

A influência dos eventos de precipitação e poluição difusa em rios: implicações para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos

The influence of rainfall events and diffuse pollution in rivers: implications for water resources management instruments

Caroline Kozak¹ , Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes² 

¹Universidade Estadual de Maringá – UEM, Umuarama, PR, Brasil. E-mail: carolkozak05@gmail.com

²Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: cris.dhs@ufpr.br

Como citar: Kozak, C., & Fernandes, C. V. S. (2022). A influência dos eventos de precipitação e poluição difusa em rios: implicações para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e23. <https://doi.org/10.21168/rega.v19e23>

RESUMO: As contribuições de poluição por vias difusas associadas aos diferentes tipos de uso e ocupação da terra exercem influência na degradação da qualidade da água de rios. Com base em uma abordagem quali-quantitativa, pretende-se estimar o quanto de carga poluidora é inserida em um corpo hídrico durante um evento de chuva, analisando os tradicionais parâmetros de qualidade da água (NT, PT, COD, DQO, turbidez e SS) e avaliar as potenciais implicações sobre os instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos. A pesquisa teve como estudo de caso uma bacia experimental, com características diversas de uso da terra e combinado com impactos de ação antrópica. A base de dados desta pesquisa foi realizada a partir de amostragem automática, em regime de chuvas, para amostragem em dois pontos de monitoramento no Rio Barigui, na Região Metropolitana de Curitiba no período 2018 e 2019. Como resultado, corroborou-se as maiores influências advindas da área da bacia mais urbanizada, o qual em termos de SS, PT e NT, representam um aporte anual de 116 ton/ha, 303 kg/ha e 777 kg/ha, respectivamente, inseridos no ecossistema aquático durante um evento de chuva que ocorreu após 30 dias de estiagem. Neste contexto entende-se a necessidade de se reavaliar os normativos legais que regem os instrumentos de gestão de recursos hídricos para consideração dos efeitos de poluição difusa.

Palavras-chave: Poluição não pontual; Monitoramento quali-quantitativo; Qualidade da água.

ABSTRACT: Contributions from diffuse pollution associated with different land use and soil occupation have influence on rivers water quality degradation. Based on a qualitative-quantitative approach, it is intended to estimate how much pollutant load is inserted into a water body during a rainfall event, analyzing traditional water quality parameters (NT, PT, COD, COD, turbidity and SS) and assess the potential implications on Water Resources Management instruments. The research had as a case study an experimental basin, with different characteristics of land use and combined with impacts of anthropic action. The database of this research was carried out from automatic sampling, in rainfall condition, for sampling at two monitoring points on the Barigui River, in the Metropolitan Region of Curitiba in the period 2018 and 2019. As a result, the greatest influences were corroborated coming from the most urbanized basin area, which in terms of SS, PT and NT, represent an annual contribution of 116 ton/ha, 303 kg/ha and 777 kg/ha, respectively, inserted into the aquatic ecosystem during a rain event that occurred after 30 days of drought. In this context, it is understood the need to reassess the legal regulations that govern water resources management instruments to consider the effects of diffuse pollution.

Keywords: Non-point pollution; Quali-quantitative monitoring; Water quality.

INTRODUÇÃO

A dinâmica das atividades em uma bacia hidrográfica provoca impactos nos corpos hídricos. Particularmente, quando associada às configurações de uso da terra afetam o grau e o tipo de poluição disponível, tornando-se uma relação intrínseca de causa e efeito (Porto & Porto, 2008; Nowatzki et al., 2021). Efluentes domésticos e industriais são os principais exemplos de poluição pontual, passíveis de controle e monitoramento previsto pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011). Contudo, as

Recebido: Junho 06, 2022. Revisado: Outubro 09, 2022. Aceito: Novembro 01, 2022.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

fontes de poluição difusa (ou poluição não pontual) são muitas vezes negligenciadas e/ou não consideradas dentro do aspecto da gestão de recursos hídricos por possuírem um aspecto intermitente e de difícil identificação e monitoramento.

De maneira geral, as contribuições difusas são aquelas originadas via deposição atmosférica (seca e úmida), acúmulo de resíduos em superfícies impermeáveis, erosão do solo, infiltrações de água subterrânea e lixiviações (United States Environmental Protection Agency, 1984; Novotny, 2003). Neste caso, a ocorrência de eventos de precipitação representa o principal indutor físico do transporte dessa poluição acumulada nas superfícies para dentro dos corpos hídricos (Kozak et al., 2019).

Assim, entende-se que a poluição difusa é basicamente governada pelos processos hidrológicos, como a ocorrência de chuva (United States Environmental Protection Agency, 1984), fato este não necessariamente abordado de forma clara nos dispositivos legais, de planejamento e regulação em gestão de recursos hídricos nacional. Uma vez que a capacidade de infiltração do solo é atingida, o excesso de chuva que causa o escoamento superficial, lava a superfície e introduz no corpo receptor uma carga de poluição relativa com o uso do solo da área de drenagem correspondente (Novotny, 2003). De acordo com Giri & Qiu (2016), os principais usos do solo que causam intensa degradação da qualidade da água são agricultura e urbanização. Contudo, essas diferenças não contribuem de maneira igual para a degradação da qualidade da água e diversos fatores adicionais colaboram para a magnitude deste impacto (Lee et al., 2009; Bu et al., 2014; Yu et al., 2016).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.433/1997 (Brasil, 1997), também chamada de “Lei das Águas”, fornece cinco instrumentos para o gerenciamento integrado dos corpos d’água, visando a garantia de água em qualidade e quantidade suficiente para atendimento das necessidades atuais e futuras de consumo. Tal objetivo fundamenta-se na estratégia de classificar as águas, considerando usos múltiplos e prioritários, bem como diminuir os custos de combate à poluição (Brasil, 1997).

Em complementação, a Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005), a qual dispõe sobre os critérios de enquadramento, ressalta que os limites máximos estabelecidos, na vazão de referência, poderão ser alterados em decorrência de estudos específicos que considerem as fontes de poluição difusa. Portanto, as legislações tratam o assunto da poluição difusa de forma breve e superficial, sem destacar diretrizes e enaltecer a necessidade da elucidação plena dos impactos e da degradação da qualidade da água que essas fontes de poluição podem causar nos rios, que potencialmente podem induzir conceitos inadequados na aplicação dos instrumentos.

Contudo, identificar e quantificar os efeitos da poluição por vias difusas é desafiador, devido às múltiplas fontes de contribuição, rotas de transporte, aleatoriedades e falta de legislação adequada e específica que defina claramente estratégias de quantificação e controle. Não existe um protocolo geral de como proceder esse tipo de análise (McCarthy et al., 2018; Bitencourt et al., 2019), porém existem alguns critérios básicos que devem ser considerados como a estratégia de monitoramento e o detalhamento das características hidrológicas dos eventos de chuva (Kozak, 2020). A integração do entendimento quali-quantitativo desses processos pode compor ferramenta de gestão de recursos hídricos para identificação e controle desse tipo de fonte poluidora.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação quali-quantitativa de um evento de chuva em dois pontos de monitoramento consecutivos em rio de uma mesma bacia hidrográfica com diferenças nos usos da terra a montante de cada ponto de monitoramento. Este direcionamento se justifica pela necessidade dos maiores entendimentos dos processos e fontes de poluição difusa nas bacias hidrográficas diante dos distintos usos do solo. A hipótese que fundamenta esse trabalho é que mesmo pequenas variações de uso da terra contribuem para o aumento da carga de poluição carregada para os rios. Para tanto, serão avaliados os principais parâmetros de qualidade da água associados à poluição difusa (nitrogênio, fósforo, turbidez e sólidos em suspensão), carbono orgânico dissolvido (COD) e demanda química de oxigênio (DQO) e calculado a quantidade carga difusa inserida (kg/ha/ano) no ecossistema aquático durante tais eventos de chuva.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

Este estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Barigui, em dois pontos com distintos uso do solo (Figura 1). O primeiro (BA1) é localizado mais ao norte da bacia (25°18,7720 S; 49°17,7412 O), possui uma área de drenagem de, aproximadamente, 58 km². O predominante uso do solo deste local é vegetação (62,05%), seguido de campo (solo exposto e campo aberto) (24,24%), área urbana residencial (5,94%) e agricultura (5,61%). O segundo ponto (BA2) a jusante (25°38,7519 S; 49°30,3325 O), possui

uma área de drenagem incremental de, aproximadamente 46 km². Nesta porção da bacia, os usos do solo predominante continuam a ser vegetação (40,02%) e campo (24,39%), seguido de área urbana (23,10%) e agricultura (7,98%).

Contudo, as proporções de uso da terra alteram-se, com decréscimo de, aproximadamente, 22% em área de vegetação entre BA1 e BA2 e aumento de 0,15%, 4,72% e 17,16% respectivamente nas áreas de pasto, agricultura e área urbana, conforme detalhado na Tabela 1. A distância, em metros de rio, entre BA1 e BA2 é de 18 km. Adicionalmente, da nascente do rio até o ponto BA1 não existe nenhum ponto de poluição pontual conhecido e identificado. Contudo, entre BA1 e BA2 existe uma estação de tratamento de esgoto (ETE) dotada de reator anaeróbio seguida de processos físico/químicos. Estima-se que a ETE trata o esgoto sanitário de, cerca de 34 mil pessoas (em 2013), trabalhando com eficiência prevista de 85% (Agência Nacional de Águas, 2017).

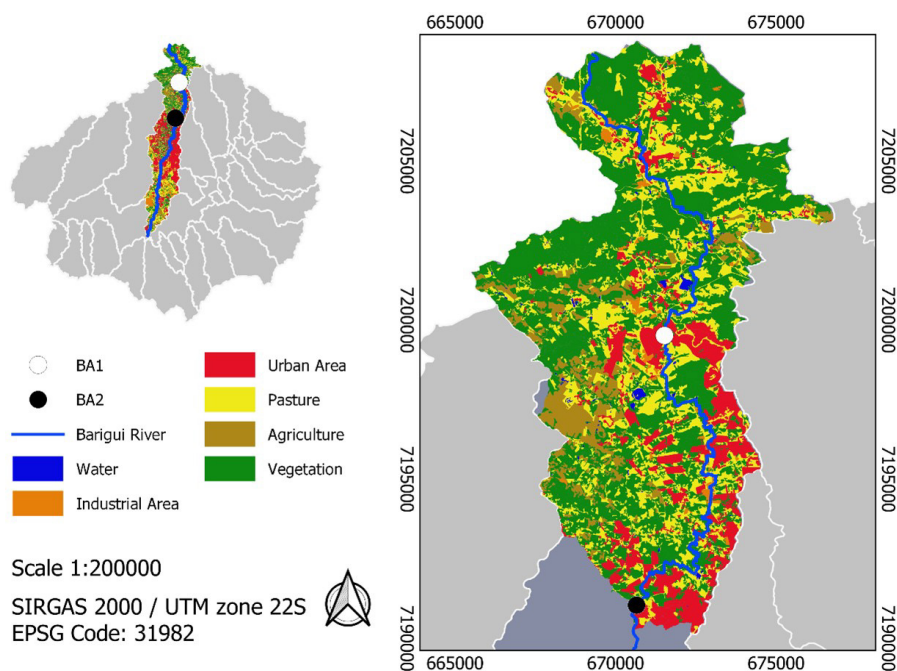


Figura 1 - Localização dos pontos de monitoramento na Bacia do Rio Barigui e a classificação do uso do solo.

Tabela 1 - Classificação do uso do solo em cada ponto de monitoramento e as variações entre eles

Usos da Terra	BA1 (Km ²)	BA2 (Km ²)	Variações (%)
Água	0,41	0,40	↑ 0,16
Área Urbana Residencial	3,44	10,60	↑ 17,16
Área Urbana Industrial	0,84	0,59	↓ 0,16
Campo (pasto + solo exposto)	14,02	11,19	↑ 0,15
Agricultura	3,24	4,74	↑ 4,72
Vegetação	35,87	18,36	↓ 22,02
Total	57,81	45,87	103,68

A classe de enquadramento deste trecho do Rio Barigui, de acordo com o Comitê de das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira – COALIAR, é Classe 3 (Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, 2013a).

Monitoramento Quali-quantitativo

Para avaliar a contribuição de fontes difusas de poluição foi utilizado um amostrador automático proposto por Braga (2013) que coleta amostras de acordo com a variação da coluna d'água, ou seja, durante a ascensão e recessão de um hidrograma. O monitoramento inicial do evento de chuva foi dado quando houve uma variação de 5 centímetros de coluna d'água em, no máximo 10 minutos. A partir

disso, a cada 10 centímetros de variação, uma nova amostra foi coletada. Os dados de precipitação foram coletados na estação pluviométrica vinculada ao sistema. Este tipo de amostragem permite a discretização do hidrograma de chuva, sendo possível analisar as informações de quantidade de água precipitada e escoada durante esses momentos, bem como analisar qualitativamente cada amostra coletada, consolidando a estratégia da abordagem quali-quantitativa. Os dados de nível da coluna d'água (cm) coletados foram convertidos em vazão (m³/s) de acordo com a respectiva curva-chave da seção transversal do rio, disponível em Kozak (2020).

Tempo de Recorrência (TR)

Para o cálculo do TR foi utilizado a equação (1) de intensidade-duração-frequência de Fendrich (1989) para a estação de Prado Velho (Curitiba/PR), a qual

$$i = \frac{3221,07 * T_R^{0,255}}{(t_d + 26)^{1,010}} \quad (1)$$

Onde: *i* é a intensidade máxima da precipitação em mm/h; *T_R* é o tempo de recorrência em anos; *t_d* é a duração da precipitação em minutos.

Concentração Média do Evento

O cálculo da concentração média do evento, em inglês *Event Mean Concentration (EMC)*, representa a média ponderada entre a quantidade de massa de poluição transportada durante um evento e o volume total de água transportado (Novotny, 2003). O EMC é uma representação ponderada da quantidade de poluentes carregados para um corpo hídricos, sendo capaz de representar com um único valor, o transporte de massa ocorrido durante um evento de chuva. A equação (2) usada para o cálculo do EMC foi

$$EMC = \frac{\sum Q_i * C_i}{\sum Q_i} \quad (2)$$

Onde: *Q* representa os valores de vazão medidos ao longo do evento de chuva em m³/s; *C* é a concentração do poluente medido em mg/L.

Qualidade da Água

Assim que o evento de chuva se encerrou as amostras foram coletadas no campo e encaminhadas para o laboratório. O equipamento não refrigera as amostras. Para a análise qualitativa do aporte de poluição em eventos de chuva foram analisados nitrogênio e fósforo total (*N_T* e *P_T*), carbono orgânico dissolvido (COD), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST), de acordo com o determinado em APHA (American Public Health Association, 1998) (Tabela 2). A turbidez (NTU) foi medida com equipamento portátil 2100 Q-Hach.

Tabela 2 - Procedimentos analíticos usados nas análises de qualidade da água

Parâmetro	Métodos	Range	Referência
DQO	5220 D: refluxo fechado,	420 nm: 0 – 90 mgO ₂ L ⁻¹ 600nm: 100 – 900 mgO ₂ L ⁻¹	American Public Health Association (1998)
COD	5310 B: método de combustão em alta temperatura	1 – 50 mg L ⁻¹	American Public Health Association (1998)
TN	4500-N. C: método do persulfato seguido 4500-NO ₃ ⁻ . E: método redução pela coluna de cádmio	< 2.9 mg N L ⁻¹ 0.01 – 1 mg NO ₃ ⁻ -N L ⁻¹	American Public Health Association (1998)
TP	método da digestão ácida 4500-P. E: método do ácido ascórbico	> 10 µg P L ⁻¹	American Public Health Association (1998)
SST	2540 B: sólidos totais secos à 103 ^o -105 ^o C	< 200 mg	American Public Health Association (1998)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi selecionada uma chuva que ocorreu em Agosto de 2018, simultaneamente em BA1 e BA2, com precipitação registrada de 37,2 mm e 34,1 mm, respectivamente, após aproximadamente 30 dias sem ocorrência de chuva significativa. A Tabela 3 apresenta as principais considerações sobre este evento de chuva em função do Tempo de recorrência (TR). É possível observar que não são eventos longos e intensos, portanto, apresentam TR menores, aproximadamente 5 meses no ponto BA1 e 3 meses para o ponto BA2. Isso representa o carreamento cargas de poluição difusa para dentro dos rios com maior frequência ao longo do ano, sendo um importante critério para o gerenciamento e controle de fontes de poluição.

Tabela 3 - Características dos eventos de chuva e tempo de recorrência

Ponto de monitoramento	Precipitação acumulada (mm)	Duração da chuva (h)	Intensidade da chuva (mm/h)	Tempo de recorrência (TR)
BA1	37,2	4,75	7,83	0,42 anos → ~ 5 meses
BA2	34,1	9,33	3,65	0,26 anos → ~ 3 meses

Com esses eventos de chuva, o amostrador automático coletou 7 amostras no ponto BA1 e 8 amostras no ponto BA2. A Figura 3 mostra os respectivos hidrogramas de coleta, bem como as amostras coletadas.

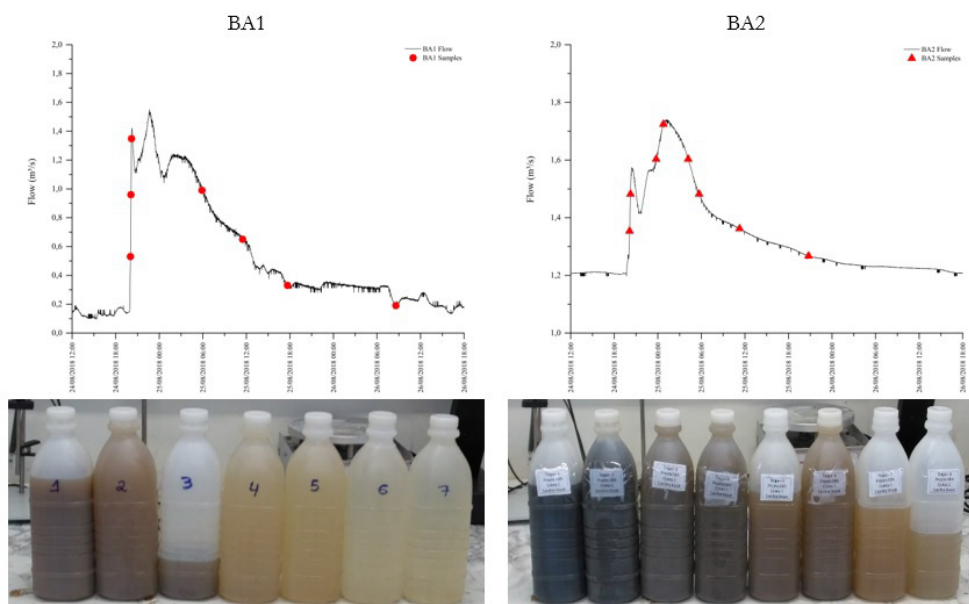


Figura 2 - Hidrogramas de coleta para os pontos BA1 e BA2. A linha preta representa a vazão (m³/s) e os pontos vermelhos representam as amostras coletadas; As imagens abaixo de cada hidrograma são as respectivas amostras coletadas.

As vazões médias nos pontos BA1 e BA2 foram, respectivamente, de 1,36 m³/s (variando entre 0,26 m³/s no início e 1,62 m³/s no pico do evento) e 1,26 m³/s (variando entre 1,26 m³/s no início e 2,52 m³/s no pico do evento), sendo o volume de água transportado durante este evento de 1,19 x 10⁵ m³ no ponto BA1 e 2,41 x 10⁵ m³ no BA2.

Apesar das diferenças entre as seções transversais dos pontos BA1 e BA2, a variação de vazão medida foi similar em ambos os pontos monitorados. Observa-se que a variação no ponto BA1 teve uma amplitude maior do que em BA2, associado ao formato da seção transversal, que é mais estreita a montante e mais alargada a jusante, e visivelmente corroborada com o maior volume de água transportado no ponto BA2, o qual recebe a influência de BA1.

As concentrações de turbidez e SS apresentam os maiores valores no início do evento (Figura 3). Para o ponto BA1, os valores máximos de turbidez e SST foram medidos na primeira amostra do evento, os quais são 1.670 NTU e de 2.085 mg/L. Para o ponto BA2, os maiores valores desses parâmetros foram medidos na segunda amostra do evento de chuva, os quais são 2.360 NTU e 4.105 mg/L. Como a turbidez é um parâmetro de análise derivado da ocorrência de sólidos em suspensão na água (Sperling, 2017), os valores medidos em ambos os eventos possuem R² de 0,95.

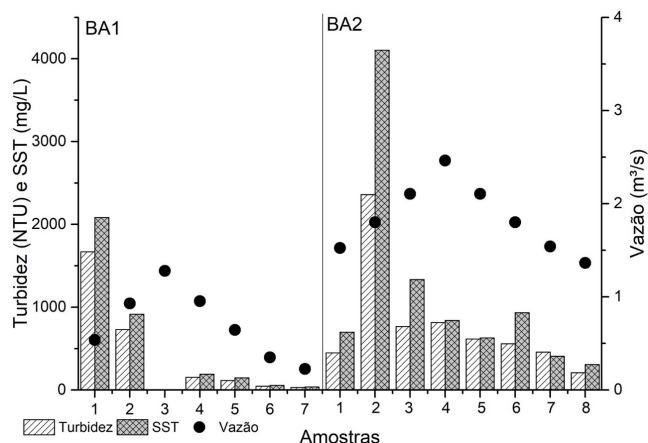


Figura 3 - Valores medidos de turbidez (NTU) e SST (mg/L) durante os eventos de chuva em BA1 e BA2. Os pontos pretos representam a vazão (m³/s) em que cada amostra foi coletada.

As diferenças de cor nas amostras coletadas estão associadas aos tipos de uso do solo de cada área de drenagem. Como pode ser observado na Figura 3, as amostras no ponto BA1 possuem coloração em tons de marrom, intensos no começo e suavizando até o final do evento, o que sugere efeitos mais intensos dos processos erosivos desta área de influência que possui uso do solo predominante de vegetação e campo. Já no ponto BA2, as amostras possuem uma coloração mais escura em tons de preto, mais acentuada nas primeiras amostras do evento com diminuição da intensidade mais ao final do evento, o que sugere efeitos mais intensos de acúmulo de poluição e lavagem superficial de áreas impermeáveis, como calçadas e asfaltos.

Em relação aos parâmetros N_T e P_T , foram observados comportamentos distintos relacionado com a chuva (Figura 4). Em BA1, a concentração do P_T aumentou no começo do evento com posterior declínio das concentrações até o final, enquanto N_T teve aumento de concentrações no começo do evento de chuva, permanecendo mesmo à medida que a vazão diminuía. A concentração média (\pm desvio-padrão) de P_T e N_T , respectivamente, em BA1 foi de $0,81 \pm 0,94$ mg/L e $0,87 \pm 0,33$ mg/L. Em contrapartida, no ponto BA2, ambas concentrações de P_T e N_T acompanharam o comportamento da vazão, aumentando e diminuindo juntos ao longo da amostragem. A concentração média neste ponto, para P_T e N_T foi $3,17 \pm 1,90$ mg/L e $8,15 \pm 9,47$ mg/L.

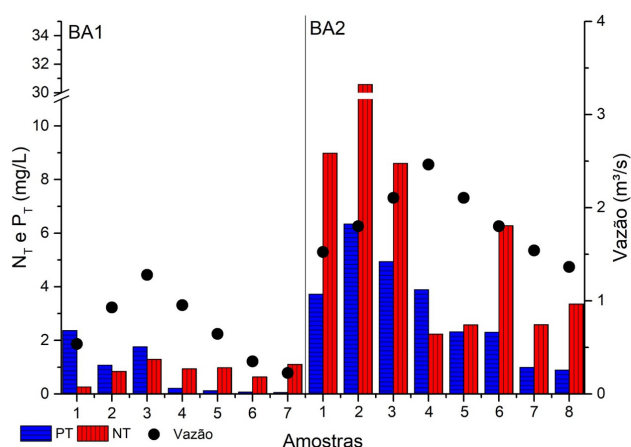


Figura 4 - Concentrações medidas de N_T e P_T (mg/L) durante os eventos de chuva em BA1 e BA2. Os pontos pretos representam a vazão (m³/s) em que cada amostra foi coletada.

O comportamento de P_T , em ambos os pontos de monitoramento sugere uma relação forte com o regime de vazões imposto pela ocorrência do evento de precipitação, com concentrações aumentando e diminuindo simultaneamente à vazão. Considerando que o ponto BA1 não tem influência de fontes pontuais, a fonte provável de P_T são os processos de erosão do solo, mesmo que em pequena escala, com concentração máxima de 2,36 mg/L (amostra 1). O fósforo possui um ciclo sedimentar, circulando entre os organismos vivos e meio terrestre. De acordo com Worsfold et al. (2016) os principais fluxos

desse elemento são encontrados entre a biota do solo e o solo, podendo ser carregados para o ambiente aquático através dos processos de erosão de intemperismo das rochas. Enquanto em BA2, as concentrações são magnificadas pela provável influência da ETE (concentração máxima de 6,34 mg/L – amostra 2), já que o fósforo também é um dos principais elementos presente nas descargas de esgotos sanitários, devido a matéria orgânica fecal e detergentes (Sperling, 2017; Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2020).

Em contrapartida, o N_T possui comportamentos distintos do Pr . No ponto BA1 a concentração aumenta durante o pico do evento de chuva, mas não sofre decréscimo na sequência, o que indica que ainda podem estar ocorrendo introdução desse elemento após o término do evento ou sob o efeito do tempo de concentração da bacia. Em Kozak et al. (2019) foram observados no ponto BA1 o comportamento das frações de nitrogênio durante o evento de chuva. Os resultados mostraram maiores concentrações de nitrogênio amoniacal no início do evento, seguindo do aumento das concentrações de nitrato ao final do evento. Essas variações não podem ser evidenciadas quando se observa o parâmetro de nitrogênio total propriamente dito, sendo possível apenas evidenciar a introdução deste elemento no meio aquático. Todavia, no ponto BA2, as concentrações de N_T seguiram o regime de vazões, o que pode estar associado com a influência dos despejos da ETE, que não cessam durante os eventos de precipitação. Assim, destaca-se a amostra 2 analisada no ponto BA2 a qual teve uma concentração de N_T de 30,58 mg/L.

As medições de COD e DQO representam, de maneira geral, a análise da matéria orgânica carregada para os rios. As concentrações de DQO foram maiores que as concentrações de COD, em ambos os pontos monitorados (Figura 5). As concentrações medidas de COD apresentaram menor variação ao longo do evento (menor desvio padrão), o que pode estar associado ao fato deste parâmetro ser analisado na fração dissolvida, não sofrendo influência direta do transporte de sólidos em suspensão. Além disso, COD pode estar sendo introduzido no sistema constantemente, sem grandes efeitos dos processos difusos da bacia, sugerindo a influência de fontes naturais desse elemento ao meio. As concentrações medidas de COD no ponto BA1 possuem média de $3,47 \pm 0,60$ mg/L, enquanto no ponto BA2, há alternância de maiores concentrações com média de $5,39 \pm 1,30$ mg/L. Em Kozak & Fernandes (2021) são reportadas algumas análises sobre as condições de regime de base dos pontos BA1 e BA2, onde as concentrações médias medidas de COD foram de $2,01 \pm 0,56$ mg/L em BA1 e $4,90 \pm 1,45$ mg/L em BA2.

As concentrações de DQO seguem o comportamento do hidrograma em ambos os pontos monitorados, porém com valores cerca de 7,6 vezes maior no ponto BA2, provavelmente devido à influência da ETE. Tal influência é corroborada quando se observa os valores medidos durante o escoamento de base dos rio, sem a ocorrência de eventos de precipitação. As concentrações medidas de DQO, nos pontos BA1 e BA2 sem a ocorrência de chuva, foram, respectivamente, de $14,61 \pm 9,30$ mg/L e $30,67 \pm 8,96$ mg/L (Kozak, 2020). As concentrações médias foram de $48,83 \pm 38,84$ mg/L no BA1, e $373,62 \pm 316,27$ mg/L no ponto BA2. Destaca-se ainda que as maiores concentrações foram mensuradas na segunda amostra do evento, a qual sugere a lavagem inicial via escoamento superficial. Em BA1, a concentração máxima de DQO foi de 93,42 mg de O_2/L e, em BA2 a concentração máxima chegou a 1046,00 mg de O_2/L , valor próximo a média de DQO para esgoto bruto (DQO ~ 1000 mg/L) de acordo com Sperling (2017).

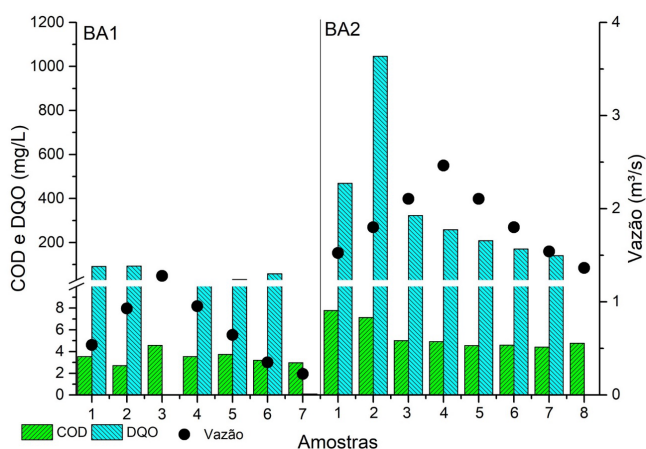


Figura 5 - Concentrações medidas de COD e DQO (mg/L) durante os eventos de chuva em BA1 e BA2. Os pontos pretos representam a vazão (m^3/s) em que cada amostra foi coletada.

De maneira geral, foi possível corroborar a hipótese prevista de que alterações nos usos do solo entre os pontos monitorados trouxeram diferentes concentrações medidas dos parâmetros de qualidade da água, como já discutido em Kozak (2020). As concentrações medidas no ponto BA2 foram superiores que as medidas no BA1, o que se intensifica com a influência da ETE entre os pontos BA1 e BA2, mesmo com a possibilidade dos efeitos de diluição dominarem a dinâmica dos poluentes durante ocorrência de chuva.

Em termos de classes de enquadramento, durante os eventos de chuva, apenas o final do evento no ponto BA1 teve amostras em atendimentos às concentrações previstas para a Classe 3 para os parâmetros de turbidez (amostras 6 e 7) e P_T (amostras 5, 6 e 7). As demais amostras, para os parâmetros de turbidez e P_T superam as concentrações estabelecidas, sendo que no ponto BA2 nenhuma atende ao previsto na Resolução CONAMA nº357/2005 (Brasil, 2005), para classe 3. Cabe destacar que a resolução citada não normatiza valores máximos permitidos para COD e DQO.

Adicionalmente, é importante destacar que as primeiras amostras coletadas em ambos os pontos monitorados apresentam sempre as maiores concentrações dos parâmetros medidos. Este fenômeno também é chamado de efeito de *first-flush*, que representa o momento do evento de chuva em que a primeira porção do escoamento superficial de lavagem contém as maiores concentrações de poluição (Novotny, 2003; McCarthy et al., 2018; Wise et al., 2019). Particularmente, Wise et al. (2019) durante a análise da influência dos eventos de chuva em regiões árida observaram que na fase inicial do evento a introdução de matéria orgânica dissolvida (MOD) veio de fontes próximas ao ponto de monitorado, devido a lavagem inicial da superfície. Contudo, foi no pico do polutograma que a ocorrência do *first-flush* se destaca e o aporte de MOD de áreas urbanas impermeáveis a montante do ponto de monitoramento acontece, da mesma forma que foi monitorado neste estudo de caso. Os autores destacam que o monitoramento dos eventos de chuva é essencial para a caracterização dos efeitos de *first-flush*, sendo uma estratégia importante para identificar os impactos nos rios durante essas condições. Isso porque os efeitos qualitativos dos processos difusos, em geral, tendem a acontecer no mesmo momento, fato este que se ajusta aos efeitos quantitativos e tempo de resposta distinto de cada bacia hidrográfica.

Os valores de EMC calculados para quantificar o aporte de poluição nos rios foram convertidas nas estimativas de carga difusa (kg/ha/ano) do evento para cada poluente, considerando a respectiva área de drenagem dos pontos monitorados. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - EMC (mg/L) e cargas difusas (kg/ha/ano) para COD, DQO, P_T , NT e SS para os pontos monitorados

	BA1		BA2*	
	EMC	Kg/ha/ano	EMC	Kg/ha/ano
COD	3,63	97,39	5,34	417,02
DQO	39,38	1,06E+03	331,59	3,22E+04
P_T	0,98	26,43	3,32	302,58
NT	0,93	24,98	8,00	777,43
SS	461,62	1,24E+04	1181,95	1,04E+05

* - Para o cálculo dos valores no ponto BA2 foi considerado apenas a área de drenagem incremental, ou seja, as cargas difusas estimadas em BA1 foram descontadas das cargas de BA2, a fim de realizar a adequada representação da influência na área incremental.

Novamente, é possível observar que as concentrações médias no ponto a jusante são maiores do que no ponto a montante. No ponto BA1, os parâmetros P_T e NT apresentam valores próximos e na mesma proporção de EMC, o que pode indicar que ambos os nutrientes possuem contribuição similar ao ecossistema aquático. Considerando o aporte anual destes elementos (~26 e 25 kg/ha/ano) pode-se inferir que tal contribuição está diretamente relacionada com o tipo de uso do solo predominante, com mais área vegetada e menor influência de urbanização. Porém, apesar de não apresentar nenhuma fonte pontual de poluição, os valores médios de DQO representam um aporte de aproximadamente 1 ton/ha/ano de material orgânico, o qual necessitará de intervenção química para sua degradação. Neste caso, a DQO pode ser entendida como o material orgânico refratário, aquele de mais difícil oxidação/degradação no ambiente, que está sendo introduzido no corpo hídrico, seja por atividades agrícolas, despejo irregular de esgoto sanitário ou extravasamento dos sistemas.

Já os valores de EMC para os parâmetros P_T e NT calculados no ponto BA2 são, respectivamente, 3 vezes e 9 vezes maiores que do ponto BA1, e que pode estar associado com a existência de uma

estação de tratamento de esgoto que, durante os eventos de chuva, pode aumentar o descarte destes nutrientes no ecossistema. Da mesma forma, o EMC da DQO apresentou-se valor 8 vezes maior, o que representa cerca de 32 ton/ha/ano entrando no corpo hídrico.

O aporte mais significativo é o de sólidos em suspensão (como observado anteriormente na Figura 2) considerando os processos hidrológicos de escoamento superficial da bacia hidrográfica. Em ambos os pontos, o EMC para o parâmetro SS são os maiores valores em relação aos demais parâmetros analisados. No BA1 a concentração de SS chegou a 461,62 mg/L e em BA2 de 1.181,95 mg SS/L, representando a carga de aproximadamente, 12 e 104 ton/ha/ano de sólido suspenso inserido no sistema, respectivamente. Essas características podem estar associadas a materiais advindos da erosão do solo e resíduo superficial de deposição atmosférica, poeira, folha, material semi-decomposto, fuligem, entre outros. Assim, considerando os demais parâmetros de qualidade da água e somadas à capacidade de adsorção das partículas e a propagação de tais condições ao longo da bacia hidrográfica, representam um passivo ambiental de longo prazo. Os resultados aqui apresentados completam os descritos em Kozak et al. (2019, 2021), Kozak (2020), baseados em observações também realizadas por Goulart (2017), Grudzien (2019), Drummond (2020). No entanto a abordagem metodológica que permitiu estes resultados foi originalmente descrita em Kozak (2020).

IMPLICAÇÕES PARA OS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

O combate à poluição hídrica e identificação das fontes de poluição são aspectos constantemente discutidos e considerados nas exigências ambientais. Contudo, a consolidação do entendimento sobre os processos de poluição difusa, seja ele, vias de transporte, identificação de fontes e quantificação dos impactos são, por diversas vezes, situações subestimadas pela dificuldade do processo. As legislações vigentes, de natureza ambiental, de ordenamento e regulação, ou de recursos hídricos não consideram estas questões.

O primeiro instrumento que necessita adaptação aos aspectos de poluição difusa (considerando quantidade e qualidade) e aos processos de regime não permanentes em rios é o enquadramento dos corpos d'água. É fundamental desenvolver métodos e critérios mais direcionados para a devida quantificação dessas cargas poluidoras, em especial quando se destaca estratégias de remoção de cargas para atendimento a metas de enquadramento. Os aspectos quali-quantitativos dos processos difusos também devem ser controlados e considerados nas estratégias de planejamento e controle.

Além disso, é importante destacar que o não enquadramento de um corpo d'água durante a ocorrência de um evento de chuva é um efeito direto e rápido do aporte de cargas, mas pouco se sabe sobre os efeitos a longo prazo. Não existem trabalhos que tragam esse tipo de abordagem e discussão a nível nacional. Em Kozak (2020) destacou-se a necessidade da continuidade dos estudos sobre os efeitos dos poluentes introduzidos nos corpos hídricos. A ocorrência de chuvas subsequentes favorece a re-suspensão e movimentos das partículas para jusante, os quais, a princípio, estão na sua forma inerte e estável. Contudo, a entrada de mais carga poluidora (tanto pontual quanto difusa) pode causar o desequilíbrio do sistema aquático, o que pode desencadear a dissociação de elementos e, conseqüentemente, efeitos de poluição. Considerando, por exemplo, as cargas de sólidos em suspensão inseridas no rio que atingiram, neste trabalho, valores entre 10 e 100 ton/ha/ano, aproximadamente, podem contribuir para o aporte de poluentes aderidos às partículas. Além disso, o transporte destes sólidos, que se tornarão sedimento para jusante dos rios, pode contribuir com alterações de seção, assoreamento dos corpos d'água, canalização, processo de dragagem.

Uma bacia hidrográfica que tenha seu Plano de Bacias vigente, atuante e que considere os aspectos e variáveis do processo difuso usufrui de benefícios melhores no que concerne a Cobrança pelo Uso da Água e garantia dos usos múltiplos. Contudo, essa abordagem não é utilizada na prática, onde o processo de enquadramento é realizado para a vazão de referência de 70% e o monitoramento em períodos sem ocorrência de chuvas, preferencialmente. No Plano de bacias da CBH-COALIAR (Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, 2013b), onde o Rio Barigui está inserido, a vazão de referência para o enquadramento foi definida através da curva de permanência de vazões, estabelecendo que essa vazão seria igual a vazão $Q_{70\%}$ da curva. Além disso, o plano considera que os eventos pluviais, que geram as cargas difusas na bacia, levariam o curso de água a ficar fora de classe até 30% do tempo. Desta forma, a atualização do enquadramento previsto no Plano de Bacias trata apenas das cargas pontuais, domésticas e industriais (Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, 2013b). Neste contexto estratégias alternativas de integração destes instrumentos devem ser estimuladas.

O entendimento pleno desse aporte de carga pode contribuir para um processo cultural-social de educação e, conseqüente, valorização da dinâmica de uso e ocupação do solo. Assim, promover práticas

sustentáveis de controle e mitigação da poluição vinda por vias difusas pode ser facilitado. A valorização ambiental pode ser fomentada por programas de pagamentos por serviços ambientais e soluções baseadas na natureza, por exemplo. Na perspectiva política dos instrumentos de regulação e controle, Macedo et al. (2022) traz reflexões sobre a existência dessas regulamentações legais que incentivem a aplicação dos instrumentos de planejamento no aspecto do manejo de águas pluviais urbanas. As regiões do Brasil com melhores indicadores sociais e melhor renda são os locais onde prevalece a existência dessas políticas públicas de controle e regulação. Os autores ainda destacam que, o entendimento da importância desses instrumentos, pode refletir na busca por uma maior estrutura e capacidade organizacional de monitoramento e resposta ao manejo de águas pluviais. Novamente, os aspectos de qualidade da água durante esses eventos não foram abordados, ressaltando a necessidade de mais estudos e discussões sobre esse assunto.

Por fim, o instrumento do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos deve ser apto a receber e consistir as informações sobre fontes de poluição, qualidade da água e uso da terra. Particularmente, o impacto do marco legal do saneamento básico, instituído pela Lei Federal nº14.026 em 15 de julho de 2020 (Brasil, 2020), requer uma estratégia de integração voltada para a incorporação dos conceitos dos instrumentos de gestão de recursos hídricos. Para o atendimento ao proposto na nova legislação, de universalização do acesso aos serviços de saneamento básico, é inerente o atendimento à Lei nº 9.433/1997 (Brasil, 1997), seja no que se refere às condições de Outorga de Direito de Uso da Água, Enquadramento e usos múltiplos. Assim, limites e critérios construtivos nesse novo cenário de investimento na infraestrutura sanitária do país, bem como boas estratégias de planejamento requerem soluções adequadas à sustentabilidade ambiental, e que também consideram os aspectos qualitativos dos corpos d'água.

De forma geral, a adaptação nos instrumentos de gestão de recursos hídricos para que considerem os aspectos dos processos difusos não é trivial. Essa mudança demandará profundo conhecimento técnico-científico, bem como investimentos e se versará em um grande desafio para o compartilhamento e compatibilização das informações. Porém, vale destacar, que uma vez entendido, consolidado e perpassado para os gestores dos recursos hídricos, os processos desenvolvidos dentro da bacia serão mais bem controlados, analisados e considerados em qualquer diagnóstico ou necessidade ambiental futura. E assim, o objetivo de assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, previsto na Lei nº 9.433/1997 (Brasil, 1997) será garantido.

CONCLUSÃO

Com este trabalho é possível avaliar o aporte de N_T e P_T no rio durante um evento de chuva e, de maneira geral, observar o comportamento destes parâmetros com a dinâmica das concentrações de parâmetro de qualidade da água na ascensão e recessão do hidrograma. As concentrações de COD foram mais constantes ao longo do evento, uma vez que a fração analisada foi a dissolvida e não associada às partículas inseridas via escoamento superficial. Nestes contextos, o fato de se ter informações obtidas de forma simultânea em 2 pontos de monitoramento, permite entender o efeito de bacia incremental com crescente ação antrópica.

Particularmente, o ponto de monitoramento BA2 apresentou concentrações dos parâmetros de qualidade maiores que o ponto BA1 devido à influência das variações de porcentagem de uso do solo em cada área de influência (Tabela 1). Como esperado, o elevado número de dias sem chuva favoreceu o acúmulo de poluição difusa que, posteriormente, foi carregada para dentro do rio. O aporte de N_T em BA2 (~780 kg/ha/ano) foi 31 vezes maior que em BA1 (~25 kg/ha/ano) e de P_T foi de 11 vezes mais (BA1 com ~26 kg/ha/ano e BA2 com ~ 303 kg/ha/ano). Os parâmetros DQO e SS representam, respectivamente, um aporte anual de 1,05 ton/ha - 33,19 ton/ha (BA1) e 12,39 ton/ha e 103,88 ton/há (BA2). Essas características podem ser associadas às diferentes características de cada área de contribuição. O ponto BA1, a montante e com características de uso do solo mais preservadas, contribuem com materiais advindos da erosão do solo e resíduo superficial de deposição atmosférica, poeira, folha, fuligem, entre outros. Já o ponto BA2, a jusante e com aumento da área urbana e fonte pontual de poluição recebe maior aporte de carga poluidora, isto porque além da contribuição da ETE, os processos de escoamento superficial da bacia nessa área com maior urbanização (e conseqüentemente maior quantidade de infraestrutura urbana como redes de drenagem e pavimentação) além dos processos erosivos (mesmo em pequena escala quando comparadas as demais) continuam acontecendo, indicando, o efeito da contribuição incremental da bacia.

No que compete aos instrumentos de gestão de recursos hídricos, a falta de informações sobre a influência de poluição difusa nos rios é alta, sendo necessária uma mudança de paradigmas nas ações de monitoramento e planejamento. Adaptações precisam ser feitas e fomentadas, visando gerar, ajustar e adequar as informações sobre esse assunto, bem como um sistema de informação unificado e com padrão a nível nacional. Entende-se que considerar os processos de poluição difusa são um desafio para a gestão de recursos hídricos nos próximos anos, mas uma vez consideradas podem fomentar medidas de contenção deste tipo de poluição e, conseqüentemente, retorno em qualidade ambiental para a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido aos pesquisadores autores deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2017) Atlas Esgotos – Despoluição de Bacias Hidrográficas. In *Informações sobre as estações de tratamento existentes, planejadas e avaliadas - Análise preliminar*. Brasília: Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.
- American Public Health Association – APHA. (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th ed.). Washington-DC.
- Bitencourt, C. C. A., Fernandes, C. V. S., & Gallego, C. E. C. (2019). Panorama do enquadramento no Brasil: uma reflexão crítica. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 16(e9). <http://dx.doi.org/10.21168/reg.v16e9>
- Braga, S. M. (2013). *Uma nova abordagem para integração entre quantidade e qualidade da água para a avaliação da poluição difusa* (Tese de doutorado). Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Brasil. (1997). *Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997*: Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. 1997.
- Brasil. (2011). *Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Conselho Nacional de Meio Ambiente.
- Brasil. (2005). *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Conselho Nacional de Meio Ambiente.
- Brasil. (2020). *Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020*: Atualiza o marco legal do saneamento básico. Presidência da República, Secretaria-Geral, Subchefia para Assuntos Jurídicos.
- Bu, H., Meng, W., Zhang, Y., & Wan, J. (2014). Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. *Ecological Indicators*, 41, 187-197.
- Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira – COALIAR. (2013a). Resolução nº 04 do COALIAR, de 11 de julho de 2013. Aprova proposição de atualização do enquadramento dos corpos de água superficiais de domínio do Estado do Paraná, na área de abrangência do Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, em classes, de acordo com os usos preponderantes. Recuperado em 9 de outubro de 2022, de https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-05/resolucao_de_enquadramento.pdf
- Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira – COALIAR. (2013b). *Finalização do plano das bacias do Alto Iguaçu e afluentes do Alto Ribeira*. Relatório Técnico, Produto 10 - Versão 01. Recuperado em 9 de outubro de 2022, de https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-05/finalizacao_plano.pdf
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. (2020). *Apêndice C do Relatório Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo – 2020*: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo.
- Drummond, S. B. M. (2020). *Análise Temporal de Poluentes Difusos no Rio Passaúna por Meio da Utilização de Amostrador Automático*. (Dissertação de mestrado). Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Fendrich, R. (1989). *Chuvas intensas na estação pluviográfica, Curitiba – Prado Velho (PUC-PR)*. Curitiba: ISAM/PUC-PR.
- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty-First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, 173, 41-48.

- Goulart, F. D. A. B. (2017) *Contaminantes emergentes em um país emergente: estudo de caso no Rio Barigui*. (Dissertação de mestrado). Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Grudzien, J. P. (2019). *Utilização de amostrador automático experimental para a identificação do aporte de poluentes no Rio Passaúna*. (Dissertação de mestrado). Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Kozak, C. (2020). *Non point source pollution assessment based on event driven influence* (Tese de doutorado). Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Kozak, C., & Fernandes, C. V. S. (2021) A influência dos eventos de chuva na contribuição da poluição não pontual para a qualidade da águas dos rios. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*. 2021. Belo Horizonte – MG.
- Kozak, C., Fernandes, C. V. S., Braga, S. M., Prado, L. L., Froehner, S., & Hilgert, S. (2019). Water quality dynamic during rainfall episodes: integrated approach to assess diffuse pollution using automatic sampling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(6), 402.
- Kozak, C., Leithold, J., Prado, L. L., Knapik, H. G., Azevedo, J. C. R., Braga, S. M., & Fernandes, C. V. S. (2021). Adaptive monitoring approach to assess dissolved organic matter dynamics during rainfall events. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 423.
- Lee, S. W., Hwang, S. J., Lee, S. B., Hwang, H. S., & Sung, H. C. (2009). Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning*, 92(2), 80-89.
- Macedo, M. B., Vasconcelos, A. F., Kozak, C., Carvalho, D. J., Araújo, L. M., Carvalho, M. E., Macedo, E., Costa, M. E. L., Santos, M. F. N., Moura, P., Graciosa, M. C. P., Strava, A. C., & Dornelles, F. (2022) Organização legal do setor de manejo de águas pluviais no Brasil: Instrumentos de planejamento, desastres e indicadores socioeconômicos. In *Anais do XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas e IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos*. 2022. Brasília – DF.
- McCarthy, D. T., Zhang, K., Westerlund, C., Viklander, M., Bertrand-Krajewski, J-L., Fletcher, T. D., & Deletic, A. (2018). Assessment of sampling strategies for estimation of site mean concentrations of stormwater pollutants. *Water Research*, 129, 297-304.
- Novotny, V. (2003). *Water quality: diffuse pollution and watershed management*. John Wiley & Sons.
- Nowatzki, A., Couto, J. P. B., Paula, E. V., & Fernandes, C. V. S. (2021). Restrições socioambientais ao uso da terra e seu estado de antropização na UGRH do Paranapanema: subsídios à gestão territorial. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 18, e15. <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v18e15>
- Porto, M. F., & Porto, R. L. L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avançados*, 22(63), 43-60.
- Sperling, M. V. (2017). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos* (4. ed.). Editora UFMG.
- United States Environmental Protection Agency – USEPA. (1984). *Report to Congress: Nonpoint Source Pollution in the US*.
- Wise, J. L., Horn, D. J. V., Diefendorf, A. F., Regier, P. J., Lowell, T. V., & Dahm, C. N. (2019). Dissolved organic matter dynamics in stormwater runoff in a dryland urban region. *Journal of Arid Environments*, 165, 55-63.
- Worsfold, P., McKelvie, I., & Monbet, P. (2016). Determination of phosphorus in natural waters: a historical review. *Analytica Chimica Acta*, 918, 8-20.
- Yu, S., Xu, Z., Wu, W., & Zuo, D. (2016). Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China. *Ecological Indicators*, 60, 202-212.

Contribuições dos autores:

Caroline Kozak: responsável pela execução metodológica deste trabalho, auxiliando nas atividades de campo para coleta de amostras, auxílio no laboratório, processamento e análise dos dados e elaboração deste texto.

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes: auxiliou na viabilidade de espaço e recursos, planejamento experimental, atividades de campo para coleta das amostras e elaboração deste texto.