

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AValiação da Recuperação Fluvial por Meio do Mapeamento de Habitats Físicos

*Marcus V. Estigoni¹ ; Thaís N. Rezende¹; Isabela B. Freire¹; Rafael B. Rossi¹; Melina M. Alencar²
& Fabio Z. Pereira²*

Abstract: This study presents a quantitative assessment of the recovery of rivers affected by the Fundão dam failure regarding their physical characteristics, through the analysis of the presence and diversity of physical habitats. The study area covers approximately 110 km in length, including the Gualaxo do Norte River, Carmo River, and Doce River upstream of the Candonga reservoir. Systematic habitat mapping was performed using high-resolution aerial imagery (2 cm pixel) for the 2021 scenario, which was compared with historical images from 2014 for the Carmo and Doce rivers, and with river reaches in the region with similar characteristics for the Gualaxo do Norte River. A total of 36 habitat classes were mapped, considering the entire bankfull channel. The results indicate that in 2021, the Doce River exhibited characteristics with the presence of practically all habitat types similar to the reference condition. The Carmo River showed characteristics with the presence of fast-water habitats superior to the reference condition. The Gualaxo do Norte River presented greater diversity of submerged habitats than the reference, with a statistical power greater than 99% in the comparative analysis. The main difference observed was in the presence of vegetated marginal habitats, indicating the importance of continued revegetation activities. This study represents the first systematic mapping of physical habitats carried out in Brazil, contributing significantly to the advancement of fluvial science in the country

Resumo: Este estudo apresenta uma avaliação quantitativa da recuperação de características físicas de rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão através da análise da presença e diversidade de habitats físicos. A área de estudo compreende aproximadamente 110 km de extensão, abrangendo o rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga. O mapeamento sistemático de habitats foi realizado utilizando imagens aéreas de alta resolução (pixel de 2 cm) para o cenário de 2021, sendo comparado com imagens históricas de 2014 para o rio do Carmo e rio Doce, e com trechos de rios da região com características similares para o rio Gualaxo do Norte. Foram mapeadas 36 classes de habitats, considerando todo o canal de margens plenas. Os resultados indicam que o rio Doce apresentava em 2021 características de presença de praticamente todos os tipos de habitats similares à condição de referência. O rio do Carmo apresentava características de presença de habitats de águas rápidas superiores à condição de referência. O rio Gualaxo do Norte apresentava maior diversidade de habitats submersos que a referência, com poder estatístico superior a 99% na análise comparativa. A principal diferença observada foi na presença de habitats marginais vegetados, indicando a importância da continuidade das atividades de revegetação. Este estudo representa o primeiro trabalho de mapeamento sistemático de habitats físicos realizado no Brasil, contribuindo significativamente para o avanço da ciência fluvial no país.

Palavras-Chave – Habitats físicos; geomorfologia fluvial; imageamento aéreo.

1) NHC Brasil Consultores: Av. Dr. Cardoso de Melo 1450 – 2º. Andar – conj. 201. Vila Olímpia, São Paulo – SP - Brasil. CEP: 04548-005 | e-mail: mestigoni@nhcwater.com; trezende@nhcwater.com; ifreire@nhcwater.com; rossi@nhcwater.com.

2) Reparação bacia do rio Doce: Av. Getúlio Vargas, 671 - 4º andar. Funcionários - Belo Horizonte - 30112-021 | <https://www.reparacaobaciariodoce.com/>

INTRODUÇÃO

A onda oriunda do rompimento da barragem de Fundão gerou vazão superior a capacidade do leito menor de trechos dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce no trecho a montante da UHE Risoleta Neves (Candonga). Isto ocasionou erosão do leito e margens, seguida de deposição de material transportado pela onda de detritos no canal e margens dos cursos d'água (mistura de rejeitos e sedimentos naturais), alterando o padrão da morfologia fluvial. Logo após o rompimento a morfologia destes locais ficou caracterizada pela predominância de leito plano e uniforme (*plane-bed*) – com quase nenhuma variação hidráulica e de estruturas de habitats físicos, estando completamente coberto por sedimentos predominantemente finos (silte ou menores). Nota-se que o reservatório de Candonga foi capaz de atenuar significativamente a vazão, resultando em pouca ou completa ausência de extravasamento do escoamento na planície de inundação, acarretando evidente mudança na magnitude dos impactos geomorfológicos.

A recuperação morfológica, em termos físicos, é um componente-chave na recuperação da qualidade da água e da ecologia de um rio, pois as características do leito e das margens determinam a entrada de sedimentos no fluxo de água, bem como a estrutura física do rio, criando espaço e condições hidráulicas (habitats físicos) para desenvolvimento de organismos. Diferente de parâmetros de qualidade de água que são efêmeros e altamente influenciados pela variação de vazão, as características físicas de um rio correspondem a uma espécie de registro histórico, sendo definidas de maneira cumulativa pelos processos físicos de transporte de sedimentos. Essa característica denota robustez quanto ao uso do parâmetro de presença de habitats físicos para a avaliação de alterações em um rio e sua evolução no tempo, pois situações efêmeras e sazonais têm menor influência nos resultados de medições de campo.

A avaliação da presença de habitats físicos é uma métrica comumente utilizada em âmbito internacional em estudos de recuperação de rios, como em estudos do Serviço Geológico do Governo federal dos Estados Unidos – USGS (Curtis e Guerrero, 2015; Labbe et. al, 2005; Coffman et. al, 2011), da iniciativa da União Europeia REFORM (Rinaldi et. al, 2015), do Departamento de Ecologia do estado de Washington, nos Estados Unidos (Janisch, J, 2013), dentre outros. Um trabalho inicial de avaliação de habitats físicos foi realizado no trecho de montante dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, focado nos habitats do leito menor e em uma macro escala (Estigoni et. al, 2023).

O presente trabalho realizou a avaliação da presença de habitats físicos no trecho de montante dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão para o canal de margens plenas (*bankful channel*) incluindo a porção seca do canal (i.e., barras de sedimentos, ilhas, entre outros) em um nível de detalhamento de unidades e sub-unidades de habitats (adaptado da classificação proposta por Rinaldi et. al, 2015), além de uma avaliação com informações do contexto extracalha, incluindo informações de caracterização geomorfológica e das planícies de inundação.

OBJETIVO

O objetivo deste estudo é avaliar quantitativamente a recuperação das características físicas de rios afetados por um evento de grande magnitude através da análise da presença e diversidade de habitats físicos, considerando todo o canal de margens plenas, utilizando como estudo de caso o trecho de montante dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão.

METODOLOGIA

Habitats físicos podem ser definidos como uma composição de áreas que possuem características físicas morfológicas (material predominante na camada ativa, superficial, e forma do leito) e características hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento) distintas (Montgomery

& Buffington, 1997, 1998; Bisson et al., 2017). A identificação de habitats físicos e seu mapeamento são realizados, via de regra, com base em avaliação visual, sendo essa realizada em campo (i.e., USFS, 2012), ou por meio de imagens aéreas e ferramentas SIG, tendo esse segundo se tornando cada vez mais comum com o avanço da tecnologia de Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT (popularmente conhecido como drone) (Legleiter, 2003; Marcus, 2002; Marcus et al., 2003; Gilvear et al., 2004; Woodget et al., 2017; Rinaldi et al., 2015; Janisch, 2013).

Classificação de habitats

O sistema de classificação geomorfológica do canal fluvial ativo utilizado neste estudo foi adaptado de Rinaldi et al. (2015), trabalho elaborado no âmbito do projeto REFORM da União Europeia, acrônimo de Recuperação de Rios para Gerenciamento Eficaz de Bacias Hidrográficas (do termo inglês REstoring rivers FOR effective catchment Management). Destaca-se que é uma classificação similar às classes propostas de outros trabalhos como o de Wheaton et al. (2015), para mapeamento tipo “Tier 3”, as quais são mais difundidas na América do Norte e utilizadas em trabalhos do USGS (Curtis e Guerrero, 2015; Coffman et al., 2011). A classificação utilizada segue uma hierarquia baseada nas seguintes categorias de análise:

- ✓ Macrounidades geomorfológicas: categorizam as unidades em três grupos: (1) unidades submersas ou do canal molhado, localizadas na porção submersa; (2) unidades emersas, expostas para a condição de fluxo de base; e (3) unidades formadas por vegetação no canal ativo. Apesar de não serem exatamente habitats físicos ou geoformas, as feições artificiais localizadas dentro dos limites do canal ativo também são consideradas, por serem elementos potencialmente modificadores dos processos fluviais.
- ✓ Tipos de canal fluvial: determinam a localização das unidades em relação ao canal ativo: (1) canal principal, que transporta maior volume de água; e (2) canal secundário, com fluxo significativamente menor.
- ✓ Unidades geomorfológicas: áreas que contêm geoformas resultantes de processos erosivos e/ou deposicionais restritas ao canal ativo do rio.
- ✓ Subunidades geomorfológicas: classificação adicional realizada para poços/remansos e ilhas.

Cenários avaliados

Foram analisados os cenários de referência e o cenário de 2021, os quais são descritos a seguir:

- ✓ Cenário de referência: condição representativa da situação de presença de habitats nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce à montante;
 - Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09): baseado em informações levantadas de rios da região com características similares ao Gualaxo do Norte durante a estação seca de 2021 e seleção de imagens anteriores ao rompimento, ano de 2014, para o trecho T09;
 - Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11): baseado em informações anteriores ao rompimento, ano de 2014;
- ✓ Cenário 2021: situação da presença de habitats durante a estação seca de 2021.

A seleção dos trechos de referência foi realizada utilizando critérios de semelhança quanto a geomorfologia e a características de vazão, tendo sido avaliados parâmetros como área de drenagem, declividade, pluviometria, ocupação e uso do solo da área de drenagem, pedologia, características geomorfológicas de confinamento. A quantidade foi baseada em análise estatística para macrounidades avaliadas em Estigoni et al. (2023), tendo sido avaliados um total de 56 trechos de aproximadamente 1 km cada. Esta abordagem é bem documentada na literatura científica como *space-for-time substitution* (substituição do tempo pelo espaço, em tradução livre), sendo empregada em casos que não se têm informações históricas (HUANG et al., 2019; Obanawa et al., 2009;

Mantzouki et. al. 2018). A análise comparativa foi feita por análises de poder estatístico agrupando habitats de águas rápidas e habitats de águas rápidas mais remansos.

Tabela 1 – Classificação das unidades geomorfológicas adotada no trabalho atual de complementação do mapeamento sistemático do canal fluvial ativo. Adaptado e traduzido de Rinaldi et al. (2015).

MACROUNIDADE GEOMORF.	UNIDADE GEOMORFOLÓGICA	SUBUNIDADE GEOMORFOLÓGICA
Unidades Submersas (S) – <i>Submerged</i>	Cascatas (CC) – <i>Cascade</i>	-
	Rápido (CR) – <i>Rapid</i>	-
	Degrau (CT) – <i>Step</i>	-
	Corredeira (CF) – <i>Riffle</i>	-
	Corrida (CG) – <i>Glide</i>	-
	Poços/remansos (CP) – <i>Pool</i>	Poços/remansos forçados (<i>Forced</i>)
		Poços/remansos de erosão (<i>scour</i>)
		Poços/remansos de queda d'água (<i>plunge</i>)
		Poços/remansos represados (<i>dammed</i>)
		Poços/remansos em meandros (<i>meander</i>)
		Braço (<i>one-way connected branch</i>)
Unidades Emersas (E) – <i>Emergent</i>	Barra lateral (EA) – <i>Bank-attached bar</i>	-
	Barra central (EC) – <i>Mid-channel bar</i>	-
	Barra lateral elevada (EAh) – <i>Bank attached high-bar</i>	-
	Barra central elevada (ECh) – <i>Mid-channel high-bar</i>	-
	Berma lateral de matacão (EB) – <i>Bank-attached boulder berm</i>	-
	Berma central de matacão (EM) – <i>Mid-channel boulder berm</i>	-
	Canal seco (ED) – <i>Dry channel</i>	-
	Afloramento rochoso (EO) – <i>Bedrock outcrop</i>	-
	Margem sem vegetação (EK) – <i>Unvegetated bank</i>	-
Vegetação Intracalha (V) – <i>In-channel vegetation</i>	Ilha (VI) – <i>Island</i>	Ilha com pastagem (<i>grassy island</i>)
		Ilha com vegetação jovem (<i>young woody island.</i>)
		Ilha com Floresta (<i>established/Adult woody island e Mature woody island</i>)
		Ilha com vegetação complexa (<i>Complex woody island</i>)
	Emaranhado de troncos (VJ) – <i>Large wood jam</i>	-
	Vegetação aquática (VA) – <i>Aquatic vegetation</i>	-
	Margem com vegetação (VK) – <i>Vegetated bank</i>	-
Feições Artificiais (A) – <i>Artificial</i>	Barragem (AA) – <i>Dam</i>	-
	Travessia por Galeria (AF) – <i>Culvert</i>	-
	Passagem molhada (AG) – <i>Ford</i>	-
	Ponte (AH) – <i>Bridge</i>	-
	Canal artificial (AI) – <i>Bed revetment</i>	-
	Obras de controle de erosão (AL) – <i>Bank protection</i>	-
	Dique lateral (AM) – <i>Artificial levee or embankment</i>	-
	Área de mineração (NA) – <i>Mining sites / Sed. removal</i>	-

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presença percentual das macrounidades (áreas emersas, submersas e vegetações intracalha) apresentou padrões distintos entre os rios. A Figura 1 apresenta os resultados quanto à presença de macrounidades para cada rio analisado nos cenários de referência e de 2021, no quadro (a) por rio, e nos quadros (b) e (c) ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, discretizadas a cada quilômetro. É importante notar que não é possível fazer uma comparação direta no rio Gualaxo do Norte (do quilômetro 118 até o quilômetro 42,5), devido à ausência de dados históricos satisfatórios para análise.

O rio Gualaxo do Norte apresentou proporção de unidades emersas de 29,8%, superior aos demais rios estudados, com tendência de redução desta presença de montante para jusante. Esta tendência também foi observada em função do porte do rio: mostrando aparente tendência de redução da presença de áreas emersas, ao aumento do porte do rio. A principal diferença observada em relação à condição de referência foi na presença de habitats marginais, com menor ocorrência de margens vegetadas (5,1% comparado com 14,9% da referência).

No rio do Carmo a presença de habitats emersos reduziu de 22,1% para 17,8%, e os habitats vegetados de 7,7% para 4,9%. Observou-se um aumento na ocorrência de feições artificiais (de 0,1% para 0,8%) – causado pela execução de obras de proteção de margens realizadas para controle de erosão dos depósitos nas planícies de inundação.

O trecho do rio Doce apresentava em 2021 características similares à condição de referência para praticamente todos os tipos de habitats. Ressalta-se que devido a atenuação ao longo de sua rota, e ao significativo maior porte desse rio (aprox.. 9 mil km²) comparado ao Gualaxo do Norte (aprox.. 670 km²) e rio do Carmo (aprox.. 2 mil km²), a onda do rompimento foi relativamente menor, e causou menores perturbações, especialmente nas margens.

Comparando os três rios em 2021, observam-se diferenças significativas nas distribuições das macrounidades. O rio Gualaxo do Norte apresenta uma grande quantidade de unidades emersas, especialmente nos primeiros 40 km do trecho analisado, onde estas unidades chegam a ocupar mais de 50% da área em alguns segmentos. Esta observação corrobora com os dados da Figura 1. Nota-se também uma presença limitada de vegetação intracalha ao longo do Gualaxo do Norte, com alguns trechos apresentando ausência total desta unidade.

A presença de feições artificiais no rio Gualaxo do Norte é encontrada por toda sua extensão, principalmente na forma de enrocamentos para proteção contra erosão. Diferentemente do rio Doce e Carmo, onde as feições artificiais se concentram nos 10 primeiros quilômetros, neste trecho essas estruturas não existiam no cenário de referência. No rio do Carmo nota-se uma ligeira redução na presença de unidades vegetadas.

Em 2021, o rio Gualaxo do Norte já apresentava uma distribuição equilibrada de habitats submersos (Figura 2), ocupando aproximadamente 62,8% da área do canal, dos quais cerca de 20,3% correspondiam a habitats de águas rápidas (corredeira, cascata, rápido e degrau) e 42,5% de águas lentas (corrida e poço/remanso). A análise estatística indicou maior diversidade de habitats submersos que a referência, com poder estatístico de 99,79% para habitats de águas rápidas e 99,56% para % habitats de águas rápidas mais remansos.

Os controles hidráulicos rochosos são uma constante ao longo de todo o trecho estudado, porém ao longo do Gualaxo do Norte tipicamente são mais extensos, formando habitats do tipo cascata e do tipo rápidos. No rio do Carmo e rio Doce a maioria dos controles rochosos são relativamente curtos formando habitats do tipo degrau, ou, quando mais extensos, apresentam uma declividade tipicamente menor que no Gualaxo do Norte, formando habitats do tipo rápidos ao invés de cascatas.

Em se falando da quantidade de habitats por quilômetro linear do rio, nota-se uma tendência de diminuição do número de habitats submersos por quilômetro quando se desloca de montante para jusante, isso se deve ao fato que o tamanho da unidade de habitat tipicamente é uma função da largura típica do rio, de modo que, em geral, quanto mais largo um rio maior o tamanho (comprimento) de uma unidade de habitats, e menor a quantidade de habitats por quilômetro.

Os fatores geomorfológicos e de uso e ocupação da planície de inundação avaliados influenciam a proporção da presença de habitats, tanto no nível de macrounidade quanto de unidade. As análises indicam que tanto o tipo de segmento fluvial geomorfológico quanto a classe de Rosgen aparentam ser os fatores com maior influência dentre os avaliados, seguidos da sinuosidade, entrincheiramento, e por último da condição das margens.

Em trabalho anterior (Estigoni et. al, 2023) o rio Gualaxo do Norte foi avaliado utilizando uma classificação simplificada somente dos habitats submersos (cascatas, corredeiras, remansos e corridas) para os anos de 2019 e 2021, além da condição de referência. Nele é evidenciado o avanço das recuperação da característica e diversidade dos habitats, com uma presença de corridas muito mais proeminente e superior a condição de referência no ano de 2019, sendo também explicado que imediatamente após o rompimento, a o predomínio de habitats tipo corrida era ainda maior. Ainda que o presente trabalho não tenha avaliado o ano de 2019, acredita-se que o mesmo padrão de avanço da recuperação para nível de unidades e subunidades de habitats tenha ocorrido.

Figura 1 – Visão geral dos resultados para macrounidades. a) comparativo dos valores médios da referência e do ano de 2021 por rio; e b) resultado das macrounidades a cada quilômetros ao longo do Carmo e Doce e c) macrounidades ao longo dos rios Gualaxo do Norte (apenas mapeado em 2021), Carmo e Doce, discretizadas a cada quilômetro.

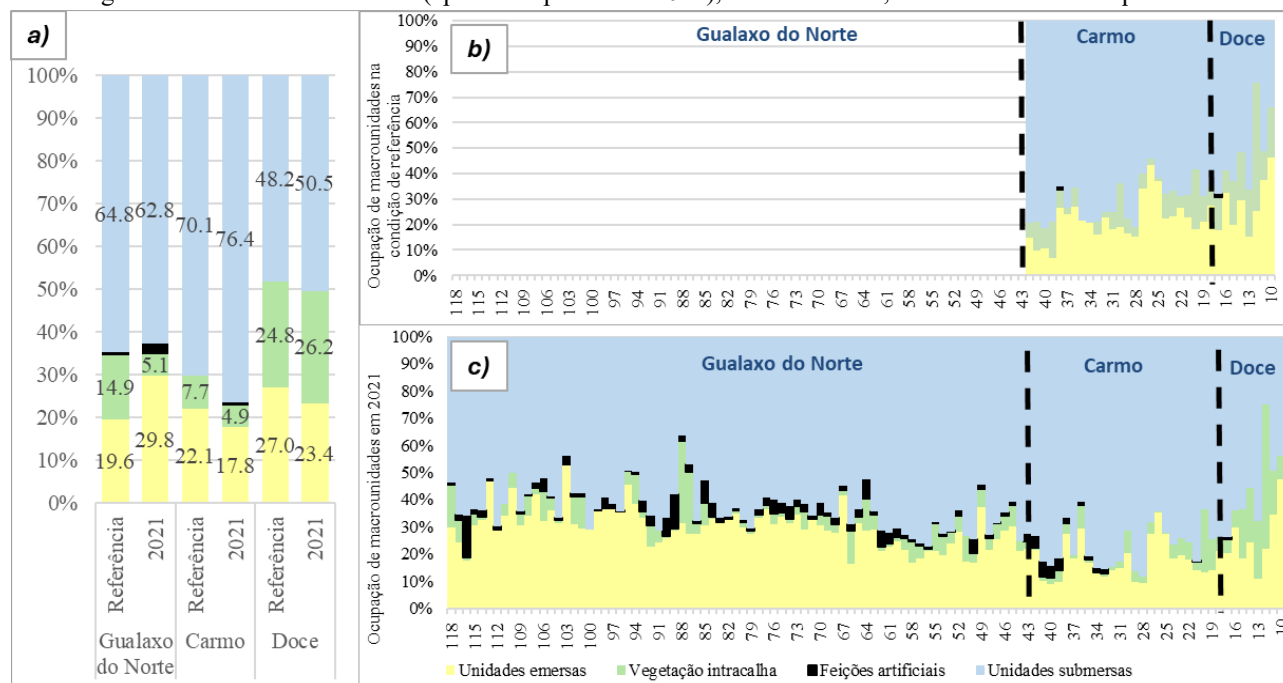
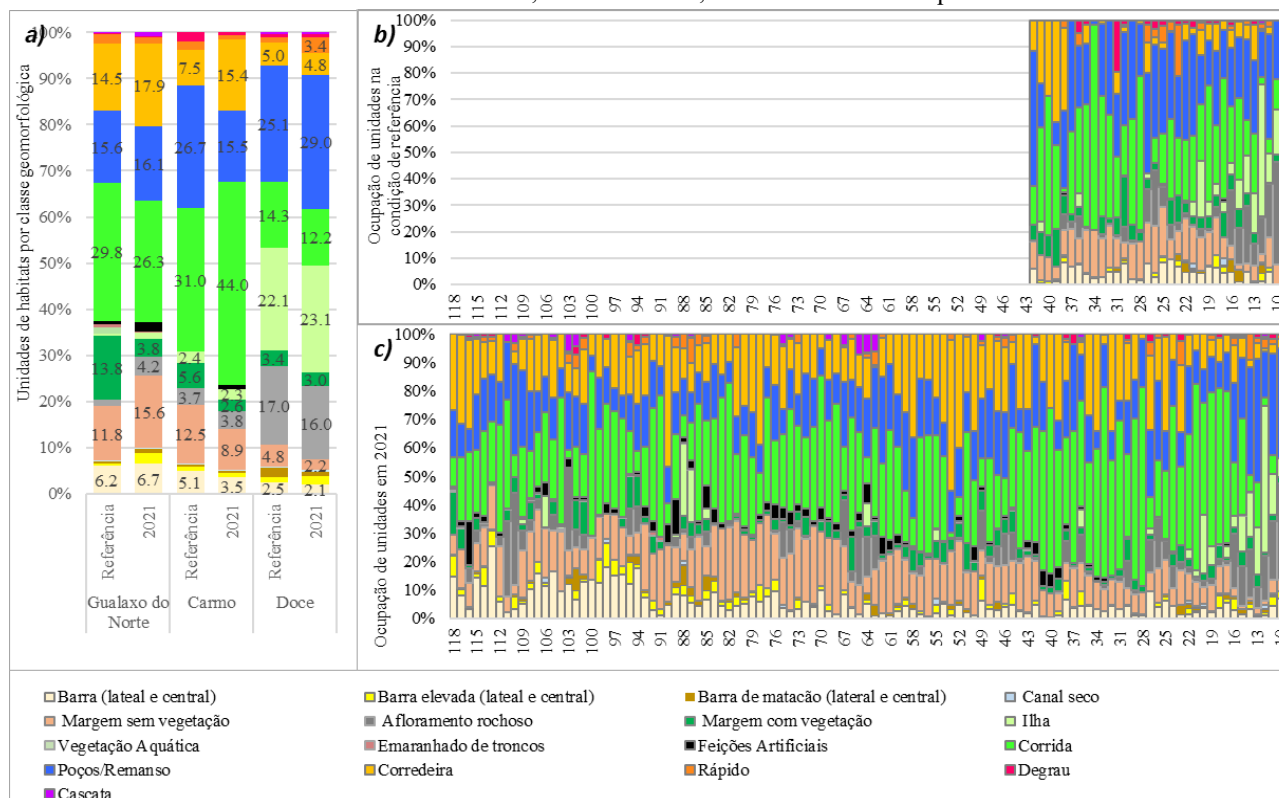


Figura 2 – Visão geral dos resultados para unidades de habitats. a) comparativo dos valores médios da referência e do ano de 2021 por rio; e b) resultado a cada quilômetros ao longo do Carmo e Doce e c) resultados para 2021 ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, discretizadas a cada quilômetro.



CONCLUSÕES

A análise da presença e diversidade de habitats físicos demonstrou diferentes níveis de recuperação para o ano de 2021 nos três rios estudados, evidenciando a eficácia deste parâmetro para avaliação quantitativa da recuperação de sistemas fluviais. Os resultados indicam que:

1. O rio Gualaxo do Norte apresentou diversidade de habitats submersos superior à referência regional, com significância estatística superior a 99%. No entanto, a menor presença de margens vegetadas indica que a recuperação da vegetação marginal ainda estava em desenvolvimento no ano de 2021.
2. O rio do Carmo mostrou apresentavam características de presença de habitats de águas rápidas (corredeira, rápido, degraú e cascata) superiores à condição de referência, sendo essa uma das métricas indicada no estudo original (Estigoni et. al, 2023) como indicio de recuperação das estruturas de habitats submersos. Obs.: menor resolução das imagens históricas pode ter tido alguma influência nesse resultado.
3. O rio Doce apresentou recuperação mais expressiva, com características praticamente idênticas às condições pré-rompimento, incluindo a manutenção da presença de margens vegetadas e ilhas, sugerindo menor impacto e/ou maior resiliência neste trecho.

No geral os resultados indicam que intervenções de obras de estabilização de margens por enrocamento têm influência na diversificação de habitats físicos, tipicamente sendo associadas a habitats tipo poço/remanso meandrante ou forçado. As unidades do tipo margem vegetada

representam a maioria das macrounidades vegetação intracalha em todos os trechos, exceto no T11 (tanto rio Doce, quanto rio Piranga), onde existe uma expressiva presença de ilhas. A ocorrência de habitats do tipo margens vegetadas parece ser afetada pela questão fundiária, que por sua vez é afetada por questões de acesso ao local (i.e., áreas com extensas planícies de inundação são de fácil acesso e tipicamente correspondem a áreas antropizadas).

Ainda sob o mesmo racional, a classe margem sem vegetação representa a maioria da área das unidades emersas ou são equivalentes a presença da classe barras arenosas, sendo mais proeminente o predomínio da classe margem sem vegetação médio e baixo Gualaxo do Norte e rio do Carmo, reconhecidamente trechos com presença de atividade agrícola. Ressalta-se que esta classe inclui áreas com pastagem, áreas com indivíduos arbustivos ou arbóreos isolados em área predominantemente de pastagem ou solo exposto, e áreas de erosão. A presença de margens vegetadas era em 2021 a maior diferença observada quanto a presença de habitats, ressaltando a importância da manutenção das áreas revegetadas e continuidade das atividades de revegetação.

É de extrema relevância destacar que os resultados apresentados neste trabalho refletem a situação de 2021. Considerando que as transformações geomorfológicas são processos cumulativos, e analogamente o crescimento da vegetação também, espera-se que a recuperação das características física dos rios afetados pelo rompimento, bem como a situação da vegetação ciliar e nas margens, tenha evoluído nos últimos anos.

A metodologia empregada, baseada em mapeamento sistemático utilizando imagens aéreas de alta resolução, mostrou-se adequada para avaliação quantitativa da recuperação de rios, permitindo:

- ✓ Análise objetiva da presença e diversidade de habitats;
- ✓ Comparação estatisticamente robusta com condições de referência; e
- ✓ Identificação de padrões de recuperação em diferentes escalas.

Este estudo demonstra que a análise de habitats físicos é uma ferramenta eficaz para avaliação da recuperação de rios impactados, fornecendo subsídios importantes para o entendimento dos processos de recuperação natural e induzida em sistemas fluviais.

É importante ressaltar que este trabalho representa a primeira vez que um mapeamento de habitats físicos foi realizado no Brasil em tal escala e nível de detalhamento. Isso tem uma significância científica notável para o país, estabelecendo um precedente metodológico e fornecendo uma base de dados valiosa para futuras pesquisas e gestão de recursos hídricos.

Além disso, a abordagem de utilizar rios similares da região para estabelecer a condição de referência resultou na produção de um banco de dados abrangente sobre os rios da cabeceira da bacia do rio Doce. Este conjunto de dados é de grande relevância para o controle e análise da condição dos rios na região. Considerando que esta área possui diversas barragens de minério, este banco de dados de imagens, mapeamento de habitats físicos e análises associadas é de grande valor tanto para as empresas mineradoras quanto para órgãos reguladores. Ele fornece uma linha de base crucial para avaliações de impacto ambiental, planejamento de medidas de mitigação e monitoramento contínuo da saúde dos ecossistemas fluviais.

Em resumo, este estudo não apenas contribui para a compreensão da recuperação dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, mas também estabelece um novo padrão para a avaliação e monitoramento de sistemas fluviais no Brasil, com potenciais aplicações em gestão ambiental, conservação e planejamento de uso sustentável dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- BISSON, P. A., MONTGOMERY, D. R., AND BUFFINGTON, J. M. (2017). *Valley segments, stream reaches, and channel units*. Methods in Stream Ecology, Volume 1 (pp. 21–47). Elsevier.
- COFFMAN, D.K.; MALSTAFF, G.; E HEITMULLER, F.T. (2011). *Characterization of geomorphic units in the alluvial valleys and channels of Gulf Coastal Plain rivers in Texas, with examples from the Brazos, Sabine, and Trinity Rivers, 2010*. Relatório preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey) Scientific Investigations Report 2011–5067, 31 p.
- CURTIS, J. A. E GUERRERO, T. M. (2015). *Geomorphic Mapping to Support River Restoration on the Trinity River Downstream from Lewiston Dam, California, 1980–2011*. USGS Scientific Investigations Report 2015–1047.
- ESTIGONI, M.V., REZENDE, T.N., FREIRE, I.B., ALENCAR, M.M., PEREIRA, F.Z. (2023). Avaliação da presença de habitats físicos no rio Gualaxo do Norte após o rompimento da barragem de Fundão – MG. 32º Congresso da ABES. Belo Horizonte, 2023.
- GILVEAR D, DAVIDS C & TYLER A (2004). The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology; River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20 (7), pp. 795-811. <https://doi.org/10.1002/rra.792>
- JANISCH, J. (2013). *Dictionary of Metrics for Physical Habitat: Definitions and Calculations Used for Watershed Health Monitoring and Related Studies*. Washington State Department of Ecology, Environmental Assessment Program.
- Huang, X., Tang, G., Zhu, T. et al (2019). Space-for-time substitution in geomorphology. *J. Geogr. Sci.* 29, 1670–1680. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1684-0>
- LABBE, T.; GROTEFENDT, R.; CARTER-MORTIMER, A. AND JONES, J. Ç. (2005). *Dosewallips River Habitat Assessment: Coupling High-Resolution Remote Sensing and Ground Surveys to Prioritize Aquatic Conservation, Olympic Mountains, Washington State*. Relatório preparado para o Departamento Americano de Assuntos Indígenas (USDI – Bureau of Indian Affairs). Dezembro de 2005.
- LEGLEITER, C. (2003). Spectrally Driven Classification of High Spatial Resolution, Hyperspectral Imagery: A Tool for Mapping In-Stream Habitat. *Environmental Management* 32, 399–411 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0034-1>
- MANTZOUKI, E., BEKLIOGLU, M., BROOKES, J.D., et. al (2018). Snapshot Surveys for Lake Monitoring, More Than a Shot in the Dark. *Front. Ecol. Evol.* 6:201. doi: <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00201>
- MARCUS WA. (2002). Mapping of instream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. *Journal of Geographical Systems* 4.
- MARCUS, W. A., LEGLEITER, C. J., ASPINALL, R. J., BOARDMAN, J. W., AND CRABTREE, R. L., (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams, *Geomorphology*, vol. 55, pp. 363–380, 2003. doi:10.1016/S0169-555X(03)00150-8.
- MONTGOMERY, D. R., AND BUFFINGTON, J. M. (1997). *Channel-reach morphology in mountain drainage basins*. Geological Society of America Bulletin, 109(5), 596–611.
- MONTGOMERY, D. R., AND BUFFINGTON, J. M. (1998). Channel processes, classification, and response. *River ecology and management*, 112, 1250–1263.
- OBANAWA H, HAYAKAWA Y S, MATSUKURA Y, 2009. Rates of slope decline, talus growth and cliff retreat along the Shomyo River in central Japan: A space-time substitution approach. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 91(4): 269–278. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2009.00369.x>
- RINALDI, M.; BELLETTI, B.; BERGA CANO, M. I. et al. (2015). *Final report on methods, models, tools to assess the hydromorphology of rivers*. Deliverable 6.2, Relatório preparado em cinco partes

para REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), um projeto de colaboração de grande escala financiado pela European Commission pelo 7th Framework Programme, acordo de financiamento 282656.

USFS (2012). Stream Inventory Handbook Level I & II. 2.12.

WHEATON, J. M.; FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G.; et al. (2015). *Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms*. *Geomorphology*, v. 248, p. 273-295.

WOODGET, A.S., AUSTRUMS, R., MADDOCK, I.P. AND HABIT, E. (2017), *Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology*. *WIREs Water*, 4: e1222.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento do estudo e suporte realizado pela Fundação Renova (em liquidação), o apoio dos demais membros da equipe técnica da NHC Brasil Consultores, e aos técnicos de agências ambientais integrantes da CT-GRSA e seus consultores que acompanharam o desenvolvimento do trabalho original pelas sugestões.