Avaliação de Método para Identificação de Mananciais Vulneráveis à Poluição Acidental por Fontes Pontuais e Lineares: Aplicação em Sub-bacia da Região Hidrográfica IV - RJ

Olga Betânia Dias Fica Piras[1]; Júlia Teixeira Barbosa[2]; Christian Basílio Oliveira[3]; Maria Luisa Rodrigues Lado[4]; Gustavo Spiegelberg[5]; Francis Martins Miranda[6]; Osvaldo Moura Rezende[7]

Palavras-Chave – Poluição Acidental; Segurança Hídrica; Abastecimento Populacional; Ferramentas de Georreferenciamento.

INTRODUÇÃO

A área de estudo abrange uma bacia hidrográfica estratégica na Região Hidrográfica IV do estado do Rio de Janeiro (Piabanha), território que abriga importantes eixos logísticos e industriais, com destaque para as rodovias federais BR-040 e BR-116.

A identificação de caminhos preferenciais de escoamento superficial associados a fontes de poluição potencial constitui etapa fundamental no planejamento da gestão de recursos hídricos, especialmente em bacias que abrigam corredores logísticos e industriais de expressiva magnitude. Incidentes severos, como vazamentos industriais e tombamentos de caminhões-tanque, impulsionados pelo fluxo contínuo de produtos perigosos e o adensamento fabril local propagam plumas de contaminação a jusante com alta velocidade de escoamento. Quando tais substâncias atingem as captações e os mananciais sensíveis, provocam impactos imediatos sobre as populações dependentes, resultando no colapso do abastecimento, emergências de saúde pública e graves prejuízos socioeconômicos locais.

Diante do panorama, propõe-se analisar o risco de degradação de mananciais estratégicos e suas implicações diretas e indiretas sobre os múltiplos contingentes demográficos e comunidades que têm sua subsistência e consumo hídrico sob ameaça direta de contaminação. O estudo busca preencher lacunas de planejamento territorial e fornecer ferramentas preditivas para a gestão integrada de riscos hídricos em bacias-alvo nos recortes hidrográficos delimitados.

METODOLOGIA

A estruturação metodológica apoia-se no cruzamento geoespacial em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS para o processamento de dados. O procedimento técnico central correlaciona a localização espacial das zonas específicas de captação de recursos hídricos destinadas ao abastecimento público com os vetores de perigo acidental mapeados na região.

Os vetores de risco dividem-se em duas categorias principais: fontes pontuais e fontes lineares de perigo. As fontes pontuais englobam os pontos cadastrais de complexos industriais, enquanto as fontes lineares compreendem às malhas rodoviárias federal e estadual, elegendo os eixos rodoviários da BR-116 e da BR-040 como exemplares críticos devido ao intenso fluxo diário de cargas químicas perigosas. Todos esses dados foram obtidos a partir do portal GEOINEA, base de dados do órgão

1) Laboratório Água e Cidade, Escola Politécnica da UFRJ (LAC/DRHIMA-POLI/UFRJ), aolga.marinha.20231@poli.ufrj.br
2) Laboratório Água e Cidade, Escola Politécnica da UFRJ (LAC/DRHIMA-POLI/UFRJ), julia.teixeira@poli.ufrj.br
3) Programa de Engenharia Urbana da Escola Politécnica da UFRJ (PEU-POLI/UFRJ), christian.basilio.peu@poli.ufrj.br
4) Programa de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica e Escola de Química da UFRJ (PEA-POLI&EQ/UFRJ), mluisa.rod@poli.ufrj.br
5) Programa de Engenharia Naval e Oceânica da COPPE/UFRJ (PENO-COPPE/UFRJ), gustavo.spiegelberg@gmail.com
6) Programa de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica e Escola de Química da UFRJ (PEA-POLI&EQ/UFRJ), francismmiranda@gmail.com
7) Programa de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica e Escola de Química da UFRJ (PEA-POLI&EQ/UFRJ); Mestrado Profissional em Arquitetura Paisagística da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ (MPAP-FAU/UFRJ), omrezende@poli.ufrj.br

ambiental INEA-RJ junto aos órgãos que possuem geoserviços de dados complementares. Eles foram mesclados em uma única camada vetorial de pontos, reprojetada para o sistema UTM Zona 23S (EPSG:31983) e salva em formato *Shapefile* (.shp).

A abordagem fundamenta-se no processamento hidrológico de um Modelo Digital de Terreno (MDT) recortado para a extensão da Região Hidrográfica IV. Nessa, a reprojeção prévia dos dados, originalmente em SIRGAS 2000 (EPSG: 4674), é condição necessária para que o algoritmo D8 calcule corretamente as direções de fluxo com base em distâncias euclidianas entre células, operação que produz resultados incorretos quando realizada sobre coordenadas angulares.

Os produtos hidrológicos tidos por meio do *Whitebox Tools* foram: a direção de fluxo (***D8 Pointer***), com o algoritmo sendo aplicado ao MDT para calcular a direção preferencial de escoamento de cada célula *raster* em relação às suas oito células vizinhas; o rastreamento dos caminhos de fluxo desde pontos de risco ***(TraceDownslopeFlowpaths)*** tido a partir dos pontos de risco industriais e rodoviários (shape original em linhas convertido com ***Points along geometry + Dissolve*** para pontos equidistantes de 1km sobre as estradas selecionadas) foram usados para mapear a trajetória do escoamento superficial até a saída (exutório) da bacia hidrográfica; conversão dos caminhos *raster* para linhas vetoriais (***RasterStreamsToVector***); ajuste dos pontos de captação (***SnapPourPoints***) para corrigir desalinhamentos; delimitação da bacia hidrográfica contribuinte ao ponto de captação (***Watershed***), utilizando o ponto de captação a jusante como *outlet*; e o cálculo do comprimento de cada caminho de fluxo (***Field Calculator*** - função geométrica nativa *$length*) sobre a camada vetorial das rotas de escoamento para quantificar o comprimento linear de cada caminho de fluxo e classificá-los em faixas de distância até os pontos de captação.

Nesse sentido, com o objetivo de sintetizar os resultados da distância topográfica das fontes ao ponto de captação e densidade de fontes por zona de contribuição em uma métrica única e comparável entre os mananciais analisados, foi desenvolvido o Índice de Perigo Potencial (IPP), que permite hierarquizar os pontos segundo o grau de risco acumulado, integrando quatro dimensões normalizadas em escala de 0 a 100, de menor ao maior risco, e seus devidos pesos na equação: $\boldsymbol{D_{pont}}$, distância topográfica normalizada à fonte pontual mais próxima (inversamente proporcional); peso: 25%; $\boldsymbol{D_{lin}}$, distância topográfica normalizada à fonte linear mais próxima (inversamente proporcional); peso: 25%; ***Dens***, densidade de fontes ponderada por zona de proximidade, com peso triplo para a zona 0–5 km (janela de resposta mais crítica), peso duplo para 5–10 km e peso simples para 10–15 km; normalizada pelo valor máximo observado; peso: 30%; e $\boldsymbol{N_{total}}$, número total de fontes de risco na bacia de contribuição, normalizado pelo valor máximo observado; peso: 20%.

A fórmula resultante é:

$$IPP = (0{,}25 \times \mathrm{Dpont} + 0{,}25 \times \mathrm{Dlin} + 0{,}30 \times \mathrm{Dens} + 0{,}20 \times \mathrm{Ntotal})$$

Os pesos foram atribuídos de forma a refletir a relevância operacional de cada dimensão na ausência de dados hidrométricos: a densidade ponderada recebe o maior peso por integrar simultaneamente a proximidade e a quantidade de fontes; as distâncias mínimas recebem pesos iguais por representarem o pior cenário individual de cada categoria de fonte; e o total de fontes completa o índice com uma medida de pressão antrópica acumulada.

RESULTADOS

O presente estudo mapeou os cenários em que a sobreposição territorial entre a infraestrutura de transporte, o adensamento fabril e a rede hidrográfica determina o potencial de contaminação hídrica. O modelo cartográfico identificou graficamente os nós críticos da bacia, permitindo antecipar o comportamento de plumas contaminantes e estimar a consequente necessidade de interrupção operacional emergencial de Estações de Tratamento de Água (ETAs), mitigando os riscos de colapso sistêmico no abastecimento.

A Figura 1 apresenta o mapa de localização e a delimitação da sub-bacia de estudo na RHIV, espacializando o modelo conceitual e os resultados da simulação hidrológica. Integra-se, de forma sistêmica, os mapas de localização regional e estadual aos componentes críticos de segurança hídrica da área de drenagem. Destacam-se os pontos de captação de água bruta (em azul) que são interceptados pelos *flowpaths* e assim estruturados como Pontos 1, 2 e 3. No modelo hidrológico implementado, o Ponto 1 assume a função de exutório (*outlet*) principal, tendo sido a feição de controle utilizada para fechar e delimitar o polígono vetorizado bacia hidrográfica.

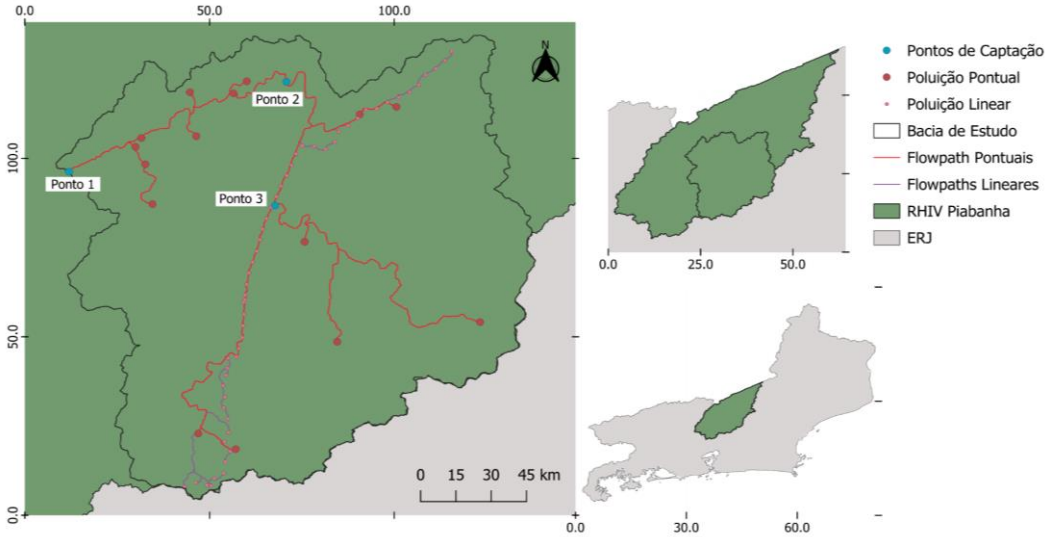


Figura 1: Localização e delimitação das rotas de fluxo (flowpaths) a partir de fontes de poluição potencial até os mananciais selecionados na bacia de estudo da RHIV. Fonte: autoria própria.

Tabela 1 – Diagnóstico de Proximidade Imediata a Vetores Críticos de Impacto

Ponto	Distância das fontes de poluição pontual (km)	Distância das fontes de poluição linear (km)
Ponto 1	7,167	36,383
Ponto 2	7,732	10,797
Ponto 3	9,094	-

Na tabela 1, observam-se os mananciais expostos a um maior risco potencial em eventos de acidente por meio da quantificação da distância linear e hidrológica entre os exutórios de captação e as fontes poluidoras correlacionadas. O método discriminou as trajetórias exatas dos eixos de escoamento, computando, por exemplo, para o Ponto 1, que a fonte pontual mais próxima está conectada a um caminho de escoamento significativamente menor ao da fonte de poluição linear, indicando que, embora o risco industrial seja geometricamente mais próximo, um eventual sinistro rodoviário na porção superior da bacia apresenta calha de escoamento significativamente longa e atua como um fator de amortecimento temporal natural para a resposta institucional.

Tabela 2 – Estratificação do Risco e Zoneamento por Densidade de Fontes Contaminantes

Ponto	Distância ao ponto de captação (km)	N° fontes industriais	N° fontes rodoviárias	Área (km²)	Densidade (fontes/km²)
Ponto 1	0 – 5	0	0	27,0	0
	5 – 10	4	0	89,2	0,0448
	10 – 15	3	0	127,2	0,0236
Ponto 2	0 – 5	2	0	62,6	0,0320
	5 – 10	3	17	123,9	0,1695
	10 – 15	5	10	210,4	0,0713
Ponto 3	0 – 5	1	10	78,5	0,1392
	5 – 10	2	14	230,4	0,0694
	10 – 15 km	9	12	345,0	0,0609

O zoneamento territorial cumulativo, estruturado na Tabela 2 por meio de intervalos concêntricos de proximidade (5, 10 e 15 km), revela perfis distintos de vulnerabilidade hídrica para cada manancial, com variações sensivelmente relacionadas ao seu posicionamento geográfico. Apontando-se especificamente o ponto mais a jusante, o perigo imediato (0–5 km) possui caráter menos logístico devido à ausência de eixos rodoviários, transicionando para uma ameaça predominantemente industrial entre todas as respectivas zonas. Sob essa lógica sistêmica, quanto maior for a densidade de potenciais causadores de desastres, maior será o alerta para uma intervenção imediata e apropriada para o devido território. Assim, a potencialidade do risco mostra considerável heterogeneidade na sub-bacia, ainda que continue apresentando uma validação consistente quando cruzada com as rotas de escoamento real adjacente exibidas na Tabela 1.

A aplicação do IPP condensou os indicadores das Tabelas 1 e 2 em uma pontuação única para cada ponto de captação, permitindo o ordenamento objetivo dos mananciais por grau de risco. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

O método utiliza a distância hidrológica como um fator determinante para estimar a gravidade do cenário em termos operacionais, privilegiando a coexistência de vulnerabilidades. Outro ponto de influência é a criticidade da pressão antrópica depender diretamente de estar efetivamente conectada ao ponto de captação por trajetórias de escoamento superficial (*flowpaths*) curtas e diretas.

Tabela 3 – Índice de Perigo Potencial (IPP) e classificação dos mananciais

Ranking	Ponto	Dpont	Dlin	Dens	Ntotal	IPP final
1º	Ponto 2	70,7	100	78,0	73,2	**80,7**
2º	Ponto 3	0	0	100,0	100,0	**50,0**
3º	Ponto 1	100,0	0	0	0	**25,0**

CONCLUSÃO

As discussões dessa proposta de pesquisa indicam que a integração de dados de infraestrutura logística e saneamento em ambiente SIG constitui uma metodologia eficaz para o diagnóstico da vulnerabilidade hídrica territorial. A viabilidade do uso integrado do *Whitebox Tools* para o rastreamento de caminhos preferenciais de escoamento com origem em fontes de poluição potencial até pontos de captação de água constitui subsídio relevante para sistemas de alerta precoce e planos de contingência em bacias hidrográficas sob pressão antrópica.

Recomenda-se, em etapas complementares futuras, a incorporação de dados de velocidade média de escoamento obtidos junto ao HidroWeb/ANA para os principais rios das bacias estudadas, o que permitirá converter as distâncias em estimativas temporais de propagação de contaminantes aos pontos de captação, informação de alta relevância operacional para a gestão de emergências ambientais. Além disso, poderão ser incorporadas informações direcionadas à natureza e volume dos produtos transportados, sistematizadas nos registros da ANTT, para a ponderação do risco associado a cada segmento rodoviário segundo o perfil de cargas efetivamente em trânsito.

O conjunto de produtos cartográficos e analíticos gerados, como o IPP, fornece base territorial objetiva para a identificação de cenários de maior vulnerabilidade, a priorização de ações de monitoramento e a estruturação de protocolos de contingência adaptados às especificidades hidrográficas da Região Hidrográfica fluminense em análise. A aplicação prática deste modelo preditivo oferece relevância direta para comitês de bacias e agentes de Defesa Civil na salvaguarda da saúde pública e resiliência hídrica.

REFERÊNCIAS

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: INEA, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2021.