle pasture in the northern Pantanal wetland of Brazil*. Agricultural and Forest Meteorology, v. 324, p. 109099.

FLUXNET (2015). *FLUXNET: A global network of micrometeorological tower sites*. Disponível em: <https://fluxnet.org>. Acesso em: 11 jun. 2025.

GARCÍA, A. G. et al (2017). *Patterns and controls of carbon dioxide and water vapor fluxes in a dry forest of central Argentina*. Agricultural and Forest Meteorology, v. 247, p. 520-532.

HU, Y. et al (2022). *Research progress and prospects of ecosystem carbon sequestration under climate change (1992–2022)*. Ecological Indicators, v. 145, p. 109656.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. (2002). *O balanço de carbono da Amazônia brasileira*. Estudos avançados, v. 16, p. 81-90.

PASTORELLO, G. et al. (2020). *The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data*. Sci Data 7, 225. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>

PEREZ-QUEZADA, J. F. et al (2024). *Comparison of carbon and water fluxes and the drivers of ecosystem water use efficiency in a temperate rainforest and a peatland in southern South America*. Biogeosciences, 21, 1371–1389.

REYER, C. P.O et al (2017). *Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development*. *Regional Environmental Change*, v. 17, p. 1601-1621.

REVELLE, R; SUESS, H. E. (1957). *Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades*. *Tellus*, v. 9, n. 1, p. 18-27.

SANTOS e SILVA, C.M. et al (2024). *Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO₂ exchanges in a tropical semiarid environment*. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 345, p. 109829.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). (2025). *WMO confirms 2024 warmest year on record – about 1.5°C above pre-industrial level*. Genebra, 5 jan. 2025. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 11 jun. 2025.

WUTZLER, T. et al. (2018) *Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc*. *Biogeosciences*, v. 15, n. 16, p. 5015-5030..

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Processo n. 88887.955690/2024-00), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento (PPG-SHS) e Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).