



MODELAGEM DA POLUIÇÃO PONTUAL E DIFUSA PARA A BACIA DO RIBEIRÃO GRAIPU, MG

Geovana da Costa Ferreira ⁽¹⁾, Maderson Diego Rocha de Moura ⁽²⁾, Luciano Marques Pinheiro Dias ⁽³⁾, Vitória Assunção Miranda ⁽⁴⁾, Grazielle Wolf de Almeida ⁽⁵⁾, Patricia Pereira Gomes ⁽⁵⁾, Jonathan da Rocha Miranda ⁽⁶⁾

RESUMO

O estudo teve como objetivo identificar as principais fontes de poluição por nitrogênio (N) e fósforo (P) na bacia do Ribeirão Graipu (MG), por meio da integração entre geoprocessamento e modelagem hidrológica. Foram coletadas amostras em 25 pontos de monitoramento, delimitando-se as microbacias contribuintes. Utilizaram-se dados do *Copernicus DEM*, MapBiomass, CHIRPS e IGAM para estimar vazão, declividade e cargas difusas de nutrientes. As cargas pontuais e difusas foram correlacionadas com uso do modelo *Random Forest* (100 árvores, validação *Leave-One-Out*), que apresentou alta correlação ($r > 0,95$) entre valores observados e estimados. A vazão média e a vazão acumulada foram as variáveis mais determinantes, evidenciando que a dinâmica hidrológica e o uso do solo agrícola controlam o transporte de nutrientes. Os resultados reforçam a necessidade de ações conservacionistas e recuperação de áreas ripárias para reduzir a poluição difusa e melhorar a qualidade da água.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; nutrientes; *Random Forest*; geoprocessamento.

1 INTRODUÇÃO

A poluição por nutrientes, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P), constitui uma das principais causas de degradação dos ecossistemas aquáticos, favorecendo o crescimento excessivo de algas, a perda de oxigênio dissolvido e a consequente eutrofização dos corpos hídricos (ANJINHO, 2020). A identificação das fontes de poluição e das áreas críticas de aporte de nutrientes é essencial para subsidiar o planejamento ambiental e promover a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Tanto as fontes pontuais — como estações de tratamento de esgoto e efluentes industriais — quanto as fontes difusas — associadas ao escoamento agrícola e urbano —

1 Graduando em Agronomia, *Campus* São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

2 Pós-graduando em Meio Ambiente, *Campus* São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

3 Graduando em Engenharia Florestal *Campus* São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

4 Graduando em Ciências Biológicas *Campus* São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

5 Professoras Doutoras, *Campus* São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

6 Professor Doutor, *Campus* São João Evangelista, Instituto Federal de Minas Gerais.

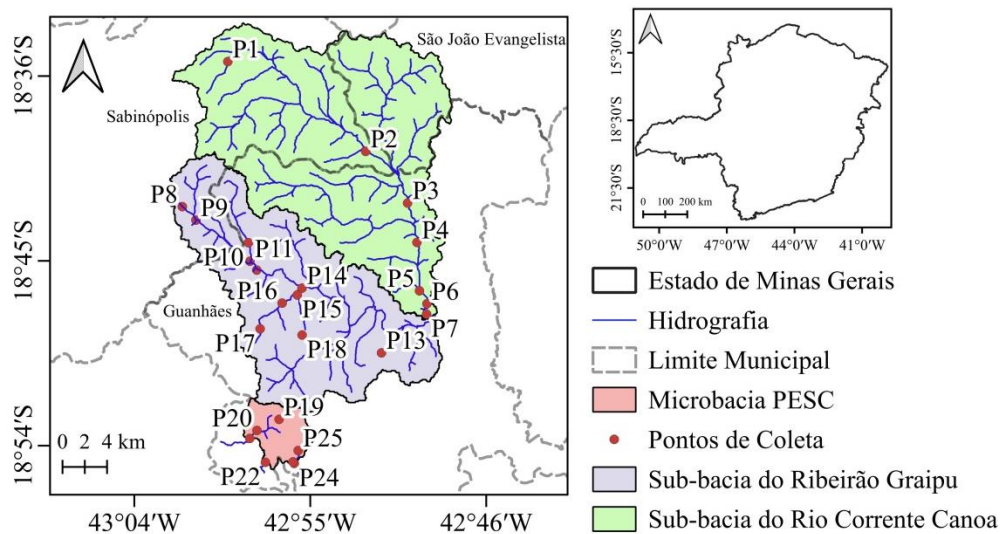
contribuem para o enriquecimento de nutrientes nos cursos d'água, exigindo estratégias de controle diferenciadas (VON SPERLING, 2005). Nesse contexto, o uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento possibilita o mapeamento espacial das áreas de maior contribuição de N e P, permitindo compreender como o uso e a cobertura do solo influenciam o transporte de poluentes (STEINKE; SAITO, 2008).

A modelagem hidrológica, por sua vez, é uma ferramenta fundamental para estimar o fluxo de água e o transporte de nutrientes em bacias hidrográficas, permitindo identificar as rotas preferenciais de escoamento e as zonas críticas de poluição (LIBOS; ROTUNNO FILHO; ZEILHOFER, 2003). Assim, o presente estudo tem como objetivo identificar as principais fontes de poluição por nitrogênio e fósforo na bacia do ribeirão Graipu, utilizando modelagem hidrológica e análise espacial para subsidiar ações de manejo e conservação dos recursos hídricos.

2 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido na bacia do Ribeirão Graipu, Parque Estadual Serra do Candonga e Rio Corrente Canoa, englobando áreas dos municípios de Guanhães, Sabinópolis e São João Evangelista, Minas Gerais (Figura 1), inserida no bioma Mata Atlântica e responsável pelo principal ponto de captação de água para abastecimento público (SAAE, 2006).

Figura 1. Localização dos pontos amostrais de coleta de N e P



Foram definidos 25 pontos de monitoramento ao longo da rede de drenagem, abrangendo diferentes condições de uso e cobertura do solo. Em cada ponto foram coletadas

amostras de água em campo para análise laboratorial dos teores de nitrogênio total (N) e fósforo total (P). A partir desses pontos, foi realizada a delimitação das microbacias contribuintes, utilizando o modelo digital de elevação *Copernicus DEM* e o método de direção de fluxo, de modo a identificar a área efetiva de contribuição de cada ponto de vazão.

Os dados de uso e cobertura do solo foram obtidos do MapBiomas, e os de precipitação média anual do CHIRPS. As vazões médias de longo termo foram derivadas dos levantamentos do IGAM e convertidas para $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. As cargas difusas de N e P foram estimadas com base em coeficientes de exportação por classe de uso do solo, ponderados pelo Indicador de Distância (DI).

Posteriormente, os parâmetros estimados — vazão, declividade, cargas difusas de N e P — de cada microbacia foram correlacionados com as cargas pontuais para fins de modelagem preditiva. O modelo utilizado foi o *Random Forest Regressor*, configurado com 100 árvores de decisão e validação cruzada *Leave-One-Out*, permitindo avaliar a relação entre variáveis espaciais e a concentração de nutrientes observada. Essa abordagem possibilitou identificar as áreas críticas de aporte de nutrientes e avaliar a eficiência das práticas de manejo existentes na bacia.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem hidrológica e da análise de regressão por *Random Forest* revelam a forte dependência entre a dinâmica hidrológica e a distribuição espacial das cargas de nutrientes na bacia do Ribeirão Graipu. A alta correlação obtida para N ($r = 0,95$) e P ($r = 0,95$) evidencia que as variáveis associadas à vazão média e ao escoamento superficial são determinantes para explicar a variabilidade das concentrações desses nutrientes nos corpos d'água (Tabela 1). Isso reforça o papel da hidrologia como elemento estruturante na dispersão e transporte de poluentes em bacias hidrográficas.

Tabela 1. Desempenho dos modelos de Nitrogênio (N) e Fósforo (P)

Indicador estatístico	Nitrogênio (N)	Fósforo (P)
Coefficiente de correlação (r)	0,9567	0,9506
Erro médio absoluto (MAE)	2,92	1,10
Raiz do erro quadrático médio (RMSE)	5,79	1,78

A predominância das variáveis Vazão média e Vazão acumulada entre os atributos mais importantes indica que os períodos de maior vazão potencializam o transporte de nutrientes,



principalmente em áreas agrícolas e pastagens que apresentam manejo inadequado do solo (Tabela 2). A contribuição das cargas difusas (N e P) reforça que o escoamento superficial e o carreamento de fertilizantes e matéria orgânica representam as principais fontes de contaminação não pontual. Por outro lado, a baixa relevância da declividade média demonstra que, embora o relevo influencie o escoamento, as práticas de uso e cobertura do solo possuem papel mais determinante no aporte de poluentes.

Tabela 2. Importância relativa das variáveis utilizadas na regressão Random Forest.

Descrição	Importância relativa – N (%)	Importância relativa – P (%)
Vazão média medida	100,0	100,0
Vazão acumulada	57,2	72,8
Carga difusa de nitrogênio	46,8	38,6
Carga difusa de fósforo	34,6	50,0
Declividade média da microbacia	0,0	0,0

A análise espacial mostra que microbacias com maior intensidade de uso agropecuário tendem a apresentar valores elevados de N e P, sobretudo em regiões com solo exposto e ausência de vegetação ciliar. Essas áreas atuam como zonas críticas de exportação de nutrientes, aumentando o risco de eutrofização e de perda da qualidade da água utilizada para abastecimento público. Em contrapartida, as microbacias com maior cobertura florestal e vegetação ripária preservada apresentaram valores mais baixos, confirmando a importância dos serviços ecossistêmicos na retenção e filtragem natural de nutrientes.

Assim, o modelo aplicado não apenas reproduziu com precisão as relações hidrológicas, mas também permitiu identificar os padrões ambientais que controlam a poluição difusa na bacia. A abordagem adotada evidencia que ações de manejo voltadas à recuperação de áreas ripárias, ao controle da erosão e ao manejo adequado de fertilizantes são essenciais para reduzir as cargas exportadas. Além disso, a integração entre dados de campo e modelagem estatística reforça o potencial dessa metodologia para o planejamento territorial e a gestão ambiental de microbacias, especialmente em regiões com crescente pressão agropecuária e demanda hídrica.



4 CONCLUSÃO

A modelagem hidrológica aplicada à bacia do Ribeirão Graipu demonstrou elevada eficiência na identificação das áreas críticas de aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P). A forte correlação entre as variáveis hidrológicas e as cargas observadas confirma o papel da vazão e do uso do solo na dinâmica de transporte de nutrientes.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao apoio fundamental concedido pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e pelo SAAE-Guanhães-MG (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Guanhães - Minas Gerais) para a realização deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANJINHO, P. S.; NEVES, G. L.; BARBOSA, M. A. G. A.; MAUAD, F. F. Análise da qualidade das águas e do estado trófico de cursos hídricos afluentes ao Reservatório do Lobo, Itirapina, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, p. 364-376, 2020.

LIBOS, M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; ZEILHOFER, P. Modelagem da poluição não pontual na bacia do rio Cuiabá baseada em Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 4, p. 113-135, 2003.

STEINKE, V. A.; SAITO, C. H. Exportação de carga poluidora para identificação de áreas úmidas sob risco ambiental na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 2, p. 43-67, 2008.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG**, 2005. 452 p.