

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

Reducindo Lacunas no Entendimento dos Efeitos de Sistemas Fotovoltaicos

Flutuantes sobre o Oxigênio Dissolvido: Foco nos Processos Físicos usando o método da regressão noturna

Pedro G. Grochocki Gabriel¹; Michael Mannich²

Resumo: A rápida expansão dos sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPVs) em corpos d'água tem despertado preocupações sobre seus impactos ambientais, especialmente sobre o oxigênio dissolvido (OD), um indicador-chave da qualidade da água. Embora já se conheçam os efeitos de FPVs sobre a evaporação e a temperatura da água, os impactos sobre os processos físicos que regulam a troca de gases com a atmosfera permanecem pouco compreendidos. Este estudo avalia como os FPVs afetam a taxa de reaeração na interface ar-água. Para isso, aplicou-se o método da regressão noturna, que estima a taxa de reaeração com base na queda do OD durante a noite, em séries temporais de alta resolução coletadas ao longo de oito meses no Reservatório do Passaúna (PR, Brasil), sob diferentes condições de vento. O método foi aprimorado com a aplicação de suavização LOESS (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*) para minimizar ruídos e oscilações espúrias nas séries de OD. Os resultados revelam que a presença dos FPVs modifica significativamente a taxa de troca de oxigênio em relação às áreas descobertas, com variações tanto positivas quanto negativas, especialmente em condições de vento fraco. Esses achados evidenciam a sensibilidade da reaeração a alterações físicas induzidas por FPVs e reforçam a necessidade de considerar esses efeitos no licenciamento ambiental e no planejamento de novas instalações.

Palavras-Chave – Sistemas fotovoltaicos flutuantes, Reaeração, Reservatórios

1. Introdução

Sistemas fotovoltaicos flutuantes (FPVs do inglês Floating Photovoltaic) emergiram como uma solução promissora para ampliar a geração de energia solar, aproveitando superfícies de corpos hídricos artificiais e naturais (Spencer et al., 2019; Liu et al., 2021). Tais sistemas oferecem benefícios tais como a geração de energia e redução da evaporação da água, sendo particularmente vantajosos em regiões com escassez de terra e/ou alta irradiância solar (Cazzaniga et al., 2018; Sahu et al., 2016). No entanto, seus impactos ambientais, especialmente sobre o funcionamento dos ecossistemas aquáticos, ainda não são totalmente compreendidos (Trapani & Millar, 2013; Seo et al., 2021).

Um dos aspectos mais críticos e ainda pouco explorados é o efeito das plataformas fotovoltaicas sobre a dinâmica do oxigênio dissolvido (OD), um indicador chave da qualidade da água e da saúde do ecossistema (Odum, 1956; Staehr et al., 2010). As concentrações de OD refletem o balanço entre fotossíntese, respiração e trocas com a atmosfera, processos que podem ser alterados pelo sombreamento, cobertura estrutural e atenuação do vento causados pelos FPVs (Wicaksono & Kang, 2020; Ho et al., 2021). Embora estudos já demonstraram que FPVs reduzem a irradiância e afetam a estratificação térmica (Han et al., 2022; Minke et al., 2021), no conhecimento

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

destes autores não há investigações acerca das alterações na transferência de gases na interface ar-água e processos físicos relacionados.

A transferência de gases na superfície da água é impulsionada principalmente por turbulência, cisalhamento do vento e processos convectivos (Cole & Caraco, 1998; Wanninkhof, 1992). A supressão desses processos pela cobertura dos FPVs pode reduzir o coeficiente de transferência de gases (k), potencialmente alterando os fluxos de oxigênio e outros gases de interesse biogeoquímicos (Livingstone & Imboden, 1996; Crusius & Wanninkhof, 2003). Entretanto, devido à complexidade das medições em campo e à variabilidade natural, quantificar esses efeitos permanece um desafio (Vachon & Prairie, 2013; Tedford et al., 2014), especialmente nestas coberturas dos FPVs.

O método da regressão noturna (ou "método da inclinação noturna") oferece uma ferramenta prática para estimar taxas de transferência de gases com base na depleção OD durante o período noturno, quando há ausência de produção fotossintética (Cole et al., 2000; Staehr et al., 2010). Esse método requer séries temporais de OD para estimar a taxa de respiração e o coeficiente de transferência de gases. Contudo, variações de curto prazo podem gerar inconsistências, resultando em inclinações positivas e negativas alternadas em dC/dt (McGillis et al., 2001; Vachon et al., 2010).

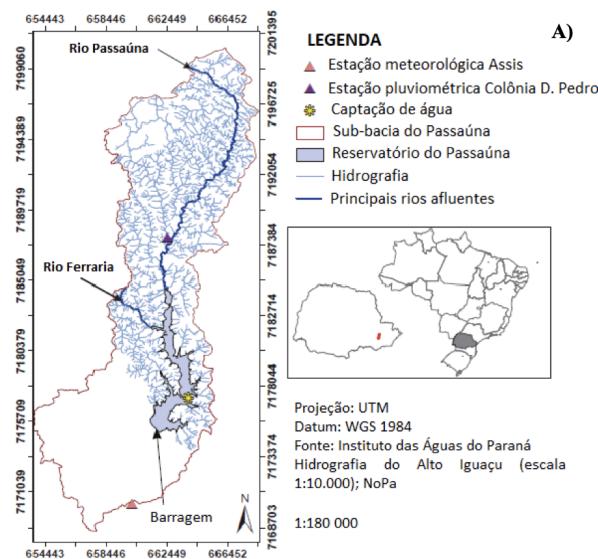
Para contornar esse problema advindo de uma série de dados em alta frequência, aplicou-se o método *LOESS* (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) para suavizar as flutuações de OD, frequentemente causadas por oscilações entre medições sucessivas de OD (Cleveland & Devlin, 1988; Jacoby, 2000) e melhor representar a taxa de variação persistente de nos valores de dC/dt . Este artigo apresenta um estudo de caso no Reservatório do Passaúna, no Brasil, onde o método noturno combinado com suavização LOESS foi usado para estimar o coeficiente de transferência de gases ao longo de oito meses.

2. Métodos

2.1 Área de Estudo

O Reservatório do Passaúna, situado na região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná, sul do Brasil, é um manancial estratégico de abastecimento público, responsável por fornecer água potável a aproximadamente 800 mil pessoas (Sanepar, 2023). Construído em 1990, o reservatório apresenta características típicas de sistemas subtropicais, com profundidade média de 8 metros, área de cerca de 9,5 km² e estratificação térmica moderada durante os meses mais quentes (Zanona, 2024). Desde 2022, uma planta piloto de sistema FPV (Figura 1), com aproximadamente 0,5 hectares de área, foi instalada em uma região central do reservatório, posicionada estrategicamente próxima ao ponto de captação de água bruta. Essa localização visa reduzir custos operacionais com bombeamento, aproveitando a proximidade para o fornecimento de energia elétrica diretamente à estrutura de captação (Sanepar, 2023).

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



Para avaliar os efeitos físico-químicos associados à presença do FPV, foram utilizados sensores ópticos de alta resolução (MiniDOT, PME Inc.) para monitoramento contínuo de oxigênio dissolvido (OD) e temperatura em intervalos de 10 minutos. Os sensores foram distribuídos em diferentes profundidades (0,5 m, 1 m e 4 m) e posicionados em pontos sob a cobertura do FPV e em áreas adjacentes sem cobertura. Paralelamente, dados meteorológicos, incluindo velocidade e direção do vento, radiação solar e temperatura do ar, foram obtidos de uma estação meteorológica automática localizada na borda do reservatório, possibilitando a análise das condições atmosféricas que influenciam os processos de troca gasosa na interface ar-água (Wanninkhof, 1992; Cole & Caraco, 1998; Tedford et al., 2014; Beyer et al., 2021).

2.2 Alterações Físicas Causadas pelos FPVs

2.3 Método da Inclinação Noturna

Em sistemas onde experimentos com traçadores não são viáveis, o método da inclinação noturna oferece uma alternativa prática (Hornberger e Kelly, 1975; Aristegi et al., 2009; Nguyen et al., 2015). Focando no período noturno, sem atividade fotossintética, o método permite isolar os componentes de respiração e reaeração a partir das curvas noturnas de OD. Hill et al. (2018) aplicaram com sucesso essa abordagem para estimar respiração e reaeração em riachos, demonstrando sua robustez e sensibilidade às condições ambientais.

O coeficiente de transferência de gases (k) foi estimado com base no método de regressão noturna descrito por Cole et al. (2000) e adaptado por Staehr et al. (2010). A taxa de variação de OD durante o período noturno é decorrente do balanço entre a respiração e a transferência de gases. A taxa de variação da concentração de OD (C) é dada por:

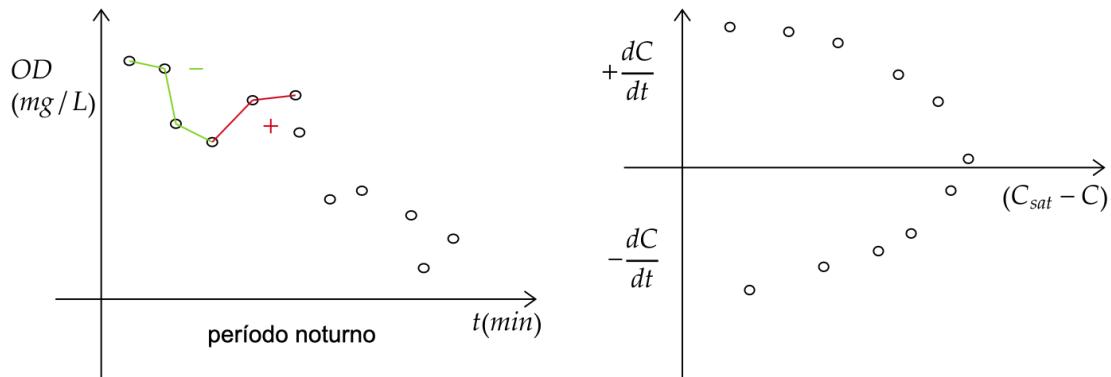
$$\frac{dC}{dt} = -R + k(C_{sat} - C) \quad (1)$$

onde C é a concentração observada de OD, C_{sat} é a concentração de saturação ajustada à temperatura e pressão locais, R representa a respiração e k é a velocidade de transferência de gases (Staehr et al., 2012; Solim et al., 2008).

2.4 Suavização local por regressão

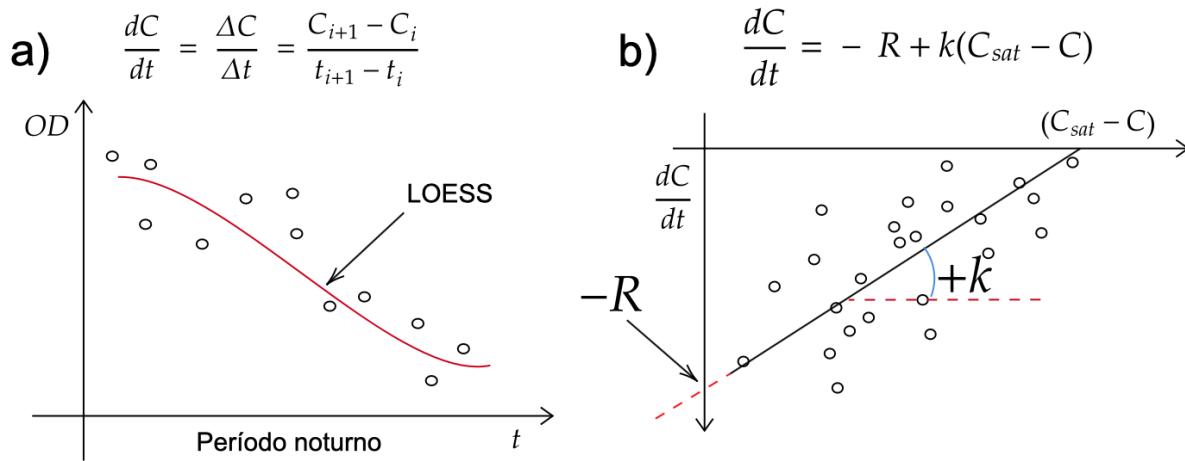
Um desafio identificado foi a ocorrência de um padrão em forma de “ferradura” nas curvas de dC/dt em função do déficit de OD, causado por oscilações de curto prazo que alternam a inclinação entre positiva e negativa nas séries temporais de OD (Figura 2), fruto de variações pontuais, mas que não refletem o padrão persistente da dinâmica ao longo do tempo.

Figura 2 – Representação do padrão “ferradura” causado por oscilações de curto prazo que alternam a inclinação entre positiva e negativa nas séries temporais de OD.



Para atenuar a variabilidade de alta frequência e remover flutuações indesejadas para capturar a tendência mais persistente de dC/dt , aplicou-se *LOESS* à série temporal de OD antes do cálculo da taxa de variação (Figura 3). Isso reduziu a ocorrência de falsos positivos no cálculo de dC/dt e eliminou os padrões em ferradura nas curvas derivada vs. déficit (Cleveland e Devlin, 1988; Jacoby, 2000; Peng et al., 2014).

Figura 3 – Representação gráfica da aplicação do método da Regressão Noturna. Em a) tem-se os dados de OD(t) a noite e a linha contínua representa o ajuste com o LOESS. Em b) tem-se a aplicação do método da depleção noturna em que o coeficiente angular representa o coeficiente de reaeração e o coeficiente linear representa a taxa de respiração.



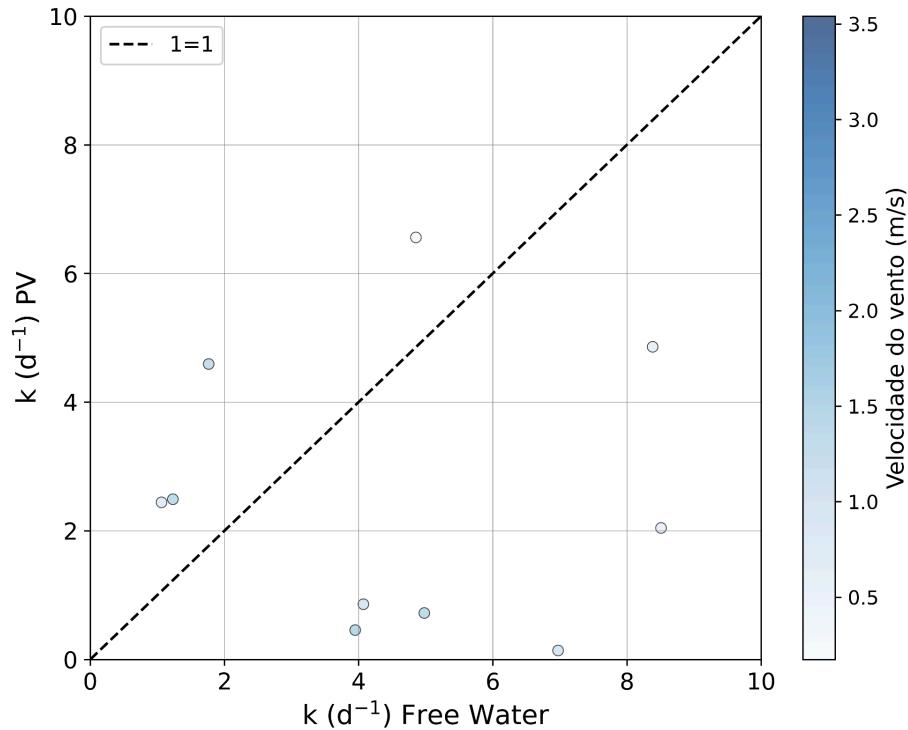
A análise abrangeu mais de 8 meses de dados, com estimativas de k geradas para todas as noites com pelo menos 6 horas de dados contínuos. As estimativas foram validadas por comparação entre locais sob e fora da cobertura do FPV no mesmo período.

3. Resultados

Análise dos coeficientes de reaeração sob e fora dos FPVs

A comparação entre os k estimados sob os painéis fotovoltaicos flutuantes (PV) e na região de água livre (Free Water), apresentada na Figura 4, revela uma forte dispersão dos dados em relação à reta 1:1. Essa distribuição indica que os efeitos dos FPVs sobre a reaeração não seguem um padrão único. Em algumas situações, os valores de k sob os painéis são consistentemente menores do que os observados na água livre, o que pode ser interpretado como um indicativo de atenuação da turbulência superficial, possivelmente decorrente da redução da ação direta do vento e da interrupção do acoplamento entre a coluna de água e a atmosfera. Em outras ocasiões, no entanto, k é superior sob os painéis, sugerindo que a estrutura flutuante pode, sob certas condições, induzir ou redirecionar fluxos turbulentos (como vórtices de borda ou microcorrentes geradas por diferenças de pressão), intensificando a troca gasosa na superfície.

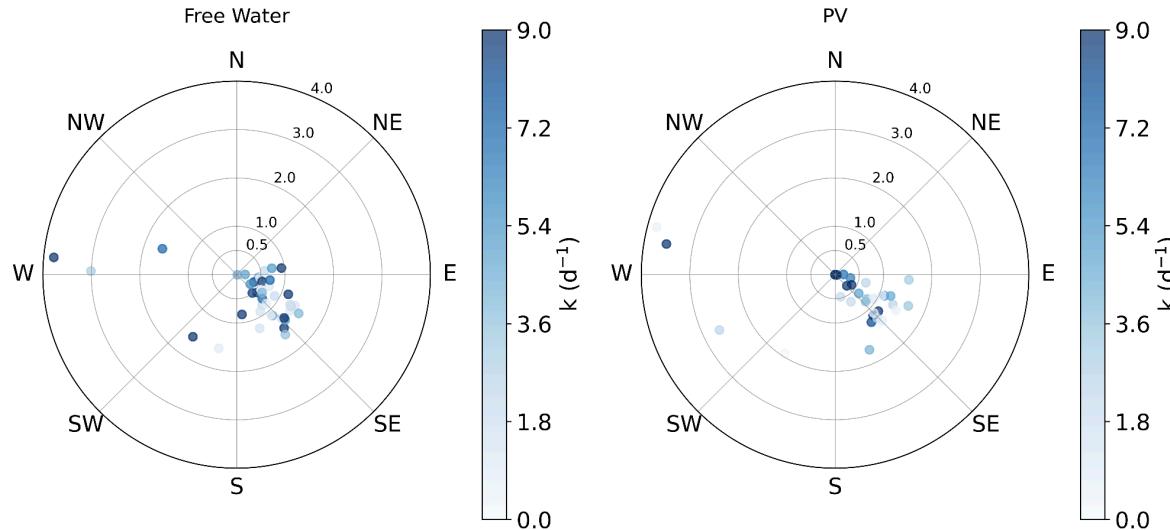
Figura 4 – Comparação entre os coeficientes de reaeração k (d^{-1}) obtidos sob os painéis fotovoltaicos (PV) e em água livre (Free Water). A linha tracejada representa a linha 1:1. A coloração dos pontos representa a velocidade do vento (m/s).



Esse comportamento não-sistemático, em que ora o k do PV é maior do que o k do FW e hora o oposto, sugere que a presença dos FPVs não atua apenas como atenuador do processo de reaeração, mas sim como um modificador do ambiente físico, cuja influência depende de variáveis externas — em especial, a intensidade e direção do vento, ora atenuando e hora amplificando processos que alteram o coeficiente de reaeração.

A relação entre k e a velocidade do vento difere entre os dois locais (Figura 5). Fora dos painéis, observa-se a tendência esperada de aumento de k com o vento, refletindo maior turbulência superficial. Sob os painéis, essa resposta é mais atenuada: embora k também aumente em velocidades mais altas, os valores são geralmente menores, indicando que a cobertura reduz a transferência de momento da atmosfera para a água. Ainda assim, o aumento observado sugere que a turbulência não é completamente suprimida sob os painéis, podendo ser mantida por efeitos laterais, aberturas ou movimentações da estrutura. Isso aponta para uma modulação da influência do vento sobre a reaeração, o que pode alterar a dinâmica de oxigenação em certas condições.

Figura 5 – Rosas dos ventos separadas para os coeficientes de reaeração k em Free Water (esquerda) e PV (direita). As cores representam a magnitude de $k (d^{-1})$ e os pontos são organizados conforme a direção do vento.



Os FPVs cobrem porções significativas da superfície da água, reduzindo o cisalhamento direto do vento e amortecendo a turbulência superficial (Ho et al., 2021; Wicaksono e Kang, 2020).

Além de atenuar a energia do vento e estabilizarem a camada limite da superfície, os sistemas FPVs alteram significativamente a hidrodinâmica superficial ao reduzirem o cisalhamento do vento, suprimirem a formação de ondas e limitarem a convecção noturna induzida por resfriamento (Ho et al., 2021; Wicaksono & Kang, 2020). Esses efeitos combinados criam uma barreira física e térmica que pode dificultar a transferência de gases e reposição de oxigênio com a partir da atmosfera, comprometendo os processos naturais de reaeração de OD por exemplo.

4. Conclusão

Os resultados demonstram que a presença de painéis fotovoltaicos flutuantes exercem uma influência variável-contexto dependente sobre os coeficientes de reaeração no reservatório do Passaúna, diferente da hipótese em que tanto a evaporação quanto a reaeração são atenuadas pela redução do efeito do vento diretamente na superfície da água. A comparação direta entre os valores obtidos sob os painéis e em água livre revela a ausência de um padrão, com momentos em que k é maior sob a cobertura e outros em que é inferior. Isso sugere que os FPVs não atuam simplesmente como barreiras passivas à troca gasosa, mas como elementos dinâmicos capazes de modular a turbulência superficial em função de condições meteorológicas e hidrodinâmicas locais, especialmente considerando as dimensões reduzidas do FPV no reservatório Passaúna em comparação com outros sistemas ao redor do Mundo.

A análise da relação entre k e a velocidade do vento reforça essa interpretação. Fora dos painéis, a resposta esperada — aumento de k com ventos mais intensos — é observada. Já sob os painéis, embora k também aumente em condições de vento forte, a sensibilidade é menor. Isso sugere que os FPVs reduzem a transferência direta de energia do vento para a coluna d'água. A turbulência residual pode ainda ser gerada por mecanismos indiretos, como circulação lateral, efeito das bordas dos painéis e variações na distribuição dos flutuadores.

Esses resultados apresentam implicações relevantes tanto para a modelagem de processos biogeoquímicos em reservatórios com cobertura parcial por FPVs quanto para a análise de possíveis impactos ambientais. A influência não uniforme sobre a reaeração pode afetar estimativas de metabolismo aquático, especialmente quando métodos baseados em modelos físicos (e.g., modelos empíricos de k em função do vento) são aplicados indiscriminadamente. Assim, recomenda-se que projetos de implantação de FPVs considerem não apenas o sombreamento e os aspectos térmicos, mas também os efeitos sobre os fluxos turbulentos que regulam as trocas gasosas entre água e atmosfera.

REFERÊNCIAS

BEYER, F.; GASCOIN, S.; RIMMER, A. Floating photovoltaic plants reduce evaporation and alter surface energy balance in water bodies. *Renewable Energy*, v. 175, p. 364–377, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.080>

BEYER, F.; MEYER, L. C.; SCHMIDT, J.; HOLTMANN, J.; LORKOWSKI, I. Impact of floating photovoltaic systems on lake stratification and water quality. *Solar Energy*, v. 216, p. 416–428, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.066>

COLE, J. J.; CARACO, N. F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆. *Limnology and Oceanography*, v. 43, n. 4, p. 647–656, 1998. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.4.0647>

DEMARS, B. O. L.; MANSON, J. R. Temperature dependence of stream aeration coefficients and the effect of water turbulence: A critical review. *Water Research*, v. 47, n. 1, p. 1–15, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.039>

ESTEVES, F. A. *Fundamentos de Limnologia*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826 p.

GÜZEL, E.; AKIN, B. The environmental effects of floating photovoltaic (FPV) systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 130, p. 109959, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109959>

HILL, W. R.; DIMICK, S. M.; ROBERTS, B. J.; PULHAM, H. Light, nutrients, and the metabolism of streams. *Ecology Letters*, v. 21, n. 5, p. 628–639, 2018. <https://doi.org/10.1111/ele.12932>

HO, C. H.; PARK, J.; LEE, J. Y.; KIM, J. H. Effects of floating solar panel installations on water quality in a subtropical reservoir: A case study from South Korea. *Renewable Energy*, v. 177, p. 704–715, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.116>

HO, L.; LATHOURI, M.; NEWCOMBE, G. Environmental impacts of floating solar panels on reservoir ecosystems: A review of current knowledge and future research needs. *Journal of Environmental Management*, v. 292, 112766, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>

LIU, H.; ZENG, Y.; GUAN, C.; TAN, J.; CAI, X. Review on floating photovoltaic power generation: Feasibility, challenges, and prospects. *Energy Reports*, v. 7, p. 2941–2956, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.058>

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. *Relatório de Sustentabilidade 2023*. Curitiba: SANEPAR, 2023. Disponível em: <https://site.sanepar.com.br>. Acesso em: 09 maio 2025.

SOUZA, L. M. et al. Physical and chemical characteristics of Passaúna Reservoir (Curitiba, Paraná). *Revista Ambiente & Água*, v. 15, n. 6, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2562>

TEDFORD, E. W.; KIPPHUT, G. W.; CRUSIUS, J. Wind-driven mixing and gas exchange in Alaskan arctic lakes. *Limnology and Oceanography*, v. 59, n. 6, p. 2121–2138, 2014. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.2121>

VACHON, D.; PRAIRIE, Y. T. The ecosystem size and shape dependence of gas transfer velocity versus wind speed relationships in lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 70, n. 12, p. 1757–1764, 2013. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0241>

WANNINKHOF, R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 97, n. C5, p. 7373–7382, 1992. <https://doi.org/10.1029/92JC00188>

WICAKSONO, A.; KANG, D. Impacts of floating photovoltaic installations on lake water temperature and water quality. *Energies*, v. 13, n. 20, 5487, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13205487>

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. (*no periódico informado*)

ZAPPA, C. J.; MCGILLIS, W. R.; RAYMOND, P. A.; EDSON, J. B.; HINTSA, E. J.; ZEMMELINK, H. J.; HO, D. T. Environmental turbulent mixing controls on air–water gas exchange in marine and aquatic systems. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 10, 2007. <https://doi.org/10.1029/2006GL028790>

AGRADECIMENTOS

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