ReGeo ISSN: 2177-3246

DRONES NA RECUPERAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS IMPACTADAS: REVISÃO DA AMOSTRAGEM HIDROQUÍMICA E DO REPOVOAMENTO ÍCTICO COMO PILARES OPERACIONAIS

DRONES IN THE RECOVERY OF IMPACTED RIVER BASINS: A REVIEW OF HYDROCHEMICAL SAMPLING AND FISH RESTOCKING AS OPERATIONAL PILLARS

DRONES EN LA RECUPERACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS IMPACTADAS: REVISIÓN DEL MUESTREO HIDROQUÍMICO Y DEL REPOBLAMIENTO ÍCTICO COMO PILARES OPERATIVOS

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-088

Data de submissão: 14/08/2026 **Data de publicação:** 14/10/2026

Christiano Pedro Guirlanda
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: cpguirlanda@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7909-6951

Gabriela Luiza Almeida Silva
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: gabi-lsilva@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0002-6834-68872

Ana Clara Cassin Cordeiro
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: anacassin26@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5977-85444

Helen Martins Marques
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: helenmmartins@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0006-7812-28355

Diego Fernandes Almeida Silva
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: diego.telecoom@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0005-0628-3261

Artur Jesus Araujo
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: artur.jesus.314@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-7577-5027

Juan Canellas Bosch Netto
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
E-mail: jboschbr@ufsj.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2719-7689

RESUMO
A recuperação de bacias hidrográficas impactadas por desastres de mineração depende de duas operações de campo onerosas, arriscadas e de baixa resolução espaço-temporal: o monitoramento hidroquímico e o repovoamento íctico. Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) emergiram, na última década, como plataforma capaz de transformar ambas, deslocando o paradigma da observação passiva para a intervenção física. Esta revisão adota desenho híbrido, com revisão sistemática (PAGE *et al*, 2020) para a amostragem de água por drone e análise prospectiva estruturada para o peixamento por drone. Os achados evidenciam assimetria acentuada. A amostragem hidroquímica por VANT é campo consolidado e estatisticamente validado, porém concentrado em corpos lênticos e incipiente em rios de fluxo rápido, nos quais a hidrodinâmica, a vegetação ripária e a perda de sinal GNSS impõem barreiras não resolvidas. Em contraste, o peixamento por drone permanece praticamente ausente da literatura revisada por pares, embora a soltura aérea tripulada tenha décadas de uso e sobrevivência superior à dos métodos terrestres. Argumenta-se que essa lacuna é uma fronteira de engenharia, e não uma inviabilidade, e propõe-se um arcabouço que integra amostragem, análise e liberação de alevinos em uma única cadeia de recuperação, ilustrada pela bacia do Rio Doce após o desastre de Fundão.

Palavras-chave: Veículos Aéreos Não Tripulados. Amostragem de Água. Qualidade de Água Fluvial. Repovoamento. Peixamento. Alevinos. Recuperação de Bacias.

ABSTRACT
The recovery of river basins impacted by mining disasters depends on two costly, hazardous field operations of low spatiotemporal resolution: hydrochemical monitoring and fish restocking. Over the past decade, unmanned aerial vehicles (UAVs) have emerged as a platform capable of transforming both, shifting the paradigm from passive observation to physical intervention. This review adopts a hybrid design, combining a systematic review (PAGE *et al*, 2020) of drone-based water sampling with a structured prospective analysis of drone-based fish stocking. The findings reveal a marked asymmetry. UAV-based hydrochemical sampling is a consolidated and statistically validated field, yet it is concentrated on lentic waters and remains incipient in fast-flowing rivers, where hydrodynamics, riparian vegetation and GNSS signal loss pose unresolved barriers. In contrast, drone-based fish stocking is virtually absent from the peer-reviewed literature, even though crewed aerial stocking has been used for decades with survival exceeding that of ground-based methods. We argue that this gap is an engineering frontier rather than an infeasibility, and propose a framework integrating sampling, analysis and fingerling release into a single recovery chain, illustrated by the Rio Doce basin after the Fundão dam disaster.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles. Water Sampling. River Water Quality. Restocking. Fish Stocking. Fingerlings. Basin Recovery.

RESUMEN
La recuperación de cuencas hidrográficas impactadas por desastres mineros depende de dos operaciones de campo costosas, riesgosas y de baja resolución espaciotemporal: el monitoreo hidroquímico y el repoblamiento íctico. En la última década, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) surgieron como plataforma capaz de transformar ambas, desplazando el paradigma de la observación pasiva a la intervención física. Esta revisión adopta un diseño híbrido, con revisión sistemática (PAGE *et al*, 2020) para el muestreo de agua con drones y análisis prospectivo estructurado para la siembra de peces con drones. Los hallazgos evidencian una marcada asimetría. El muestreo hidroquímico con VANT es un campo consolidado y estadísticamente validado, pero concentrado en cuerpos lénticos e incipiente en ríos de flujo rápido, donde la hidrodinámica, la vegetación ribereña y

la pérdida de señal GNSS imponen barreras no resueltas. En contraste, la siembra de peces con drones permanece prácticamente ausente de la literatura revisada por pares, aunque la liberación aérea tripulada tenga décadas de uso y una supervivencia superior a la de los métodos terrestres. Se argumenta que esta brecha es una frontera de ingeniería, y no una inviabilidad, y se propone un marco que integra muestreo, análisis y liberación de alevines en una única cadena de recuperación, ilustrada por la cuenca del río Doce tras el desastre de Fundão.

Palabras clave: Vehículos Aéreos no Tripulados. Muestreo de Agua. Calidad del Agua Fluvial. Repoblamiento. Siembra de Peces. Alevines. Recuperación de Cuencas.

1 INTRODUÇÃO

A degradação de bacias hidrográficas impõe um problema de escala. Um rio é um sistema aberto, longitudinalmente contínuo e temporalmente não estacionário, de modo que qualquer inferência sobre seu estado depende criticamente da resolução espaço-temporal da amostragem. Essa resolução é limitada não pela capacidade analítica do laboratório, mas pelo gargalo logístico da coleta: custo, risco ocupacional e lentidão de posicionar um operador, tipicamente embarcado, em cada ponto de interesse (Graham *et al.*, 2022). O mesmo gargalo governa a operação complementar da recuperação, o repovoamento íctico, em que alevinos precisam ser liberados em trechos frequentemente inacessíveis.

O caso emblemático no Brasil é a bacia do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, em novembro de 2015, quando cerca de 32 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro foram liberados no sistema fluvial, elevando a turbidez e os sólidos suspensos a ordens de magnitude acima dos limites legais (Hobbs; Bigot; Smith, 2020; Mourão *et al.*, 2023). Anos depois, o monitoramento ainda registrava alteração físico-química e presença de metais (Abessa *et al.*, 2024; Pauly; Yamamoto; Abessa, 2025). Os efeitos sobre a ictiofauna permanecem controversos: levantamentos hidroacústicos não detectaram diferença significativa de biomassa entre trechos impactados e controles (Hobbs; Bigot; Smith, 2020), mas estudos recentes documentam bioacumulação de metais e alterações histopatológicas em peixes da bacia (Freitas *et al.*, 2025). Esse tipo de problema extenso, repetitivo, de acesso hostil e arriscado ao operador define o nicho em que os veículos aéreos não tripulados (VANTs) passam a representar mudança de paradigma operacional.

Na última década, o drone consolidou-se como ferramenta de sensoriamento em sistemas terrestres, límnicos e fluviais (Liu *et al.*, 2025), e sua trajetória deslocou-se do sensoriamento passivo para a ação física, como a coleta de amostras e a entrega de carga útil, à medida que autonomia e capacidade de carga evoluíram (Yao *et al.*, 2025). Essa transição de observar para intervir constitui o eixo conceitual deste trabalho.

A literatura sobre VANTs em ambientes aquáticos divide-se em duas comunidades que raramente dialogam. A engenharia química e ambiental produziu um corpo maduro sobre amostragem da água por drone, com validação frente à amostragem tradicional e integração a plataformas de internet das coisas (IoT) e gêmeos digitais (Graham *et al.*, 2022; Ryu, 2022; Hamzah; Aqlan; Baidya, 2024). A engenharia de pesca consolidou o uso de VANTs para monitoramento de estoques, biomassa e habitat (Ubina; Cheng, 2022; Ganie *et al.*, 2025), sem avançar sobre a liberação de organismos. O repovoamento aéreo em si não é novo: agências norte-americanas soltam alevinos por aeronave tripulada há décadas, com alta sobrevivência, porque o pequeno porte do alevino faz o arrasto do ar

frear a queda (Minnesota Department of Natural Resources, 2020; Utah Division of Wildlife Resources, [2024?]). O que inexiste é a transposição validada dessa operação para plataformas não tripuladas.

Diante dessa assimetria, o objetivo deste trabalho é mapear o estado da arte do uso de VANTs na amostragem hidroquímica e no repovoamento íctico e delinear uma agenda de pesquisa. Os objetivos específicos são: (i) sistematizar plataformas, cargas úteis e desempenho metrológico da amostragem hidroquímica por VANT; (ii) caracterizar a maturidade tecnológica de cada aplicação; (iii) delimitar os requisitos aeromecânicos, fisiológicos e regulatórios do peixamento por drone; e (iv) propor um arcabouço integrado de recuperação de bacias, sintetizado na Figura 1.

Figura 1. Aplicações de drones em bacias hidrográficas: amostragem hidroquímica e repovoamento íctico como pilares operacionais.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão de literatura com desenho metodológico híbrido, justificado pela assimetria de maturidade entre os dois eixos analisados. Para o eixo da amostragem hidroquímica por VANT, cujo corpus é suficiente e maduro, aplicou-se revisão sistemática formal conduzida segundo as diretrizes PRISMA 2020. Para o eixo do peixamento por drone, cujo corpus primário é quase inexistente, uma revisão sistemática clássica seria metodologicamente vazia; adotou-se, portanto, análise prospectiva estruturada, ancorada na literatura adjacente e organizada como mapeamento de lacuna e agenda de pesquisa.

2.1 ANÁLISE PROSPECTIVA ESTRUTURADA DO PEIXAMENTO POR VANT

Para o peixamento por drone, a ausência de estudos primários revisados por pares conduziu a uma análise prospectiva em três frentes de literatura adjacente: (i) soltura aérea tripulada de alevinos; (ii) fisiologia do estresse e sobrevivência pós-soltura de peixes juvenis; e (iii) engenharia de entrega aérea de carga útil. Examinou-se ainda o arcabouço regulatório brasileiro aplicável à introdução de organismos aquáticos e à operação de aeronaves remotamente pilotadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AMOSTRAGEM HIDROQUÍMICA DE RIOS POR VANT

3.1.1 Panorama das aplicações ambientais

Os dois pilares analisados inserem-se no campo mais amplo do uso ambiental de VANTs, que abrange do mapeamento de habitats e da qualidade da água e do ar ao levantamento de fauna e à restauração de ecossistemas (Marin *et al.*, 2023; Stamatopoulos; Le; Daver, 2024; Liu *et al.*, 2025). Câmeras térmicas e RGB acopladas a VANTs detectam e contam indivíduos com menor perturbação e maior cobertura que os métodos terrestres (Corcoran *et al.*, 2021; Iglay *et al.*, 2024; Wagner *et al.*, 2025), e autoamostradores levaram a análise de metais ao próprio corpo hídrico (Straight *et al.*, 2021; Sparaventi *et al.*, 2022). O traço comum é a capacidade de operar em áreas extensas, remotas ou perigosas com alta resolução espaço-temporal e baixo risco ao operador. A Tabela 1 sintetiza dez aplicações representativas, contra as quais o peixamento por drone se destaca como fronteira ainda por consolidar.

Tabela 1. Aplicações representativas de drones na área ambiental.

Nº	Domínio de aplicação	Plataforma/abordagem	Principal contribuição	Referência
1	Qualidade de água em rios	VANT hiperespectral	Inversão de parâmetros ópticos (turbidez, COD, clorofila-a) com alta resolução espacial	Bai *et al.* (2024)
2	Amostragem de água em cavas de mineração	VANT com amostrador em profundidade	Coleta para determinação de metais (Se) em *pit lakes*, com redução de custo e de risco ao operador	Straight *et al.* (2021)
3	Metais-traço em águas costeiras e polares	VANT com autoamostrador	Quantificação de metais dissolvidos sem contaminação da amostra	Sparaventi *et al.* (2022)
4	Monitoramento multiescala de ecossistemas aquáticos	Revisão de veículos não tripulados	VANTs respondem por cerca de 70% das aplicações; lacuna de integração multiescala	Liu *et al.* (2025)
5	Restauração florestal	VANT com dispensador de sementes	Semeadura aérea com deposição pneumática e compromisso entre carga útil e autonomia	Stamatopoulos, Le e Daver (2024)
6	Qualidade do ar e gases atmosféricos	VANT com sensores químicos	Monitoramento vertical de poluentes e gases de efeito estufa	Marin *et al.* (2023)
7	Levantamento de fauna silvestre	VANT (RGB) e análise de imagens	Adoção por gestores e biólogos para contagem e detecção de indivíduos	Iglay *et al.* (2024)
8	Detecção de fauna arbórea ameaçada	VANT com câmera térmica (TIR)	Registro de mais espécies e indivíduos que o censo terrestre noturno	Wagner *et al.* (2025)
9	Detecção automatizada de fauna	VANT com aprendizado de máquina	Automação da detecção e contagem de animais em imagens aéreas	Corcoran *et al.* (2021)
10	Comportamento animal e biodiversidade	VANT (vídeo e rastreamento)	Orçamentos de atividade, associações sociais e classificação de habitat	Pedrazzi *et al.* (2025)

Fonte: Elaborada pelos autores com base nas referências citadas.

3.1.2 Duas linhagens: sensoriamento sem contato e coleta física

A aplicação de VANTs ao diagnóstico da qualidade da água segue duas linhagens. A primeira, de sensoriamento sem contato, emprega imageamento multiespectral e hiperespectral para inferir parâmetros ópticos (clorofila-a, turbidez, sólidos suspensos e matéria orgânica dissolvida colorida) a partir da reflectância da água, com modelos frequentemente assistidos por aprendizado de máquina (Bai *et al.*, 2024; Deng *et al.*, 2024). Revisões sistemáticas confirmam a superioridade dos VANTs sobre o sensoriamento orbital em pequenos corpos hídricos, mas registram gargalos de calibração, correção atmosférica e transferibilidade dos modelos (Bai *et al.*, 2024; Pillay *et al.*, 2024); os VANTs respondem por cerca de 70% das aplicações de veículos não tripulados a ecossistemas aquáticos (Liu *et al.*, 2025). A segunda linhagem, de coleta física, traz a amostra à margem para análise laboratorial, via indispensável para metais dissolvidos e contaminantes orgânicos, e constitui o foco desta revisão.

3.1.3 Plataformas, cargas úteis e desempenho metrológico

A coleta de água por VANT alcançou validação metrológica. Graham *et al.* (2022) coletaram amostras de 2 L com sucesso integral e sem diferença significativa em relação à amostragem embarcada, com ganhos de rapidez, custo e segurança. Hexacópteros de carga acomodam sensores multiparâmetros e dispositivos de coleta, com transmissão em tempo real a plataformas de IoT (Ryu, 2022). A tendência recente é a amostragem autônoma multiponto, com várias amostras por voo (Wu *et al.*, 2025), e a integração a gêmeos digitais, ainda que a integração plena entre drones e gêmeos digitais permaneça como lacuna reconhecida (Hamzah; Aqlan; Baidya, 2024).

Coexistem duas famílias de soluções. A primeira, de coletores volumétricos, atende à determinação de metais e já foi aplicada em cavas de mineração e à amostragem filtrada para exploração geoquímica (Straight *et al.*, 2021; Kidder *et al.*, 2025); Straight *et al.* (2021) amostraram três *pit lakes* em Nevada, selecionando a profundidade a partir de perfis obtidos pelo próprio drone, e sistemas de autoamostragem quantificaram metais-traço sem contaminação da amostra (Sparaventi *et al.*, 2022). A segunda família, de sorção, acopla microextração em fase sólida de filme fino à cromatografia gasosa com espectrometria de massas (GC-MS) portátil para triagem *in loco* de orgânicos voláteis (Grandy *et al.*, 2020). Plataformas *lab-on-a-drone* avançaram a fronteira: no Brasil, Almeida *et al.* (2023) validaram a determinação voltamétrica de chumbo por drone frente ao ICP-OES, e Santos Silva *et al.* (2026) reportaram turbidimetria a bordo com limite de detecção de 0,12 NTU, convergência consolidada em revisões críticas (Park; Choi, 2020; Silva-Neto *et al.*, 2025). A Tabela 2 sintetiza esses sistemas.

Tabela 2. Síntese de sistemas de amostragem hidroquímica por veículos aéreos não tripulados.

Estudo	Plataforma	Amostrador	Parâmetros/analitos	Ambiente	Validação vs. referência
Graham *et al.* (2022)	Hexacóptero (DJI M600)	Coletor volumétrico (2 L)	Físico-químicos, nutrientes, Chl-a	Lêntico	Sem diferença vs. barco
Straight *et al.* (2021)	DJI M600	Amostrador em profundidade	Metais (Se), cátions e ânions	Lêntico	92% de sucesso
Kidder *et al.* (2025)	VANT de carga	Coleta filtrada (0,45 µm)	Hidrogeoquímica (metais)	Lêntico	Comparável ao convencional
Sparaventi *et al.* (2022)	VANT	Autoamostrador (AWA)	Metais-traço dissolvidos	Lêntico/marinho	Sem contaminação da amostra
Grandy *et al.* (2020)	VANT	Sorção (TF-SPME) + GC-MS	Orgânicos voláteis	Lótico/lêntico	Triagem *in loco*
Almeida *et al.* (2023)	VANT (Wi-Fi)	*Lab-on-a-drone* (voltametria)	Chumbo (Pb)	Lêntico	Sem diferença vs. ICP-OES
Santos Silva *et al.* (2026)	VANT (Wi-Fi)	*Lab-on-a-drone* (turbidímetro)	Turbidez (NTU)	Lêntico/lótico	LD de 0,12 NTU
Ryu (2022)	Hexacóptero (UASWQP)	Sensores *in situ* + coleta	pH, CE, OD, temperatura	Lótico	Monitoramento em tempo real
Lawson *et al.* (2024)	Veículo aéreo-aquático	Sensoriamento acústico	Bioacústica	Lótico/lêntico	Protótipo anfíbio
Bai *et al.* (2024)	VANT hiperespectral	Sensoriamento sem contato	Parâmetros ópticos (rios)	Lótico	Revisão (calibração pendente)

Ryu (2022), Lawson *et al.* (2024) e Bai *et al.* (2024) referem-se a sensoriamento ou plataforma anfíbia, incluídos para contraste. Chl-a: clorofila-a; CE: condutividade elétrica; OD: oxigênio dissolvido; LD: limite de detecção.
Fonte: Elaborada pelos autores com base nas referências citadas.

3.1.4 A lacuna do regime de águas correntes

O principal achado deste eixo é que a maturidade da técnica se restringe a corpos lênticos. A maioria dos estudos foi validada em lagos, reservatórios e cavas (Straight *et al.*, 2021; Graham *et al.*, 2022; Kidder *et al.*, 2025), e revisões sistemáticas apontam a escassa avaliação sob diferentes regimes de fluxo, turbidez e cobertura vegetal (Sibanda *et al.*, 2021; Pillay *et al.*, 2024). As barreiras do regime fluvial são quatro: (i) a correnteza, que induz deriva do coletor e do VANT em voo pairado; (ii) a perda de sinal do sistema global de navegação por satélite (GNSS) sob a mata ciliar, que compromete a repetibilidade do ponto amostral; (iii) a turbidez e a carga de sedimento, que em rios impactados por rejeitos alteram a coleta e a integridade do analito (Mourão *et al.*, 2023); e (iv) a representatividade vertical e transversal, subamostrada pela coleta superficial. Os poucos trabalhos em regime fluvial, com plataformas anfíbias (Lawson *et al.*, 2024) e imageamento hiperespectral (Bai *et al.*, 2024), ainda estão distantes da coleta física validada em correnteza.

3.1.5 Integração analítica e o caso do Rio Doce

O valor operacional máximo emerge quando a amostragem por drone se acopla à cadeia analítica de metais por espectrometria atômica, viabilidade já demonstrada em contextos de mineração

(Park; Choi, 2020; Straight *et al.*, 2021). Na bacia do Rio Doce, a exposição residual ainda se traduz em bioacumulação e dano histopatológico na ictiofauna (Freitas *et al.*, 2025), embora a biodisponibilidade dos metais permaneça em debate (Abessa *et al.*, 2024; Pauly; Yamamoto; Abessa, 2025), e o monitoramento hidroacústico de biomassa oferece a contraparte biológica dessa vigilância (Hobbs; Bigot; Smith, 2020). Um programa de amostragem por VANT capaz de operar em regime lótico converteria esse monitoramento, hoje pontual e caro, em malha espaço-temporal densa ao longo de centenas de quilômetros de canal.

3.2 DA SOLTURA AÉREA TRIPULADA AO PEIXAMENTO POR VANT

3.2.1 Precedente operacional da soltura aérea

A liberação aérea de alevinos possui precedente operacional consolidado, ainda que fora da literatura acadêmica. Agências de fauna dos Estados Unidos soltam alevinos por aeronave em voo baixo sobre lagos de montanha; a chave é o porte diminuto do organismo (2,5 a 7,5 cm), que faz o arrasto limitar a velocidade terminal a valores não letais (Utah Division of Wildlife Resources, [2024?]). Do ponto de vista da engenharia aeroespacial, trata-se de entrega de carga útil viva com restrição de aceleração de impacto, cuja variável crítica é a velocidade de entrada na água, função da altura de liberação e do arrasto do organismo (Yao *et al.*, 2025).

3.2.2 Restrições fisiológicas do alevino

A fisiologia do alevino fornece as condições de contorno do projeto. O estresse de manuseio e transporte manifesta-se em resposta cortisol-dependente, alterações hematológicas e mortalidade tardia (Balasch; Tort, 2019). A densidade de estocagem altera o crescimento e os parâmetros sanguíneos de juvenis, e seu valor ótimo depende do sistema de cultivo (Awal *et al.*, 2025). Em alevinos de tilápia-do-nilo, salinidade $\geq$ 15 ppt e amônia $\geq$ 0,1 mg/L comprometeram o crescimento e elevaram a mortalidade (Metwaly *et al.*, 2025), e, mesmo em crustáceos, a alta densidade reduziu a sobrevivência e elevou marcadores de estresse oxidativo (Gamberoni *et al.*, 2026). Qualquer sistema de peixamento por drone herda essas restrições (temperatura, oxigenação e densidade no transporte) e soma as suas próprias: aceleração no lançamento, tempo fora d'água e vibração de voo.

3.3 PEIXAMENTO POR DRONE: ESTADO DA ARTE, LACUNA E PERSPECTIVA

3.3.1 Ineditismo da tecnologia

Não há, até o presente, estudo revisado por pares que documente e valide a liberação de alevinos por VANT. As revisões de VANTs em pesca e aquicultura tratam exclusivamente de monitoramento,

avaliação de estoques e conservação (Ubina; Cheng, 2022; Abuthagir Iburahim *et al.*, 2025; Ganie *et al.*, 2025), e a totalidade das aplicações de VANT a ecossistemas aquáticos é de sensoriamento, e não de intervenção (Liu *et al.*, 2025). Trata-se de lacuna de fronteira, e não de tecnologia refutada.

3.3.2 Envelope de engenharia

A viabilização define-se por três dimensões acopladas. A aeromecânica compreende a classe de VANT (multirrotor de carga, para voo pairado, ou asa fixa com decolagem vertical, para alcance de bacia), a carga útil, a autonomia e o mecanismo de liberação. O análogo mais informativo é a semeadura aérea para restauração ecológica: Stamatopoulos, Le e Daver (2024) revisam mecanismos pneumáticos de deposição, cargas úteis de 8 a 26 kg e o compromisso entre carga e autonomia, limitação também apontada em revisões de tecnologia de carga útil (Yao *et al.*, 2025). Assim como a sobrevivência da semente é o desafio central da semeadura, a do alevino subordina altura, velocidade e mecanismo de liberação. As dimensões fisiológica (Seção 3.2.2) e regulatória (Seção 3.3.4) completam o envelope.

3.3.3 Critério de sucesso e recrutamento

O critério de sucesso é o recrutamento efetivo, e não a contagem de indivíduos soltos. A telemetria acústica revela pico de mortalidade imediatamente após a soltura, seguido de aclimatação (Koeberle *et al.*, 2023); a sobrevivência cresce com o comprimento na soltura, a ponto de se recomendar estocar menos indivíduos, porém maiores (Thompson *et al.*, 2020; Fonken *et al.*, 2023); e modelos espaciais que integram risco de predação, alimento e habitat já restringem os melhores locais de soltura a pouco mais de 10% da área de um reservatório (Farrier *et al.*, 2024), precisão de deposição que um vetor aéreo georreferenciado estaria apto a executar. O drone deve, portanto, preservar a integridade fisiológica do alevino e depositá-lo no micro-habitat adequado, e não apenas cobrir área.

3.3.4 Entrave regulatório à difusão no Brasil

No Brasil, o gargalo à difusão do peixamento por drone recai sobre o ato biológico de introdução de organismos, e não sobre o vetor aéreo. A legislação define a bacia hidrográfica como Unidade Geográfica Referencial (UGR), veda espécies exóticas ou alóctones e, nos repovoamentos de corpos d'água públicos, admite apenas espécies autóctones produzidas na própria bacia e isentas de patógenos (IBAMA, 1998). A introdução de espécimes sem parecer técnico e licença ambiental configura infração administrativa (Brasil, 2008a, 2008b), e o drone acrescenta a regulação de aeronaves remotamente pilotadas (ANAC, 2017), gerando dupla camada regulatória. O entrave é,

portanto, institucional, e sua superação depende menos de *hardware* do que de um protocolo de conformidade desenhado *a priori*. A Tabela 3 organiza esses instrumentos.

Tabela 3. Arcabouço regulatório brasileiro aplicável ao peixamento por drone.

Norma/instrumento	Órgão	Escopo/exigência	Implicação para o peixamento por drone
Portaria nº 145-N/1998 (IBAMA, 1998)	IBAMA	Regula a introdução, a reintrodução e a transferência de organismos aquáticos; define a Unidade Geográfica Referencial (UGR) e veda espécies exóticas ou alóctones; nos repovoamentos de corpos d'água públicos, só admite espécies autóctones da bacia, isentas de patógenos	Restringe as espécies liberáveis às nativas da UGR e impõe controle sanitário e rastreabilidade das matrizes, independentemente do vetor
Decretos nº 6.514/2008 e nº 6.686/2008 (Brasil, 2008a, 2008b)	Presidência da República	Tipificam como infração administrativa a introdução ou reintrodução de espécimes sem parecer técnico favorável e licença ambiental	Vinculam a soltura à licença ambiental prévia, sob pena de sanção
RBAC-E nº 94 (ANAC, 2017)	ANAC	Requisitos gerais para a operação de aeronaves remotamente pilotadas (RPA)	Adiciona uma camada aeronáutica à de fauna, gerando dupla conformidade

Fonte: Elaborada pelos autores com base em IBAMA (1998), Brasil (2008a, 2008b) e ANAC (2017).

3.3.5 Trajetória internacional e convergência regulatória

A assimetria entre o Brasil e o exterior está na institucionalização da soltura aérea. O programa de Utah, em uso desde pelo menos 1956, libera mais de dez mil alevinos por voo e abastece de 40 a 60 lagos por dia; a própria agência justifica não empregar drones pela falta de plataformas capazes de transportar a massa exigida (Utah Division of Wildlife Resources, 2024). Da migração do avião para o helicóptero emerge o dado decisivo: com o helicóptero pairando a cerca de 1,5 m da água, a sobrevivência aproxima-se de 100%, contra cerca de 85% na soltura por avião a 30 m e 160 km/h (Minnesota Department of Natural Resources, 2020). A sobrevivência varia, assim, inversamente com a altura e a velocidade de liberação, e o regime de máxima sobrevivência (voo baixo, pairado e deposição precisa) é o envelope natural de um multirrotor, que o ocupa a uma fração do custo e sem risco à tripulação (Tabela 4).

Tabela 4. Sobrevivência pós-soltura de alevinos em função da cinemática de liberação.

Método de liberação	Altura	Velocidade	Sobrevivência	Referência
Avião (asa fixa)	30 m	≈ 160 km/h	85%	Minnesota Department of Natural Resources (2020)
Helicóptero (voo pairado)	1,5 m	Nula (pairado)	100%	Minnesota Department of Natural Resources (2020)
VANT multirrotor (proposto)	Baixa (pairado)	Nula/baixa	A determinar (fronteira)	Este trabalho

Nota: a sobrevivência pós-soltura cresce com o comprimento dos alevinos e distingue fases de mortalidade imediata e de aclimatação (Thompson *et al.*, 2020; Fonken *et al.*, 2023; Koeberle *et al.*, 2023).
Fonte: Elaborada pelos autores com base em Minnesota Department of Natural Resources (2020).

Há ainda uma convergência regulatória a explorar. As salvaguardas dos programas estrangeiros, sobretudo o uso de peixes estéreis e a restrição de espécies não nativas em corpos sensíveis (Utah Division of Wildlife Resources, [2024?]), são funcionalmente equivalentes às exigências da legislação brasileira, e aeronaves em voo pairado, sem pousar na água, mitigam o risco de dispersão de espécies invasoras (Minnesota Department of Natural Resources, 2020). Um protocolo brasileiro de peixamento por VANT acoplado desde a origem à conformidade — espécies nativas da UGR, matrizes rastreadas e controle sanitário — pode capturar esses ganhos sem colidir com o arcabouço nacional.

3.3.6 Desenho experimental proposto

Propõe-se um desenho comparativo entre VANT e soltura convencional embarcada, com desfechos de sobrevivência de curto prazo, dispersão pós-liberação e integridade fisiológica (cortisol plasmático, glicemia e índices hematológicos), estratificado por altura e velocidade de deposição, a fim de mapear empiricamente a curva sobrevivência-cinemática (Fonken *et al.*, 2023; Koeberle *et al.*, 2023), com aplicação em bacias-piloto como a do Rio Doce.

3.4 DESAFIOS TRANSVERSAIS E AGENDA DE PESQUISA

A leitura conjunta dos dois eixos revela seis desafios compartilhados: (i) a robustez em regime fluvial, hoje o maior hiato empírico; (ii) a autonomia de voo, cuja superação passa por plataformas de asa fixa com decolagem vertical (Yao *et al.*, 2025); (iii) a simetria entre integridade da amostra e integridade do organismo, ambas dependentes do controle de contato, tempo e cinemática; (iv) a análise de custo-benefício frente ao método convencional, ainda ausente; (v) a antecipação regulatória, precondição de escalonamento no Brasil; e (vi) a visão de cadeia, na qual o mesmo ativo aéreo diagnostica a qualidade da água e, atendidos os limiares, executa o repovoamento, fechando o ciclo entre observação e intervenção.

4 CONCLUSÃO

Os veículos aéreos não tripulados deslocam a recuperação de bacias hidrográficas de um paradigma de observação para um de intervenção. A amostragem hidroquímica por drone é tecnologia madura e validada, mas ainda precisa ser adaptada ao regime lótico. O peixamento por drone é a próxima fronteira: sua ausência na literatura não reflete inviabilidade, mas um envelope de engenharia ainda não fechado e um arcabouço regulatório que incide sobre a introdução de organismos, e não sobre o vetor. A experiência tripulada, ao mostrar que a sobrevivência cresce com deposições mais baixas e lentas, indica que o multirrotor ocupa naturalmente o regime de máxima sobrevivência.

Recomenda-se tratar amostragem, análise e repovoamento como elos de uma única cadeia operacional, testada em bacias-piloto como a do Rio Doce e desenhada desde a origem para dialogar com a legislação ambiental e aeronáutica brasileira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto 'REPOVOAMENTO DE PEIXES NA BACIA DO RIO DOCE POR ROBÓTICA AÉREA' (Processo APQ-05441-23; Edital 016/2023 - Economia Verde) e pela concessão de Bolsa de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial.

REFERÊNCIAS

ABESSA, D. *et al.* Has the Rio Doce "time bomb" been defused? Using a weight-of-evidence approach to determine sediment quality. Integrated Environmental Assessment and Management, v. 20, n. 1, p. 148-158, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/ieam.4785.

ABUTHAGIR IBURAHIM, S. *et al.* Drones or unmanned aerial vehicles in fisheries and aquaculture. In: GANIE, P. A.; POSTI, R.; PANDEY, P. K. (ed.). Information technology in fisheries and aquaculture. Singapura: Springer, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-8553-7_16.

ALMEIDA, J. P. B. de *et al.* Lab-on-a-drone: remote voltammetric analysis of lead in water with real-time data transmission. Analytical Methods, v. 15, n. 37, p. 4827-4833, 2023. DOI: https://doi.org/10.1039/d3ay01088k.

ANAC. RBAC-E nº 94: requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Brasília, DF: Agência Nacional de Aviação Civil, 2017.

AWAL, M. R. *et al.* Effects of stocking densities on growth and production performance of Mystus cavasius in a bottom-clean aquaculture system. Aquaculture, Fish and Fisheries, v. 5, n. 2, art. e70063, 2025. DOI: https://doi.org/10.1002/aff2.70063.

BAI, X. *et al.* Research progress of inland river water quality monitoring technology based on unmanned aerial vehicle hyperspectral imaging technology. Environmental Research, v. 257, art. 119254, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119254.

BALASCH, J. C.; TORT, L. Netting the stress responses in fish. Frontiers in Endocrinology, v. 10, art. 62, 2019. DOI: https://doi.org/10.3389/fendo.2019.00062.

BRASIL. Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2008a.

BRASIL. Decreto nº 6.686, de 10 de dezembro de 2008. Altera e acresce dispositivos ao Decreto nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Brasília, DF: Presidência da República, 2008b.

CORCORAN, E. *et al.* Automated detection of wildlife using drones: synthesis, opportunities and constraints. Methods in Ecology and Evolution, v. 12, p. 1103-1114, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/2041-210X.13581.

DENG, Y. *et al.* Review of recent advances in remote sensing and machine learning methods for lake water quality management. Remote Sensing, v. 16, n. 22, art. 4196, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16224196.

FARRIER, S. M. *et al.* Application of a conceptual stocking model for two recreationally important species. Aquaculture, Fish and Fisheries, v. 4, n. 5, art. e70006, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/aff2.70006.

FONKEN, D. R. *et al.* Benefits of stocking fewer but larger individuals with implications for native fish recovery. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 80, n. 3, p. 439-450, 2023. DOI: https://doi.org/10.1139/cjfas-2022-0071.

FREITAS, R. M. P. *et al.* Metal concentrations, oxidative status and histopathological evaluation of fish species from Doce River, Brazil, after the Fundão dam collapse. Aquatic Toxicology, v. 279, art. 107204, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107204.

GAMBERONI, P. *et al.* Impact of different stocking densities on growth performance, welfare and physiology of Litopenaeus vannamei in RAS. Scientific Reports, v. 16, n. 1, art. 9087, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-026-42332-2.

GANIE, P. A. *et al.* Unmanned aerial vehicles in fisheries and aquaculture: a comprehensive overview. Environmental Monitoring and Assessment, v. 197, art. 503, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-025-13920-y.

GRAHAM, C. T. *et al.* Drones can reliably, accurately and with high levels of precision, collect large volume water samples and physio-chemical data from lakes. Science of the Total Environment, v. 824, art. 153875, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153875.

GRANDY, J. J. *et al.* Development of a drone-based thin-film solid-phase microextraction water sampler to facilitate on-site screening of environmental pollutants. Analytical Chemistry, v. 92, n. 19, p. 12917-12924, 2020. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01490.

HAMZAH, A.; AQLAN, F.; BAIDYA, S. Drone-based digital twins for water quality monitoring: a systematic review. Digital Twins and Applications, v. 1, n. 2, p. 131-160, 2024. DOI: https://doi.org/10.1049/dgt2.12021.

HOBBS, D.; BIGOT, M.; SMITH, R. E. W. Rio Doce acoustic surveys of fish biomass and aquatic habitat. Integrated Environmental Assessment and Management, v. 16, n. 5, p. 615-621, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/ieam.4285.

IBAMA. Portaria nº 145-N, de 29 de outubro de 1998. Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998.

IGLAY, R. B. *et al.* Wildlife monitoring with drones: a survey of end users. Wildlife Society Bulletin, v. 48, art. e1533, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/wsb.1533.

KIDDER, J. A. *et al.* Using UAVs to collect filtered water samples for mineral exploration: will it take off? Journal of Geochemical Exploration, v. 272, art. 107695, 2025.

KOEBERLE, A. L. *et al.* Whole-lake acoustic telemetry to evaluate survival of stocked juvenile fish. Scientific Reports, v. 13, art. 18956, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-46330-6.

LAWSON, J. *et al.* Use of an unmanned aerial-aquatic vehicle for acoustic sensing in freshwater ecosystems. Remote Sensing in Ecology and Conservation, v. 10, n. 3, p. 343-359, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/rse2.373.

LIU, X. *et al.* Applications of unmanned vehicle systems for multi-spatial scale monitoring and management of aquatic ecosystems: a review. Ecological Informatics, v. 85, art. 102926, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102926.

MARIN, D. B. *et al.* State of the art and future perspectives of atmospheric chemical sensing using unmanned aerial vehicles: a bibliometric analysis. Sensors, v. 23, n. 20, art. 8384, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/s23208384.

METWALY, S. *et al.* Multifaceted stress response in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) fingerlings: integrative analysis of salinity, ammonia, and stocking density effects on growth, physiology, and gene expression. Fish Physiology and Biochemistry, v. 51, n. 1, art. 48, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10695-025-01462-6.

MINNESOTA DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. Trout stocking via helicopter means more fish for anglers. Boreal Community Media, Grand Marais, 2 nov. 2020. Disponível em: https://www.boreal.org/2020/11/02/334141/trout-stocking-via-helicopter-means-more-fish-for-anglers. Acesso em: 10 set. 2026.

MOURÃO, A. O. *et al.* Assessment of health risk and presence of metals in water and fish samples from Doce River, Brazil, after Fundão dam collapse. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, v. 84, n. 3, p. 377-388, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00244-023-00991-6.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, art. n71, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

PARK, S.; CHOI, Y. Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: a review. Minerals, v. 10, n. 8, art. 663, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/min10080663.

PAULY, G. F. E.; YAMAMOTO, F. Y.; ABESSA, D. M. S. Toxicity assessment of waters from Rio Doce after the Fundão dam rupture to zebrafish embryos. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, v. 114, n. 3, art. 38, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00128-025-04016-x.

PEDRAZZI, L. *et al.* Advancing animal behaviour research using drone technology. Animal Behaviour, v. 222, art. 123147, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2025.123147.

PILLAY, S. J. *et al.* Assessing drone-based remote sensing for monitoring water temperature, suspended solids and CDOM in inland waters: a global systematic review of challenges and opportunities. Drones, v. 8, n. 12, art. 733, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/drones8120733.

RYU, J. H. UAS-based real-time water quality monitoring, sampling, and visualization platform (UASWQP). HardwareX, v. 11, art. e00277, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00277.

SANTOS SILVA, R. *et al.* A lab-on-a-drone for turbidimetric and nephelometric analysis of environmental water samples with real-time data transmission. Analytical Methods, v. 18, n. 8, p. 1709-1719, 2026. DOI: https://doi.org/10.1039/D5AY01927C.

SIBANDA, M. *et al.* Application of drone technologies in surface water resources monitoring and assessment: a systematic review of progress, challenges, and opportunities in the global south. Drones, v. 5, n. 3, art. 84, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/drones5030084.

SILVA-NETO, H. A. *et al.* Recent developments on aerial lab-on-a-drone platforms for remote environmental monitoring: a review. Analytica Chimica Acta, v. 1337, art. 343544, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343544.

SPARAVENTI, E. *et al.* A novel automatic water autosampler operated from UAVs for determining dissolved trace elements. Frontiers in Marine Science, v. 9, art. 879953, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2022.879953.

STAMATOPOULOS, I.; LE, T. C.; DAVER, F. UAV-assisted seeding and monitoring of reforestation sites: a review. Australian Forestry, v. 87, n. 2, p. 90-98, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/00049158.2024.2343516.

STRAIGHT, B. J. *et al.* Using an unmanned aerial vehicle water sampler to gather data in a pit-lake mining environment to assess closure and monitoring. Environmental Monitoring and Assessment, v. 193, n. 9, art. 572, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-021-09316-3.

THOMPSON, B. C. *et al.* Survival of advanced fingerlings of Florida largemouth bass stocked in small Florida lakes. North American Journal of Fisheries Management, v. 40, n. 6, p. 1532-1544, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/nafm.10522.

UBINA, N. A.; CHENG, S.-C. A review of unmanned system technologies with its application to aquaculture farm monitoring and management. Drones, v. 6, n. 1, art. 12, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/drones6010012.

UTAH DIVISION OF WILDLIFE RESOURCES. Aerial fish stocking in Utah: answers to frequently asked questions. Salt Lake City: UDWR, [2024?]. Disponível em: https://wildlife.utah.gov/aerial-fish-stocking.html. Acesso em: 10 set. 2026.

WAGNER, B. *et al.* Thermal drone surveys to detect arboreal fauna: improving population estimates and threatened species monitoring. Ecological Applications, v. 35, n. 6, art. e70091, 2025.

WU, J. *et al.* Development of a UAV-assisted autonomous water sampling device. Discover Applied Sciences, v. 7, n. 3, art. 182, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-025-06544-x.

YAO, W. *et al.* Unmanned aerial vehicle payload technology applications in agriculture and other low-altitude scenarios: a review. Frontiers in Plant Science, v. 16, art. 1721484, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1721484.