

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Estimativas do metabolismo aquático a partir da razão estequiométrica

O₂–CO₂ no Reservatório do Passaúna

Pedro G. Grochocki Gabriel¹ ; Michael Mannich²

Resumo: A razão entre os desvios do oxigênio (O₂) e do dióxido de carbono (CO₂) dissolvidos em relação ao equilíbrio atmosférico representa uma métrica integrada do metabolismo aquático, expressando a estequiometria característica do ecossistema. Este estudo teve como objetivo quantificar essa relação no reservatório do Passaúna (PR, Brasil), com base em um mês de monitoramento contínuo e de alta frequência. As concentrações de CO₂ dissolvido foram medidas a cada minuto por meio de um equilibrador de gás acoplado a um sensor infravermelho NDIR, enquanto sensores MiniDOT registraram o O₂ dissolvido simultaneamente. Os dados foram processados para calcular os desvios em relação ao equilíbrio com a atmosfera, conforme a abordagem de Vachon et al. (2021). A estequiometria metabólica foi estimada pela regressão dos déficits de O₂ versus CO₂, resultando em uma razão de 0,34, indicando um predomínio de processos heterotróficos no sistema, com produção de CO₂ excedendo o consumo de O₂, possivelmente associada a baixa atividade fotossintética ou a processos anaeróbios. A análise do núcleo de distribuição dos dados revelou um sistema consistentemente respiratório, com forte acoplamento entre os desvios de O₂ e CO₂ e baixa influência de processos físicos ou não biológicos na dinâmica observada. Os resultados indicam que a relação entre O₂ e CO₂ dissolvidos permite interpretar o balanço metabólico do sistema ao longo do tempo, contribuindo para a compreensão dos processos que regulam o funcionamento biogeoquímico do ecossistema aquático.

Palavras-Chave – Metabolismo aquático; gases dissolvidos; fotossíntese;

1. Introdução

Historicamente, o oxigênio dissolvido tem sido o principal parâmetro utilizado para inferência do metabolismo aquático (Cole et al., 2000; Staehr et al., 2010). Embora eficaz, o uso exclusivo de O₂ apresenta limitações, como a dificuldade de capturar processos anaeróbios, interferência de fluxos físicos e sensibilidade à parametrização da reaeração atmosférica (Hanson et al., 2003; Holtgrieve et al., 2010; Van de Bogert et al., 2007).

O CO₂ dissolvido surge como variável complementar fundamental. Como produto da respiração, fornece uma leitura da decomposição da matéria orgânica (McDowell et al., 2020; Raymond et al., 2013). Sua baixa solubilidade e dinâmica conhecida de troca gasosa permitem avanços no entendimento dos fluxos de carbono em águas interiores (Weyhenmeyer, 2015).

¹) Universidade Federal do Paraná – Curitiba-PR, (41) 99602-0412, pedrogrochocki@ufpr.br

²) Universidade Federal do Paraná – Curitiba-PR, (41) 99602-0412, mannich@ufpr.br

A abordagem estequiométrica entre O_2 e CO_2 , proposta por Vachon et al. (2021), baseia-se na relação linear entre os déficits desses gases em relação à saturação atmosférica, refletindo a dominância de processos autotróficos ou heterotróficos (Del Giorgio & Cole, 1998).

Apesar da robustez conceitual, aplicações empíricas ainda são escassas. No Brasil, os estudos sobre metabolismo aquático em ecossistemas lóticos e lênticos concentram-se predominantemente na análise do OD, geralmente por meio de medições pontuais ou de baixa frequência. Essa limitação metodológica restringe a compreensão detalhada da dinâmica metabólica em alta resolução temporal, especialmente em ambientes tropicais e eutróficos, onde a variabilidade nictemeral pode ser intensa. Estudos que utilizam sensores de alta frequência para o monitoramento acoplado e simultâneo de OD e pCO_2 ainda são escassos, o que representa uma lacuna importante para o avanço do conhecimento nessa área.

Marotta et al. (2020), por exemplo, empregaram sondas multiparamétricas automáticas no projeto PELD-Baía de Guanabara, realizando medições contínuas em escala horária de O_2 e CO_2 dissolvidos. As coletas ocorreram em pontos fixos da baía, evidenciando a variabilidade nictemeral e a predominância do metabolismo heterotrófico.

De forma semelhante, Brighenti (2014) monitorou lagos tropicais da bacia do rio Doce (MG) por meio de sensores automáticos que registravam OD continuamente, estimando metabolismos diel a partir da saturação e dessaturação do oxigênio. A autora ressaltou que, embora o monitoramento do OD seja mais difundido, o uso direto de sensores para pCO_2 é ainda limitado no país, e muitas estimativas metabólicas ainda dependem exclusivamente da variação do oxigênio dissolvido.

Tonetta (2016) também combinou dados de OD obtidos por sensores de alta frequência com modelagem metabólica diel em lagos da Mata Atlântica, apontando para a escassez de sensores acessíveis para pCO_2 e enfatizando a necessidade da integração entre variáveis físicas, químicas e biológicas para uma avaliação mais completa dos processos metabólicos aquáticos.

No reservatório de Ribeirão das Lajes (RJ), Teixeira (2022) aplicou monitoramento físico-químico automatizado a cada 15 minutos, utilizando sensores Hydrolab e Ott para medir parâmetros como o oxigênio dissolvido. Contudo, o pCO_2 foi estimado indiretamente a partir de dados de pH e alcalinidade.

Marotta et al. (2012) foram pioneiros na aplicação de alta frequência para registrar variações horárias tanto de pCO_2 quanto de OD na Lagoa Rodrigo de Freitas (RJ). Eles empregaram sensores portáteis acoplados a técnicas de medição do fluxo difusivo baseadas nos gradientes de concentração, avaliando as trocas gasosas entre a água e a atmosfera, o que contribuiu para a compreensão das dinâmicas metabólicas em escala temporal fina.

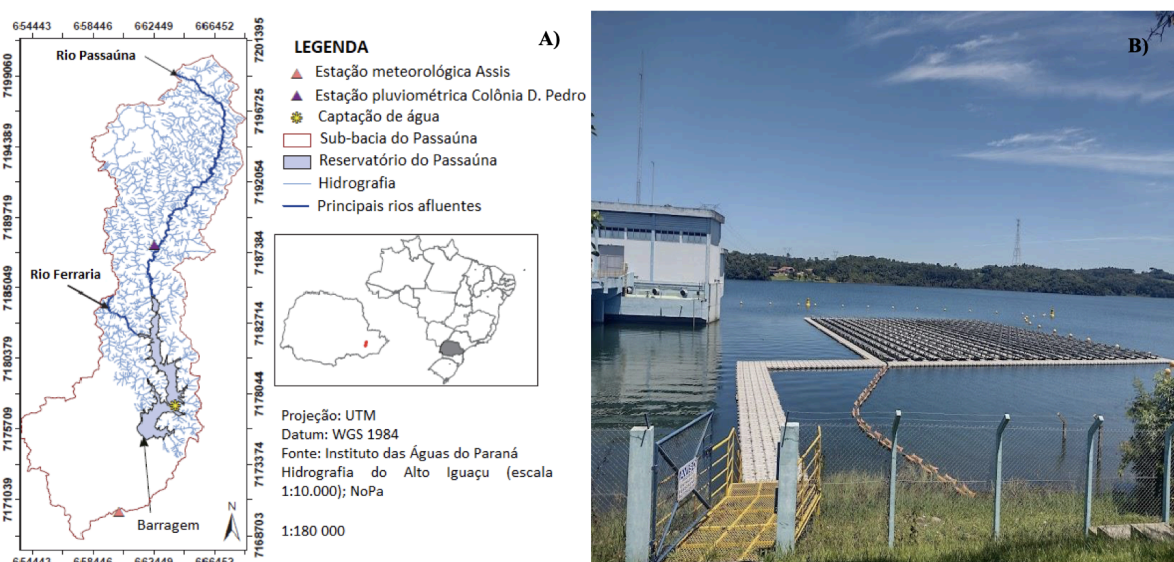
Neste contexto, o presente estudo aplica a estequiometria de ecossistemas aquáticos a partir de medidas conjugadas de O_2 – CO_2 no reservatório do Passaúna, situado na Região Metropolitana de Curitiba (PR), sob influência de painéis solares flutuantes. A hipótese central é que a razão $\Delta O_2/\Delta CO_2$ permite inferir o metabolismo integrado ao longo do tempo sob condições de baixa radiação solar induzida pelos painéis.

2. Métodos

Área de Estudo

O Reservatório do Passaúna está localizado na Região Metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná, sul do Brasil, e constitui um importante manancial para o abastecimento público, atendendo cerca de 800 mil habitantes (Sanepar, 2023). Inaugurado em 1990, o reservatório possui características típicas de ecossistemas subtropicais, com profundidade média de 8 metros, área de aproximadamente 9,5 km² e ocorrência de estratificação térmica moderada nos períodos mais quentes do ano (Zanona, 2024). Desde 2022, uma planta piloto de sistema fotovoltaico flutuante (FPV) foi implantada em uma área central do reservatório, abrangendo cerca de 0,5 hectare (Figura 1). A instalação foi estrategicamente posicionada nas proximidades da estrutura de captação de água bruta, com o objetivo de reduzir os custos operacionais de bombeamento, ao possibilitar o fornecimento direto de energia elétrica à estação de captação (Sanepar, 2023).

Figura 1 – Localização da área de estudo (Zanona, 2024).



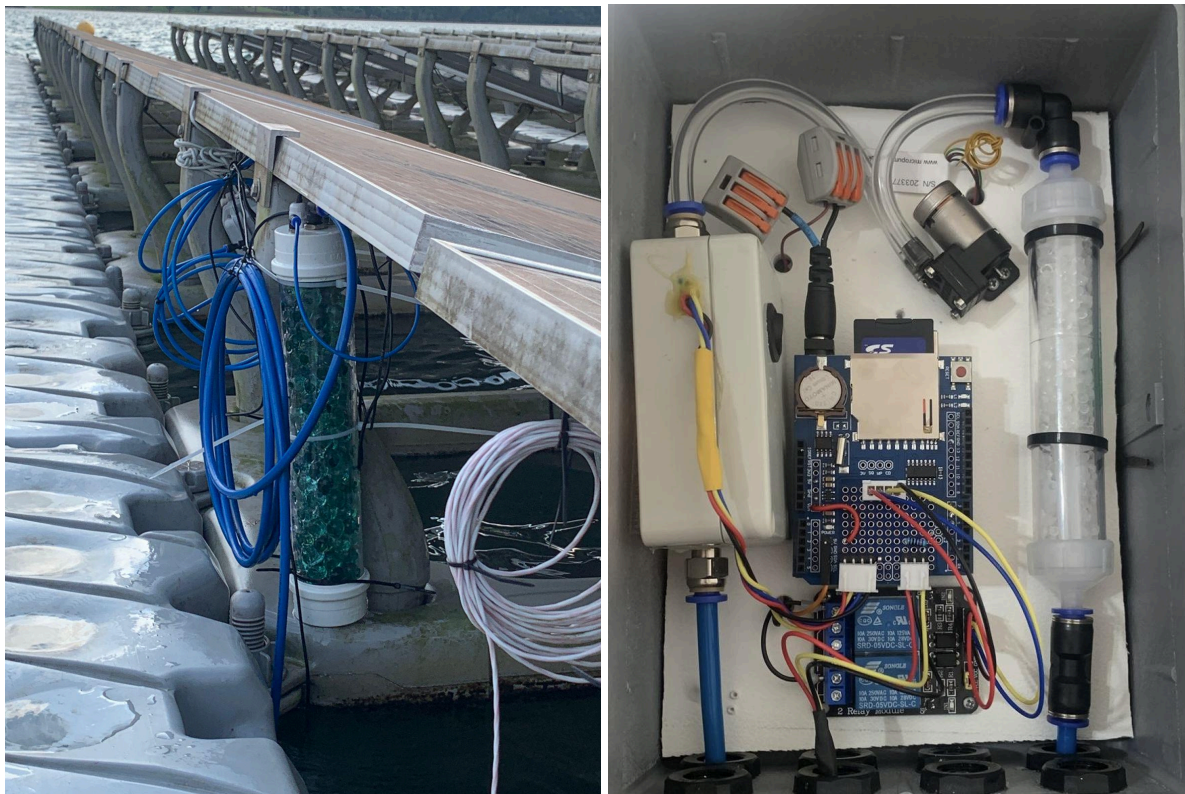
As medições de oxigênio dissolvido (OD) e temperatura da água foram realizadas com o uso de um sensor MiniDOT (Precision Measurement Engineering), instalado a 0,5 m de profundidade sob um sistema de painéis fotovoltaicos flutuantes (FPV). O sensor foi programado para registrar dados com frequência de 1 minuto ao longo de todo o período de monitoramento.

Equilibrador

Paralelamente, a concentração de dióxido de carbono dissolvido (pCO₂) foi monitorada utilizando um equilibrador do tipo marble, projetado com base no modelo descrito por Frankignoulle (2001). O equilibrador consistia em um cano de acrílico transparente com 40 cm de altura e 75 mm de diâmetro interno, preenchido com esferas de vidro (*marbles*) com diâmetros entre 12 e 16 mm (Figura 2a). As esferas aumentam a área de superfície líquida, facilitando a troca gasosa entre a água e a fase de cabeça, permitindo o estabelecimento do equilíbrio de CO₂ entre as duas fases.

O sistema de aquisição de dados foi construído com um microcontrolador Arduino Uno, programado para registrar leituras do sensor infravermelho não dispersivo (NDIR) K30 (SenseAir), com resolução de até ± 30 ppm (Figura 2b). O gás do *headspace* era continuamente recirculado por uma bomba peristáltica de baixo fluxo (~ 500 mL min^{-1}) através de um circuito fechado, passando por um cartucho de secagem preenchido com sílica gel para remoção da umidade, garantindo estabilidade na leitura do sensor.

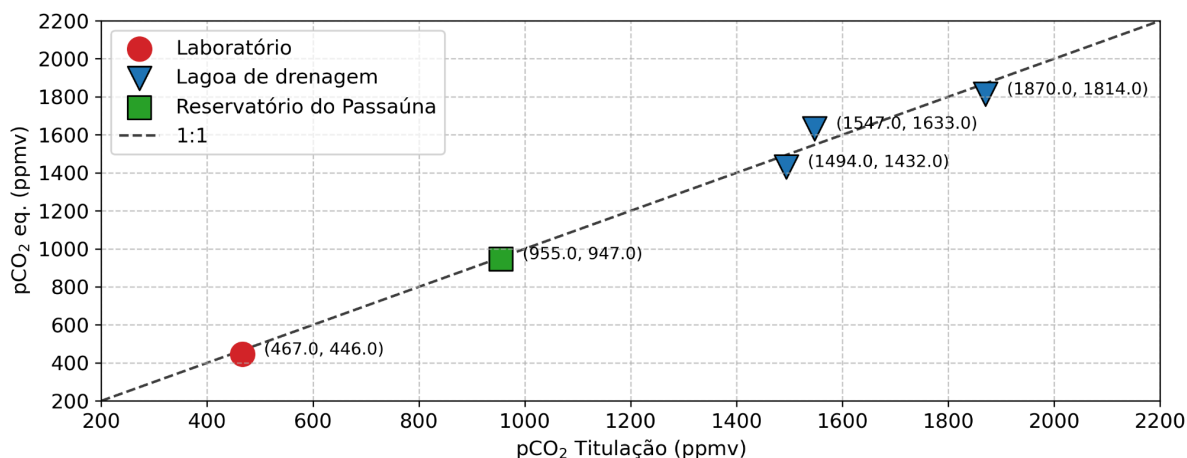
Figura 2:



Para calibração e validação do sistema, foram realizadas medições em diferentes locais, cobrindo gradientes ambientais com diferentes concentrações de CO_2 dissolvido. Nessas ocasiões, amostras de água foram coletadas e analisadas por titulação alcalimétrica após acidificação, conforme descrito por Stumm e Morgan (1996), permitindo estimativas da concentração de CO_2 . Os valores obtidos por titulação foram comparados às estimativas geradas pelo equilibrador, resultando em boa concordância nos ambientes testados (Figura 3).

A concentração de CO_2 dissolvido no sistema do equilibrador foi calculada com base na concentração de CO_2 na fase gasosa em equilíbrio e na temperatura da água, utilizando a constante de Henry ajustada para a temperatura observada, conforme descrito por Weiss (1974).

Figura 3: Resultados da medição in-situ (pCO_2 eq.) em comparação com o resultado das titulações em laboratório (pCO_2 Titulação) (Gabriel, 2023).



Regressão O₂ – CO₂ e inferência metabólica

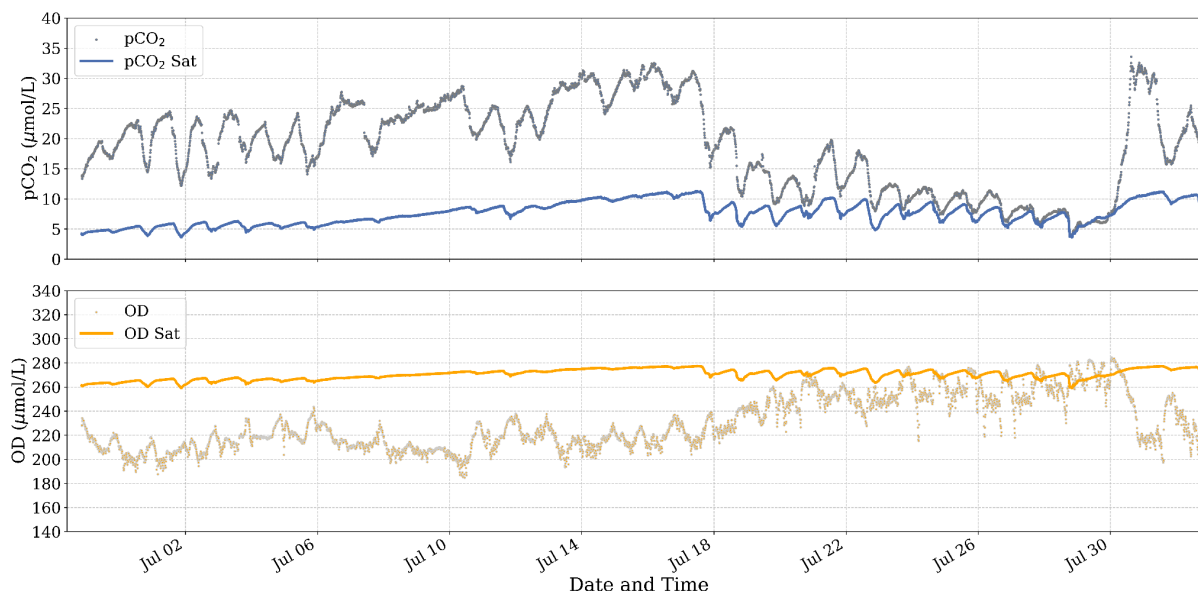
Os pares de ΔO_2 e ΔCO_2 foram plotados em gráficos de dispersão, conforme metodologia descrita por Vachon et al. (2021). A inclinação da reta de regressão ajustada aos dados representa a razão molar média dos gases, assumindo que alterações simultâneas refletem predominantemente processos biológicos acoplados (fotossíntese ou respiração).

3. Resultados

As concentrações de OD e pCO₂, bem como seus respectivos níveis de saturação, exibiram padrões distintos ao longo do período de monitoramento (Figura 4). Observa-se que as concentrações de pCO₂ apresentaram forte variação diurna, com valores variando de aproximadamente 5 a 35 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Em contraste, os valores de pCO₂ em equilíbrio com a atmosfera (pCO₂ sat) permaneceram relativamente estáveis, entre 5 e 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$, variando majoritariamente com a temperatura, evidenciando um padrão sistemático de supersaturação. Este comportamento é indicativo de um sistema dominado por processos respiratórios e/ou degradação microbiana da matéria orgânica, os quais resultam na liberação contínua de CO₂ para a coluna d'água (Staehr et al., 2010; Marzolf et al., 1994).

Em relação ao OD, os dados indicam valores persistentemente abaixo da saturação ao longo de todo o período, com concentrações oscilando entre 180 e 280 $\mu\text{mol L}^{-1}$, enquanto os valores de saturação mantiveram-se acima de 260 $\mu\text{mol L}^{-1}$. O déficit constante de OD, mesmo durante os períodos diurnos, sugere limitação da produção primária e predomínio de processos de consumo de oxigênio, como respiração e oxidação de matéria orgânica (Cole et al., 2000; Duarte & Prairie, 2005).

Figura 4: Séries de pCO_2 e OD e da saturação dos gases em Julho de 2024 no reservatório Passáuna.

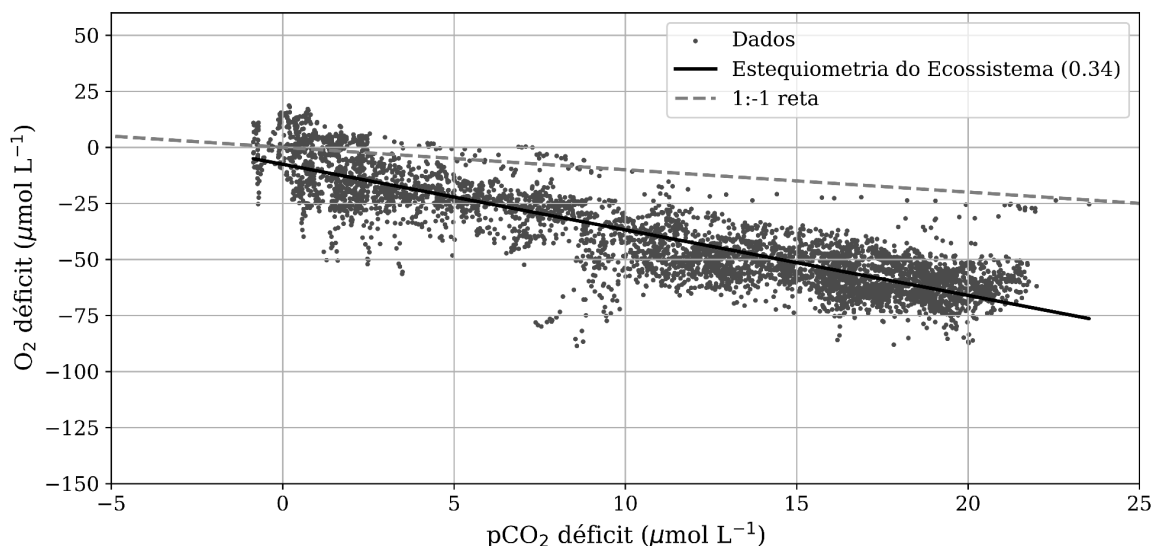


Déficits acoplados de O_2 e CO_2 e estequiometria do metabolismo

A relação entre os déficits de pCO_2 ($pCO_2 - pCO_{2\ sat}$) e OD ($OD - OD_{sat}$), calculados com base nas respectivas saturações, é apresentada na Figura 5. A dispersão dos dados revela uma tendência linear negativa, cuja regressão ajustada apresenta coeficiente angular de -0,34. Esse valor representa a razão molar entre o consumo de oxigênio e a produção de CO_2 , e é substancialmente inferior à razão 1:-1 esperada para processos estequiometricamente equilibrados de fotossíntese e respiração (Van Dam et al., 2020).

A inclinação inferior a 1 sugere que os processos respiratórios predominam sobre a produção primária, caracterizando um metabolismo heterotrófico no qual o consumo de OD não é completamente compensado pela fixação de carbono. Além disso, a linha 1:-1 traçada na figura, correspondente ao equilíbrio estequiométrico ideal, destaca o desvio metabólico do sistema estudado. Valores semelhantes de estequiometria (entre -0,3 e -0,6) já foram observados em reservatórios subtropicais com alta carga de matéria orgânica e baixa transparência da água (Roland et al., 2017).

Figura 5: déficit de equilíbrio atmosférico para O_2 e CO_2 (medidas a cada 1 minuto)



Potenciais impactos dos painéis fotovoltaicos flutuantes

A presença de painéis solares fotovoltaicos flutuantes (FPV) pode exercer influência significativa sobre os padrões observados. A cobertura da superfície do reservatório pelos FPVs reduz a incidência de radiação solar na coluna d'água, limitando a taxa de fotossíntese e, consequentemente, a produção de oxigênio. Essa redução pode explicar a persistência de déficits de OD mesmo em períodos tipicamente dominados pela produção primária. Estudos anteriores demonstraram que sistemas sob cobertura parcial com FPV apresentam declínio na produtividade líquida e na biomassa fitoplancônica (Liu et al., 2020; Zhao et al., 2022).

Além disso, os FPVs podem afetar a dinâmica térmica e a estratificação do corpo d'água, alterando o gradiente vertical de temperatura e reduzindo a mistura entre camadas. Essa estratificação pode favorecer o acúmulo de CO_2 em profundidades intermediárias, especialmente em locais com baixa ventilação e menor taxa de difusão de gases para a atmosfera. Também é importante considerar que a cobertura física dos FPVs reduz a área efetiva para trocas gasosas, o que pode acentuar ainda mais os padrões de supersaturação de CO_2 .

4. Conclusão

Este estudo demonstrou a aplicabilidade do método da estequiometria para inferir o metabolismo aquático em um ambiente subtropical de reservatório sob influência de estruturas flutuantes. A partir de medições simultâneas e de alta frequência de oxigênio e dióxido de carbono dissolvidos, foi possível calcular os déficits em relação à saturação e aplicar a abordagem de regressão $\Delta O_2 / \Delta CO_2$ proposta por Vachon et al. (2021). A razão molar observada de -0,34 indica que os processos autotróficos, embora presentes, ocorrem de forma moderada, sugerindo um sistema dominado por respiração ou por fotossíntese limitada devido a condições ambientais particulares devido ao sombreamento causado pela presença de painéis fotovoltaicos flutuantes.

A inclinação inferior à razão estequiométrica clássica da fotossíntese (-1.0) indica um desacoplamento parcial do metabolismo do ecossistema, apontando para a coexistência de múltiplos processos biogeoquímicos modulando a dinâmica dos gases dissolvidos. A utilização de dados com alta resolução temporal foi crucial para capturar flutuações rápidas e processos transitórios que frequentemente escapam às abordagens convencionais baseadas em balanços diários de oxigênio ou fluxos de interface água-ar.

Os resultados deste trabalho reforçam o potencial do uso combinado de sensores de baixo custo e de métodos estequiométricos como ferramentas eficazes para investigar o funcionamento de ecossistemas aquáticos submetidos a pressões antrópicas recentes, como a implantação de tecnologias de geração de energia renovável. Ademais, os achados sugerem que a instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes pode interferir significativamente nos padrões locais de metabolismo, exigindo avaliações cuidadosas quanto a seus impactos ecológicos, especialmente em corpos d'água destinados ao abastecimento público.

Como perspectivas para pesquisas futuras, recomenda-se comparar as razões estequiométricas entre áreas localizadas sob os painéis fotovoltaicos flutuantes e regiões mais afastadas, a fim de identificar possíveis gradientes espaciais na atividade metabólica e nas trocas gasosas. Além disso, é pertinente investigar as variações sazonais da razão $\Delta O_2/\Delta CO_2$ em diferentes profundidades, considerando o papel da estratificação térmica na modulação dos processos de produção e respiração. Por fim, sugere-se integrar essa abordagem com medições de clorofila-a, turbidez e luz subaquática, de modo a quantificar o efeito direto do sombreamento sobre a fotossíntese e a eficiência metabólica do ecossistema.

REFERÊNCIAS

- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. Wiley-Interscience.
- Weiss, R. F. (1974). "Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas." *Marine Chemistry*, 2(3), 203–215.
- McDowell, M. J., & Johnson, M. S. (2018). Gas transfer velocities evaluated using carbon dioxide as a tracer show high streamflow to be a major driver of total CO₂ evasion flux for a headwater stream. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(7), 2183-2197.
- Frankignoulle, M., Borges, A., & Biondo, R. (2001). A new design of equilibrator to monitor carbon dioxide in highly dynamic and turbid environments. *Water Research*, 35(5), 1344-1347.

VACHON, Damien; BATTIN, Tom J.; COLE, Jonathan J.; PRAIRIE, Yves T.; KELLY, Paul T. Paired O₂–CO₂ measurements provide emergent insights into aquatic ecosystem function. *Limnology and Oceanography Letters*, [S.l.], v. 5, n. 5, p. 397–406, 2020.

CHU, Ying-Chun; YANG, Yung-Yi; CHENG, Chih-Hsiang. Impacts of a floating photovoltaic system on temperature and water quality in a shallow tropical reservoir. *Limnology*, [S.l.], v. 23, p. 279–288, 2022.

ILGEN, Konstantin; MEERHOFF, Erika; KASPER, Daniel; ENGELHARDT, Christin; MESSENGER, Christophe; KLEIN, Laura. The impact of floating photovoltaic power plants on lake water temperature and stratification. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 13, p. 1331, 2023.

STAEHR, Peter A.; BADE, Darren L.; VAN DE BOGERT, Matthew C.; KOCH, Gregory R.; WILLIAMSON, Craig; HANSON, Paul C.; COLE, Jonathan J.; KRATZ, Timothy K. Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, [S.l.], v. 8, n. 11, p. 628–644, nov. 2010. DOI: 10.4319/lom.2010.8.0628.

ROLAND, Fábio; VIDAL, Luciana O.; PACHECO, Felipe S.; BARROS, Nathan O.; ASSIREU, Arcilan; OMETTO, Jean P.H.B.; CIMBLERIS, André C.P.; COLE, Jonathan J. Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences*, [S.l.], v. 72, n. 4, p. 563–575, dez. 2010. DOI: 10.1007/s00027-010-0140-0.

Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., McDowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., ... & Melack, J. (2007). Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10, 172-185.

STAEHR, Peter A. et al. Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, v. 8, n. 11, p. 628–644, nov. 2010. DOI: 10.4319/lom.2010.8.0628.

Weyhenmeyer, G. A., Kosten, S., Wallin, M. B., Tranvik, L. J., Jeppesen, E., & Roland, F. (2015). Significant fraction of CO₂ emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs. *Nature Geoscience*, 8(12), 933-936.

Del Giorgio, P. A., & Cole, J. J. (1998). Bacterial growth efficiency in natural aquatic systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1), 503-541.

ZANONA, V. R. M.; RIGOTTI, J. A.; MANNICH, M.; BLENINGER, T. B. Avaliação das taxas de sedimentação em um reservatório com sistema fotovoltaico flutuante (FPV). 2024.

Gabriel, P. G. G., & Mannich, M. (2023). Desempenho de equilibradores para a medição in-situ de CO₂ dissolvido em águas interiores. *Anais do XXV SBRH – Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Sergipe, Brasil. ISSN 2318-0358.

Marotta, H., et al. "Biomonitoramento contínuo de águas do peld-baía de guanabara: intensa variação nictemeral de gases metabólicos na condição eutrófica tropical." *Oecologia Australis* 24.2 (2020): 365-388.

Brighenti, L. S.. "Uso de sensores de alta frequência para estimativas contínuas de metabolismo e monitoramento em lagos tropicais." (2014).

Tonetta, D. (2016). Fatores controladores do metabolismo aquático em lagos de Mata Atlântica.

Teixeira, G. Z. (2022). Monitoramento de alta frequência no reservatório de Ribeirão das Lajes: análise da estabilidade térmica e química da coluna d'água entre os anos de 2018 a 2020.

Marotta, H., Ricci, R. M. P., Sampaio, P. L., Melo, P. P. D., & Enrich-Prast, A. (2012). Variações de curto prazo do metabolismo e da pCO₂ na Lagoa Rodrigo de Freitas: elevado dinamismo em um ecossistema tropical urbano. *Oecologia Australis*, 16(3), 391-407.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001