

AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE HABITATS FÍSICOS NO RIO GUALAXO DO NORTE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO - MG

Marcus V. Estigoni⁽¹⁾

Eng. Ambiental. Doutor e Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP (EESC-USP). Gerente de Projetos na NHC Brasil Consultores – Especialistas em Recursos Hídricos.

Thaís N. Rezende

Eng. Civil. Mestre em Eng. de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Engenheira Hidrotécnica na NHC Brasil Consultores – Especialistas em Recursos Hídricos.

Isabela B. Freire

Eng. Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Engenheira Hidrotécnica na NHC Brasil Consultores – Especialistas em Recursos Hídricos.

Melina M. Alencar

Bióloga com especialização em Gestão Ambiental e em Perícia e Auditoria Ambiental pela Faculdade Unilinhares. Coordenadora do Programa de Manejo de Rejeitos na Fundação Renova

Fabio Z. Pereira⁽¹⁾

Eng. Civil. Mestre em Eng. Hidráulica pela Escola Politécnica da USP (Poli-USP) com especialização em Gestão Ambiental e em Perícia e Auditoria Ambiental pela Faculdade Unilinhares. Analista do Programa de Manejo de Rejeitos na Fundação Renova

Endereço⁽¹⁾: Av. Dr. Cardoso de Melo 1450 – 2º. Andar – conj. 201. Vila Olímpia, São Paulo – SP - Brasil. CEP: 04548-005 | e-mail: mestigoni@nhcweb.com

RESUMO

A maioria das estações de tratamento encontra-se trabalhando acima de sua capacidade e requerendo um aumento de vazão em função da demanda que aumenta dia após dia. Uma grande parte dessas estações utiliza tradicionalmente o sulfato de alumínio como coagulante primário e poucas vezes usam algum tipo de polímero como auxiliar de floculação. Na escolha desses produtos nem sempre a qualidade da água a ser tratada é levada em consideração. Procurando atender aos padrões de qualidade exigidos e a sobrecarga que muitas vezes é inevitável, observa-se que em cada caso haverá um coagulante e/ou um auxiliar de floculação mais adequado a essas situações. De posse de tal constatação, faz-se necessário que se investigue em laboratório por meio novas metodologias, os vários produtos que aplicados à água bruta possibilitam obter água tratada com qualidade, em quantidade satisfatória, visando sempre o menor custo.

Sendo assim, o presente trabalho vem relatar um estudo realizado em uma estação de tratamento de água projetada para a vazão nominal de 120 L/s, porém, funcionando com 158 L/s, apresentando por esse motivo, água decantada com altos valores de turbidez e cor, o que sobrecarrega os filtros.

Os estudos realizados nessa estação resultaram não só a melhoria da qualidade da água decantada e filtrada como também possibilitou o aumento de sua capacidade com razoável economia dos produtos químicos que atuam na coagulação. A estação trata atualmente a vazão de até 280 L/s, mantendo a qualidade da água conforme os padrões exigidos pela portaria 36/GM, de 1990.

PALAVRAS-CHAVE: Aumento de Capacidade, Melhoria da Qualidade, Água com Alcalinidade, Coagulante Adequado, Auxiliares de Floculação.

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.

Com o passar do tempo e com a ocorrência de processos físicos de transporte de material pelas águas dos rios, o canal fluvial que se encontrava com grande homogeneidade, tem passado por transformações buscando recompor suas características, incluindo a formação e diversificação de habitats físicos.

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. Esses trechos de diferentes naturezas fornecem também habitats distintos para os organismos aquáticos (Montgomery & Buffington, 1997, 1998; Bisson e colaboradores, 2017). Segundo Suska et al. (2020), a complexidade dos habitats fluviais é um dos fatores que embasam a recuperação de rios que sofreram impactos de natureza física.

Diferente de parâmetros de qualidade de água que são efêmeros e altamente influenciados pela variação de vazão, os habitats físicos correspondem a uma espécie de registro histórico, sendo definidos de maneira cumulativa pelos processos de transporte de sedimentos, que por sua vez são definidos pelo regime hidráulico e hidrológico. Sendo ótimo parâmetro para avaliação da recuperação de rios que sofreram impactos físicos, como o caso do trecho mais a montante dos rios impactados pelo rompimento da barragem de Fundão.

OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste estudo é avaliar a recuperação do rio Gualaxo do Norte quanto a presença e diversidade de habitats físicos, incluindo a definição de valores de referência para presença de habitats físicos baseados em rios não impactados da região (abordagem *space-for-time substitution*), e mapeamento e avaliação de habitats físicos do rio Gualaxo do Norte em dois momentos após o rompimento (anos de 2019 e 2021), identificando as respostas do sistema fluvial à perturbação causada pelo rompimento da barragem de Fundão.

Os objetivos específicos são:

- Realizar mapeamento sistemático das estruturas de habitats físicos (cascatas, corredeiras, rápidos e remansos/poços) nos trechos da área de estudo para os anos de 2019 e 2021;
- Definir condição de referência para a presença de estruturas de habitats físicos na área de estudo;
- Avaliar o processo de evolução e recuperação das estruturas de habitats físicos, comparando informações de referência com informações dos anos de 2019 e 2021, e informações de estudos e trabalhos pertinentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

A identificação de habitats físicos e seu mapeamento é tipicamente realizado com base em avaliação visual. Considerando o difícil acesso por terra em parte do trecho a ser estudado, o mapeamento sistemático de habitats físicos foi baseado em imagens aéreas de alta resolução obtidas com drone em sobrevoo de baixa altitude. As imagens foram feitas em período seco (menor profundidade e turbidez, consequente melhor visualização do leito do rio).

Esta abordagem é documentada na literatura científica/acadêmica especializada (i.e., Legleiter, 2003; Marcus, 2002; Gilvear et al., 2004) e recomendada por instituições/agências de meio ambiente (Rinaldi et al., 2015; Janisch, 2013).

Neste trabalho foram escolhidas classes de habitats tipo cascatas, corredeiras, rápidos e remansos/poços (Figuras 1 e Tabela 1). Ressalta-se que existem outras formas de classificação de habitats físicos mais e menos detalhadas. A escolha pelo uso de quatro “macro” classes (mesohabitats) teve como base a extensão da área de estudo e a necessidade de comparação entre diferentes momentos (referência, 2019 e 2021), onde se antecipa que um menor número de classes torna mais robustos, estatisticamente falando, os resultados das comparações.

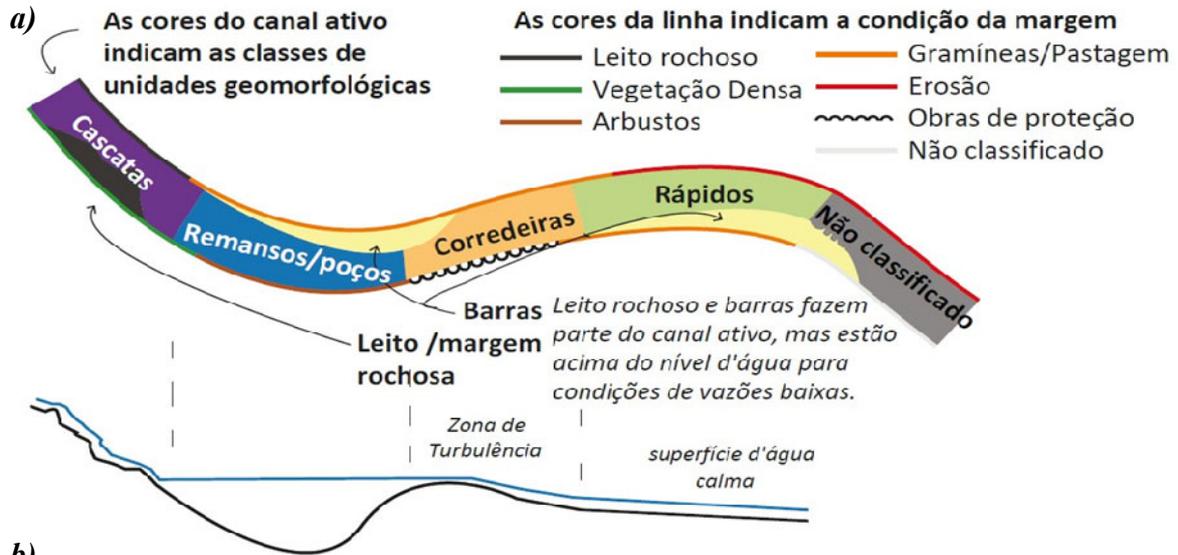


Figura 1 - a) Estrutura conceitual dos habitats físicos; b) Exemplo de delimitação no rio Gualaxo do Norte.

Tabela 1 – Classes de habitats físicos e características.

CLASSE	FORMA TOPOGRÁFICA	VELOCIDADE DO FLUXO EM CONDIÇÕES DE BAIXA VAZÃO	PROFUNDIDADE RELATIVA
Poço/remanso (<i>pools</i>)	Leito côncavo, ponto mais profundo substancialmente abaixo do leito, em algum ponto a jusante	Lenta	Profunda
Rápido(s) (<i>runs/glides</i>)	Leito plano com gradiente moderado abaixo. Superfície da água levemente inclinada.	Moderado a lento	Moderado
Corredeira (<i>riffles</i>)	Leito plano, frequentemente pontos altos locais ao longo do perfil talvegue	Rápido, turbulento	Raso
Cascata (<i>cascades</i>)	Leito com inclinação íngreme.	Muito rápido (supercrítico)	Raso

A combinação entre a erosão do leito, margem e planícies de inundação dos rios seguida de deposição do material majoritariamente composto por rejeitos oriundos da barragem de Fundão alterou as características físicas dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce a montante do reservatório de Candonga. Imediatamente após o evento, estes rios apresentavam pouca ou nenhuma heterogeneidade hidráulica e homogeneidade do material do leito (predominantemente fino).

A presença de habitats das classes corredeiras e remansos é um fator importante na avaliação da recuperação das características físicas dos rios, isso porque trata-se de tipos de habitats que não existiam imediatamente após o rompimento. O mesmo pode ser dito em relação a qualquer tipo diversidade de habitats físicos (i.e., alternância entre rápidos e outras classes de habitats). Deste modo, qualquer identificação de habitats do tipo remansos/poços e corredeiras, bem como o aumento da diversidade de habitats, são indícios de recuperação das características físicas dos rios, e o índice de presença dessas classes de habitats pode auxiliar na avaliação do grau de recuperação dos rios. Deve ser notado que os habitats do tipo cascata já se encontravam visíveis pouco tempo após o rompimento, fato atribuído ao elevado gradiente energético do escoamento que ser capaz de manter partículas de material fino em suspensão, inibindo que sua deposição altere as características físicas destes locais.

Considerando que material depositado em praticamente toda a área impactada dos rios era majoritariamente composto por rejeitos (caracterizados por granulometria fina, silte ou menor), qualquer identificação de material mais grosseiro (areias, cascalho, pedra de mão, ou maior) indica que o rejeito que ali existia após o evento foi removido (processo de erosão seletiva, do inglês *sorting*) e houve alguma recuperação das características físicas do rio, de modo que, para atingir o objetivo proposto, não é necessário a identificação direta do material fino. Ainda que a identificação de areias no leito do rio também possa ser interpretada como recuperação das características físicas, para a avaliação de habitats físicos, a identificação de cascalho, pedra de mão/seixos, ou maior, na camada superficial do leito é mais pertinente, pois esse material é tipicamente associado a habitats do tipo corredeiras, os quais não estavam presentes imediatamente após o rompimento.

Para se testar as hipóteses de recuperação das características físicas dos rios foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Presença percentual de habitats do tipo corredeiras;
- Presença percentual de habitats do tipo corredeiras somados aos remansos/poços; e
- Presença percentual de material grosseiro.

Foram avaliados os seguintes cenários:

- **Cenário de referência:** condição representativa da situação de presença de habitats em momento anterior ao rompimento. Foi baseado em informações levantadas de rios da região com características similares ao Gualaxo do Norte durante a estação seca de 2021;
- **Cenário 2019:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2019; e
- **Cenário 2021:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2021.

As imagens aéreas são a base de dados primordial do presente estudo. Imagens aéreas foram tomadas como base ao mapeamento sistemático de habitats físicos dos rios impactados nos anos de 2019 e 2021, bem como à definição das condições de referência ao rio Gualaxo do Norte, pelo mapeamento de rios da região (abordagem do tipo *space-for-time substitution*). Considerando a necessidade de observar as características do leito, as imagens aéreas foram obtidas na estação seca, isto é, sob condições de baixas vazões (profundidades) e baixa turbidez. As imagens processadas possuem resolução média de 2 cm, permitindo diferenciar a presença de material do tipo cascalho (> 2cm) ou maior de locais com presença de material mais fino. Neste estudo utilizamos o termo material grosseiro para identificar material maior que 2 cm. No levantamento de 2019 houve locais em que foi necessário complementar com o uso de imagens de 10 cm de resolução (Geopixel, 2019).

Em período anterior ao rompimento da barragem de Fundão não há registros com qualidade suficiente ao mapeamento e que abranja todo o trecho em estudo. O rio Gualaxo do Norte é relativamente estreito (largura típica entre 10 e 20 m), e vegetação ciliar de grande porte, especialmente nos trechos mais a montante, que no geral dificulta, ou mesmo impede, a visualização do leito do rio em uma parcela significativa dos trechos. Mais para jusante, havia menor presença de mata ciliar e identificou-se trechos em que imagens de satélite eram adequadas para o presente estudo.

Assim, condição de referência foi baseada em 53 trechos de 1 a 3 km de extensão localizados rios da região não atingidos pela onda (levantamento realizado em 2021), e 3 trechos no rio Gualaxo do Norte (imagens de satélite de 2014). A quantidade de trechos de referência foi definida com base em critérios estatísticos, visando assegurar robustez estatística nas análises de comparação. 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).

Por se tratar de uma comparação entre dois grupos amostrais distintos (rio Gualaxo do Norte e trechos de rios da região), em adição a comparação direta dos resultados (i.e., comparação entre valores médios), foi realizada uma análise de poder *a posteriori* dos resultados para dar maior robustez as conclusões. De maneira simplista, esse tipo de análise estima a probabilidade de se estar certo ao afirmar que uma amostra é ou maior, ou menor ou igual a outra. As métricas descritas anteriormente (presença percentual de habitats do tipo corredeiras, corredeiras somados a remansos/poços e de material grosseiro) foram avaliadas por três testes de inferência:

- Teste 1: inferência de recuperação do Rio Gualaxo do Norte (valores maiores que a referência);
- Teste 2: inferência de não-recuperação do Rio Gualaxo do Norte (valores menores que a referência); e
- Teste 3: inferência de igualdade entre Rio Gualaxo do Norte e Referência (valores iguais a referência).

De modo geral, é convencionado que um poder mínimo de 80%, isto é, $1-\beta \geq 80\%$, indica suficiente significância estatística (NCSS, 2020). Sendo assim, nos três testes conduzidos, adotou-se este valor para inferir robustez/significância estatística nas comparações. Quando conclusivos ($1-\beta \geq 80\%$), os Testes 1 e 2 possibilitam inferir sobre a recuperação do rio Gualaxo do Norte para a métrica avaliada. No caso do Teste 3, pela forma em que o teste de poder é estruturado, um poder estatístico calculado é referente a se afirmar que as amostras são diferentes quando de fato são diferentes, o que implica que valores menores que 80% significam que não se pode rejeitar a hipótese de que as amostras são iguais. Destaca-se que o Teste 3 é considerado Não Aplicável (NA) nas situações em que o intervalo de tamanhos de efeito superior e inferior não incluem zero (BUCHANAN et al., 2017), bem como nas situações em que os Testes 1 ou 2 já apresentam valores conclusivos.

Deve ser ressaltado que os testes são conduzidos individualmente para cada métrica, e que a obtenção de robustez/significância estatística em uma determinada métrica não implica necessariamente na mesma conclusão para as demais

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados do estudo indicam que significativas mudanças nas características físicas dos rios afetados pelo rompimento ocorreram no período analisado, e que eles se encontram rumo a um estágio similar as condições

definidas como referência. A Figura 2 apresenta os resultados para presença de habitats físicos por trechos contínuos (classificação realizada por CH2M (2017) com base em características morfológicas, contexto do entorno e características observadas das alterações causadas pelo rompimento) e para o rio como um todo, e a Figura 3 a cada quilômetro de rio. A Tabela 3 apresenta os resultados da análise do poder estatístico para o parâmetro de presença de corredeiras e a Tabela 4 para presença de corredeiras somado a remansos/poços.

O valor de referência médio para o rio Gualaxo do Norte para a presença de corredeiras é aproximadamente 27%. Em relação a presença percentual para corredeiras somadas a remansos o valor de referência é de 42% para o rio Gualaxo do Norte. Esses resultados indicam uma proeminente evolução na diversidade de habitats, com um expressivo aumento da presença de corredeiras e remansos entre os anos de 2019 e 2021.

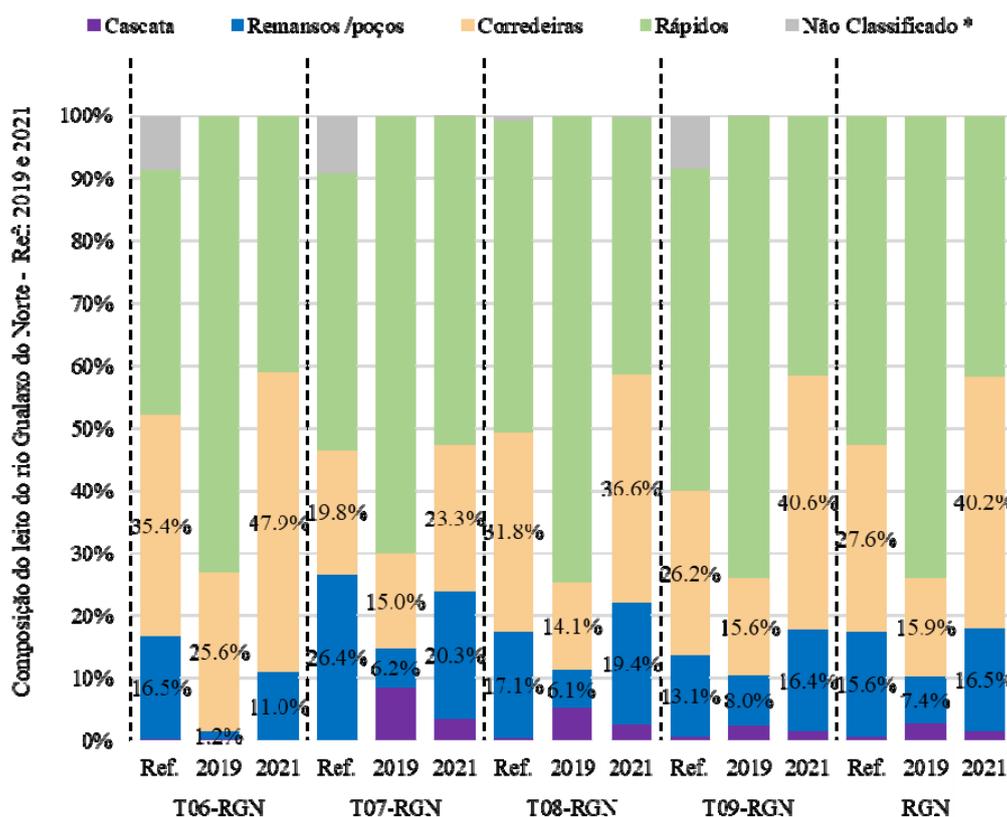


Figura 2 – Presença percentual dos habitats físicos nos trechos do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).

Tabela 2 – Resumo dos resultados da análise estatística de poder a posteriori para presença de Corredeiras.

Agrupamento	Tam. de Efeito		Teste 1 (RGN > Ref.)	Teste 2 (RGN < Ref.)	Teste 3 (RGN = Ref.)
	g_{inf}	g_{sup}	$1-\beta_1$	$1-\beta_2$	$1-\beta_3$
Trecho 06	-0.02	1.50	91.86%	10.69%	NA
Trecho 07	-0.95	1.05	54.55%	49.32%	33.59%
Trechos 06+07	-0.05	1.10	89.29%	12.20%	NA
Trecho 08	-0.33	0.98	75.16%	26.87%	17.14%
Trecho 09	0.50	1.08	99.99%	0.02%	NA
Geral	0.46	0.92	100.00%	0.01%	NA

Tabela 3– Resumo dos resultados da análise estatística de poder a posteriori para presença de Corredeiras somadas a Remansos/poços.

Agrupamento	Tam. de Efeito		Teste 1 (RGN > Ref.)	Teste 2 (RGN < Ref.)	Teste 3 (RGN = Ref.)
	g_{inf}	g_{sup}	$1-\beta_1$	$1-\beta_2$	$1-\beta_3$
Trecho 06	-0.47	1.00	69.27%	33.15%	21.34%
Trecho 07	-1.23	0.78	40.20%	63.85%	26.16%
Trechos 06+07	-0.53	0.61	54.25%	46.99%	32.71%
Trecho 08	-0.21	1.11	82.60%	19.53%	NA
Trecho 09	0.48	1.05	99.98%	0.03%	NA
Geral	0.35	0.81	99.95%	0.06%	NA

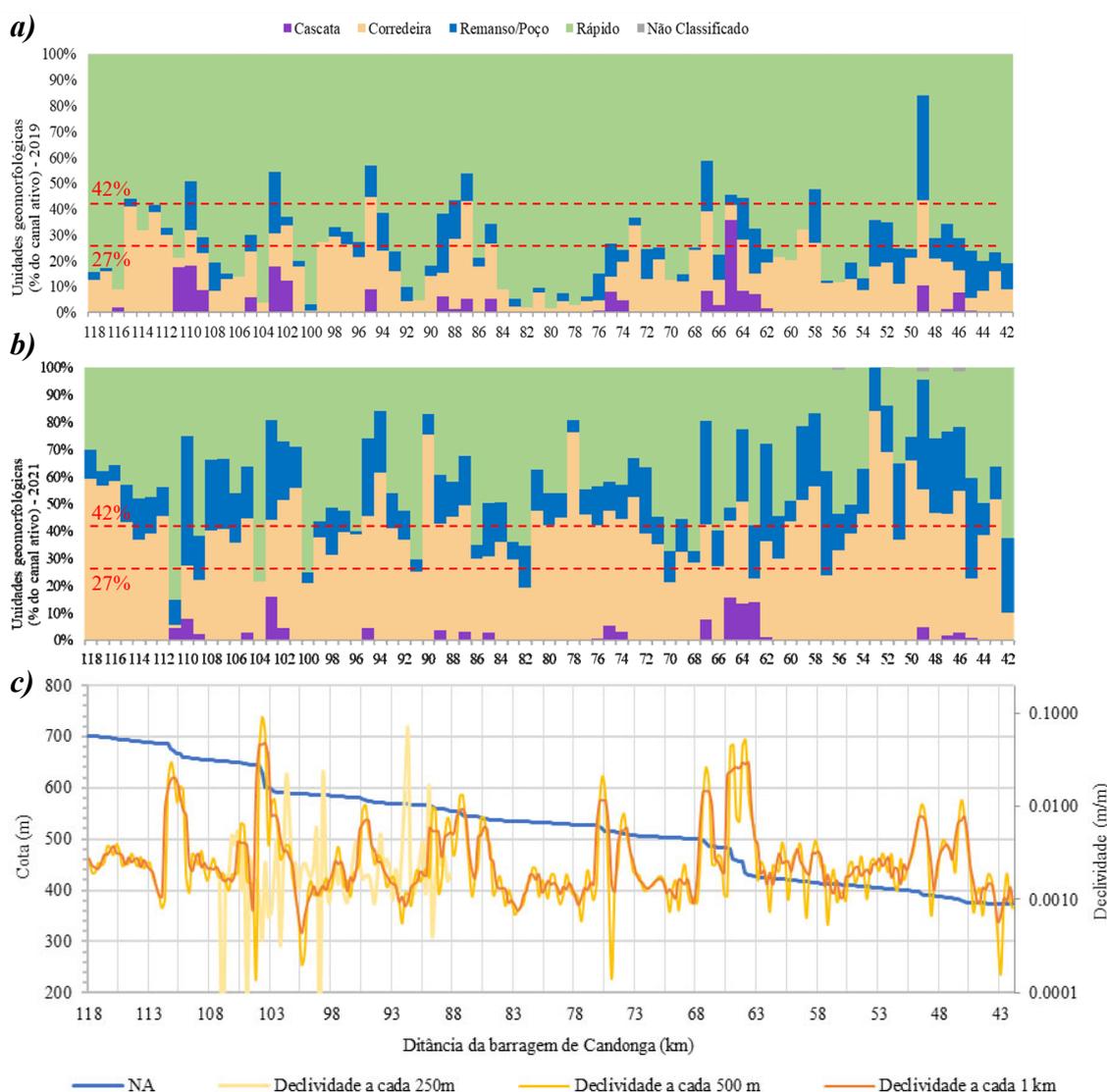


Figura 3 - Visão geral dos resultados do mapeamento dos habitats físicos plotados ao longo do rio Gualaxo do Norte apresentada a cada quilômetro. a) ano de 2019; b) ano de 2021; e c) perfil longitudinal e de declividade.

Enquanto que para o rio como um todo o teste de poder estatístico assegura que o rio Gualaxo do Norte possui em geral mais corredeiras e mais corredeiras somadas a remansos que a referência (poder superior a 99%)¹, ao avaliar cada trecho do PMR, com exceção do T09 (poder superior a 99%) não se tem a mesma robustez estatística, em especial para os trechos T06 e T07, em que o número de amostras é relativamente pequeno. Na prática, isso implica que é possível concluir que:

- a) em média o rio Gualaxo do Norte possui maior diversidade de habitats que a referência;
- b) o T09 possui maior diversidade de habitats que a referência;
- c) as análises mostram que mesmo que o T06, T07 e T08 apresentem em média maior diversidade de habitats que a referência, e que há uma probabilidade que não pode ser desprezada de que algum pequeno segmento apresente diversidade de habitats menor que a referência.

A Figura 4 apresenta os resultados para a presença do material predominante na camada superficial do leito, e a Tabela 4 os resultados da análise do poder estatístico.

Em relação a predominância de material grosseiro, foi observada um aumento entre 2019 e 2021. Também é notável a redução significativa de áreas com predominância de “Areias ou mais fino (escuro)”, tendo sido majoritariamente substituído por material que pode ser associado a sedimentos finos de origem natural na bacia hidrográfica (classe “Areias ou mais fino (claro)”). Apesar da significativa mudança entre 2019 e 2021, quando comparado com a referência, em 2021 o Gualaxo do Norte apresenta valores de presença de áreas com predominância de material grosseiro ligeiramente inferiores (40.51 comparado com a referência de 43.26). mesmo ao se considerar um intervalo de 10% da distribuição ao redor da média², a análise estatística indica grande confiança ao afirmar que o rio Gualaxo do Norte ainda possui menor quantidade de material grosseiro que a referência. Em outras palavras, apesar de próximas, ainda não se pode afirmar que a qualidade dos habitats dos rios impactados é equivalente à qualidade observada na referência. Essa mesma inferência pode ser feita quando se subdivide nos trechos.

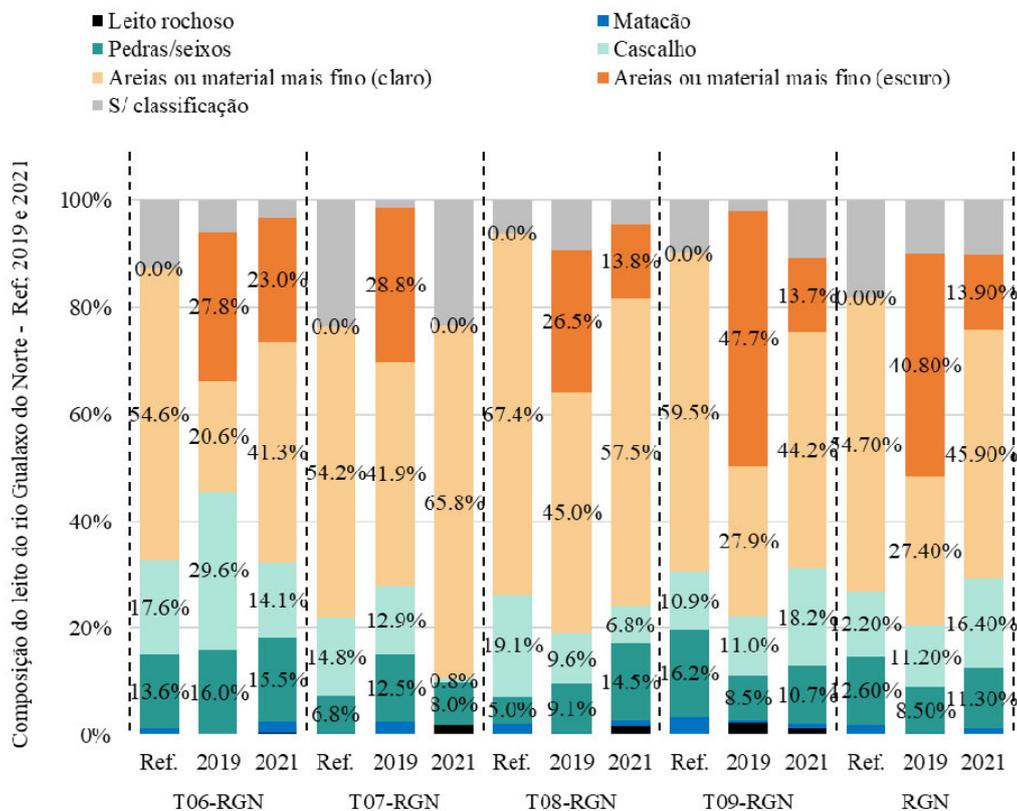


Figura 4 - Presença percentual do material predominante na camada superficial do leito do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).

¹ Tipicamente assume-se que um poder de 80% ou maior denota confiabilidade na análise.

² Ressalta-se que esse valor não é equivalente a 90% ou 110% da média, mas sim um valor que é função de características da distribuição de valores da amostra, usualmente expressos pelo desvio padrão e variância.

Tabela 4 – Resumo dos resultados da análise estatística de poder a posteriori para a métrica %Grosseiros.

Agrupamento	Tam. de Efeito		Teste 1 (RGN > Ref.)	Teste 2 (RGN < Ref.)	Teste 3 (RGN = Ref.)
	g_{inf}	g_{sup}	$1-\beta_1$	$1-\beta_2$	$1-\beta_3$
Trecho 06	-0.99	0.48	33.69%	68.71%	21.73%
Trecho 07	-2.44	-0.20	6.02%	97.44%	NA
Trechos 06+07	-1.17	-0.01	9.45%	91.96%	NA
Trecho 08	-1.44	-0.09	7.26%	94.56%	NA
Trecho 09	-0.63	-0.05	6.79%	93.52%	NA
Geral	-0.62	-0.16	12.09%	88.67%	NA

Os resultados também mostram tendência de ocorrer maior presença de material grosseiro em trechos de maior declividade, o que é esperado segundo a teoria do transporte de sedimentos, bem como maior diferença em relação a referência e maior robustez estatística ao afirmar que a classe de menor declividade possui menor quantidade de grosseiros que a referência. O mesmo é observado ao nível de cada unidade de habitat físico. Os resultados indicam que diferença do percentual de grosseiros observadas em corredeiras é menor do que a observada em rápidos e poços/remansos, quando se compara os resultados do Gualaxo do Norte com a referência. Possivelmente indicando que as corredeiras atingirão um estágio similar à referência primeiro que as demais classes.

CONCLUSÕES

As informações apresentadas neste documento correspondem à uma base de dados robusta gerada a partir de mapeamento de habitats físicos em uma macroescala (mesohabitats), tendo sido estimada a condição de referência para presença de habitats físicos com base nos rios da região e da condição no ano de 2019 e no ano de 2021 para o rio Gualaxo do Norte.

No geral e na avaliação de trechos específicos (i.e., resultados agrupados por trechos do PMR), para todos os parâmetros medidos, a comparação entre os cenários de 2019 e 2021 indica que os rios avaliados passaram por mudanças significativas durante esses 2 anos.

Apesar de no ano de 2021 o rio Gualaxo do Norte já ter alcançado uma condição de presença e diversidade de habitats físicos similar ou superior aos rios da região não afetados pelo rompimento, a qualidade desses habitats (presença de material grosseiro) ainda não está equivalente à de rios não afetados pelo rompimento. É esperado que com o passar do tempo e continuidade dos processos físicos naturais do transporte de sedimentos, especialmente em eventos de cheias, a presença de grosseiros no leito do rio Gualaxo do Norte aumente e alcance uma condição similar ou superior aos rios da região não afetados pelo rompimento.

A variação dos resultados em função da declividade também sugere que a recuperação do sistema é limitada pela quantidade de trabalho que os rios são capazes de realizar, e é esperado aumento da recuperação das características físicas do leito fluvial com o aumento da capacidade de trabalho dos rios, seja pela ocorrência de grandes eventos de cheia (grande capacidade de trabalho concentrada no período de duração do evento), ou mesmo pela ocorrência contínua de vazões de menor intensidade – pois o trabalho de recuperação do rio é cumulativo e contínuo.

O aumento de áreas com predomínio sugere que uma vez erodido pelo escoamento, o material composto de rejeitos finos entra no transporte por suspensão (*suspended load*) ou por lavagem (*wash load*) e é rapidamente (ao longo de dias ou semanas) transportado para jusante, com limitada interação com o leito do rio, e limitada tendência de deposição. Esses resultados são concordantes com os dados de estratigrafia do leito (WSP Golder, 2022) que aponta na maioria das amostras que a camada superior é composta por material grosseiro ou por uma camada de material de cor clara e granulometria equivalente à areia ou mais fino.

Em casos de recuperação de rios observa-se uma correlação entre a recuperação de características físicas dos rios e o retorno da biodiversidade em quantidade e abundância. O retorno dos habitats físicos à condições similares as do momento pré-rompimento é um forte indicativo de que o sistema fluvial está apto e fornecer condições ao retorno da vida em abundância e diversidade similares à de momentos anteriores ao rompimento, no entanto, eventuais impactos causados por outros agentes não relacionados com o rompimento (i.e., mineração ilegal, lançamento de efluentes, etc.) podem contribuir para inibição do retorno da biodiversidade. Deve-se também considerar uma população de indivíduos leva tempo para se desenvolver até sua maturidade, em outras palavras, ainda pode levar um tempo para que abundância e diversidade se recuperem. Desta maneira, ressaltamos que inferências diretas sobre aspectos de recuperação de biodiversidade não são aconselhadas.

Apesar da definição da condição de referência ter sido focada para o estudo de caso do rio Gualaxo do Norte, avalia-se que com as devidas ressalvas ela possa ser utilizada como referência regional para rios possuam características similares. O uso de imageamento aéreo para a classificação dos habitats forneceu excelente cobertura para o ano de 2021 com menos de 1% da área do rio Gualaxo do Norte sem condições de visualização do leito, comprovando a esperada robustez metodológica, indicando que essa técnica pode ser replicada futuramente para acompanhamento da evolução dos habitats físicos. Destaca-se ainda que diferentemente de procedimentos que seriam fundamentados na observação e registro em campo da presença de habitats, a abordagem utilizada realiza o registro das condições de campo com as imagens, e permitem eventual reavaliação dos resultados, mesmo após mudanças das condições de campo (i.e., após a ocorrência de evento de cheia).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. Buchanan, E., Scofield, J. and Valentine, K.D. (2017). *MOTE: Effect Size and Confidence Interval Calculator. R package version 0.0.0.9100*. Disponível em: <https://www.aggieerin.com/shiny-server/introduction/>
3. CH2M (2017). *Volume 1 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito – Trecho 8 – Revisão 00*. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP.
4. Geopixel (2019). *Serviços de monitoramento das ações de reabilitação ambiental das áreas impactadas entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves por meio de fotos aéreas, panorâmicas e índices de vegetação e geoprocessamento. Relatório Compilado semestral das campanhas de monitoramento Ref.: fev/19 a set/2019*. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São José dos Campos, 2019.
5. 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>
6. 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>
7. Janisch, J (2013). *Dictionary of Metrics for Physical Habitat: Definitions and Calculations Used for Watershed Health Monitoring and Related Studies*. Relatório N° 13-03-033 do Washington State Department of Ecology, Environmental Assessment Program, disponível em <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1303033.pdf> (acesso 09/12/2021).
8. 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>
9. 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>
10. Marcus WA. (2002). Mapping of instream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. *Journal of Geographical Systems* 4.
11. Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1997). *Channel-reach morphology in mountain drainage basins*. Geological Society of America Bulletin, 109(5), 596–611.
12. Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1998). Channel processes, classification, and response. *River ecology and management*, 112, 1250–1263.
13. NCSS 2020 Statistical Software (2020). *NCSS, LLC, 419: “Two-Sample T-Tests using Effect Size”*. Kaysville, Utah, USA, disponível em: [ncss.com/software/ncss](https://www.ncss.com/software/ncss).

14. 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>
15. 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.
16. Suska, K. and Parasiewicz, P. (2020). Application of the Mesohabitat Simulation System (MesoHABSIM) for Assessing Impact of River Maintenance and Restoration Measures. *Water* 12, no. 12: 3356. <https://doi.org/10.3390/w12123356>
17. WSP Golder (2022). *Monitoramento intracalha de sedimentos - Março a Novembro de 2021 (Campanhas F, G e H) - Revisão 01*. Relatório técnico N° RT-008_209-535-7742_01, preparado para Fundação Renova. São Paulo, 2022.