

Mapeamento de um espaço funcional fluvial como proposta de reconexão rio-planície: estudo de caso da Bacia do Rio Macaé

Beatriz Rohden Becker¹; Matheus Martins de Sousa²; Gisele Silva Barbosa³ & Marcelo Gomez Miguez⁴

RESUMO – Este trabalho propõe uma metodologia para definir uma faixa de mobilidade fluvial, com foco em rios retificados, denominado Espaço Funcional Fluvial (EFF), onde o rio tem liberdade para restabelecer sua hidrodinâmica natural. O EFF é delimitado pelo mapeamento de feições que indicam antigas posições do rio, e de áreas suscetíveis a inundações. Embora se espere a formação de meandros dentro do EFF, esse processo tende a ser lento devido à incisão do canal decorrente da retificação. A proposta foi aplicada em um estudo de caso na Bacia do Rio Macaé, no estado do Rio de Janeiro. A bacia foi modificada pela retificação de trechos dos seus principais rios, o Macaé e o São Pedro, com início na década de 1960, resultando em maior velocidade do escoamento das águas desses rios e na drenagem das planícies de inundação, que afetam diretamente as áreas urbanas, pois tais intervenções foram feitas à montante da cidade de Macaé. Os resultados evidenciam a possibilidade da requalificação fluvial, a partir do EFF, como estratégia para restabelecer funções ecológicas e hidrológicas em rios retificados, promovendo soluções mais sustentáveis e resilientes para mitigar inundações urbanas.

Palavras-Chave – requalificação fluvial, espaço funcional fluvial, soluções baseadas na natureza

ABSTRACT– This work proposes a methodology, focusing on rectified river sections, to define a river mobility corridor, designated as the Functional Fluvial Space (FFS), where the river has freedom to restore its natural hydrodynamics. The FFS is delimited by mapping terrain features that indicate former river positions and areas susceptible to flooding. Although the formation of meanders within the FFS is expected, this process tends to be slow due to channel incision resulting from rectification. The proposal was performed using the Macaé River Basin, in the state of Rio de Janeiro, as a study case. The basin was modified by the rectification of its main river, the Macaé and the São Pedro, beginning in the 1960s, resulting in increased flow velocity and the drainage of floodplains. These interventions directly affect urban areas, as they were carried out upstream the city of Macaé. The results highlight the potential of river restoration based on FFS as a strategy to restore ecological and hydrological functions in straightened rivers, promoting more sustainable and resilient solutions to mitigate urban flooding.

Key-words – river restoration, functional fluvial space, nature-based solutions

¹ Instituto Politécnico – CM UFRJ - Macaé: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco B, Sala 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ e Av. Aluizio da Silva Gomes, 50 - Granja dos Cavaleiros, Macaé, (21) 3938-7390 e (22) 21414006, beatriz.becker@coc.ufrj.br

² Programa de Engenharia Ambiental – PEA/UFRJ: Av. Athos da Silveira Ramos, 149, CT - Bloco A, 2º andar - sala DAPG, (21) 3938-7676, matheus@poli.ufrj.br

³ Instituto Politécnico – CM UFRJ - Macaé: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco B, Sala 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ e Av. Aluizio da Silva Gomes, 50 - Granja dos Cavaleiros, Macaé, (21) 3938-7390 e (22) 21414006, giselebarbosa@poli.ufrj.br

⁴ Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ; Programa de Engenharia Ambiental-PEA/UFRJ; Programa de Engenharia Urbana-PEU /UFRJ: Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Bloco B, Sala 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ, (21) 3938-7390, marcelomiguez@poli.ufrj.br

INTRODUÇÃO

Historicamente, as soluções para o controle das cheias urbanas basearam-se em estruturas de engenharia como diques, canais, estações de bombeamento e reservatórios, associadas a elevados custos de implantação, manutenção e operação. Mais recentemente, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) vêm ganhando destaque como alternativas para o enfrentamento das inundações, em razão dos benefícios como menores custos e a oferta de serviços ecossistêmicos (Zhou *et al.* 2024).

Entre esses serviços, destaca-se o controle de inundações, relacionado à capacidade dos ecossistemas de reduzir os danos causados por chuvas intensas, reduzindo o escoamento superficial (Stürck *et al.*, 2014). Em bacias hidrográficas, esse processo ocorre quando a água, ao extravasar do rio, ocupa as áreas adjacentes, denominadas planícies de inundação, com função de armazenamento, evitando que um grande volume seja direcionado para jusante. Além disso, essas áreas de inundação natural proporcionam diversos benefícios ambientais, como proteção dos habitats, recarga dos aquíferos, aumento da biodiversidade, melhoria da qualidade da água, oportunidades de lazer e recreação (Kousky; Walls, 2014).

Nas áreas urbanas, as planícies de inundação já se encontram, em sua grande maioria, ocupadas, enquanto os rios sofreram alterações significativas, transformando-se em canais, por vezes enterrados e distantes da sua forma original e natural (Walsh *et al.*, 2005). Diante disso, a requalificação de rios e de suas planícies de inundação torna-se uma solução sustentável e resiliente, pois diminui o risco hidráulico, integra a comunidade ao rio, melhora a qualidade da água, etc. Contudo, devido à limitação de espaço e à degradação ambiental nas cidades, propostas de requalificação fluvial podem ser implementadas em áreas periurbanas, pela maior disponibilidade de espaço, beneficiando grande parte da população urbana (Vindigni *et al.*, 2021).

No caso de rios retificados, uma das estratégias de requalificação envolve a re-meandrização, que busca restabelecer as curvas de um rio (meandros). Essa intervenção promove mudanças hidromorfológicas que diminuem o risco de inundações, principalmente pela redução da velocidade de fluxo em trajetos sinuosos e pelo aumento do comprimento do canal, ampliando sua capacidade de armazenamento e transporte de água. Além disso, favorece a reconexão do rio com suas planícies, que desempenham importantes interações hidrológicas, geomorfológicas, biogeoquímicas e ecológicas (Lawson *et al.*, 2018). Apesar dos benefícios da re-meandrização, é importante considerar os objetivos da intervenção, pois recriar meandros artificialmente pode não ser a abordagem mais adequada para a requalificação de rios retificados. Ao invés disso, fornecer espaço para o rio recuperar livremente seu estado desejável pode ser uma opção mais sustentável (Nardini, 2022).

A bacia do Rio Macaé, uma das principais bacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro, possui 1.765 km² e abrange seis municípios. O Rio Macaé, principal formador da bacia, percorre cerca de 137 km da nascente até sua foz, no município de Macaé, em áreas de diferentes relevos e ocupação do solo, sendo dividido em três partes: alto curso, médio curso e baixo curso. No baixo curso, o rio corre em áreas planas, sem grande variação do relevo sendo que grande parte desse trecho se encontra retificado (Freitas, 2015).

Entre os anos de 1969 e 1972 o baixo curso do Rio Macaé, marcado por um traçado sinuoso e com planícies de inundação, foi retificado numa obra do extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS). A ocupação da cidade de Macaé, que ocorreu principalmente sobre o estuário do rio, se intensificou logo após as obras de retificação, a partir de 1978. A retificação causou o aumento da velocidade das águas e intensificou o transporte de sedimentos, a erosão das margens e o assoreamento, contribuindo para o aumento na frequência e intensidade das enchentes na parte baixa da bacia. Como consequência, a cidade passou a enfrentar transtornos recorrentes, incluindo prejuízos materiais e, às vezes, perda de vidas humanas (Freitas, 2015).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo propor e aplicar uma metodologia de requalificação de rios retificados em áreas periurbanas, fundamentada na definição do Espaço Funcional Fluvial (EFF) como referência físico-territorial. A proposta busca olhar para a natureza, com a proposta de preservar e restaurar os rios e suas planícies de inundação, principalmente em áreas a montante das cidades (periurbanas), onde ainda há espaço disponível para tais mudanças.

METODOLOGIA

Embora interessante, a ideia de restaurar os meandros de um rio retificado leva a alguns questionamentos, principalmente em relação à escolha de uma imagem orientadora, preferencialmente anterior às intervenções humanas, que represente as ‘condições de referência’. Essa é uma dificuldade considerável e, nesse sentido, a delimitação de um espaço de mobilidade para o rio, para que ele próprio redefina seu traçado ao longo do tempo, pode ser considerada uma estratégia mais adequada, além de mais sustentável. Neste trabalho, o espaço de mobilidade será designado como Espaço Funcional Fluvial (EFF).

Para definir esse espaço, foram estabelecidos alguns critérios que consideram tanto as restrições físicas que limitam a mobilidade do rio quanto à susceptibilidade a inundações, pois ao identificar áreas potencialmente alagáveis, é possível associa-las a uma região de ‘ocupação natural’ do rio. Além disso, é fundamental mapear as diferentes posições do rio ao longo do tempo, como referência orientadora física, o que pode ser feito por meio de evidências geomorfológicas presentes

no terreno e por registros históricos (mapas, imagens aéreas), quando disponíveis. Os critérios utilizados para definir o espaço funcional fluvial estão apresentados na Figura 1.

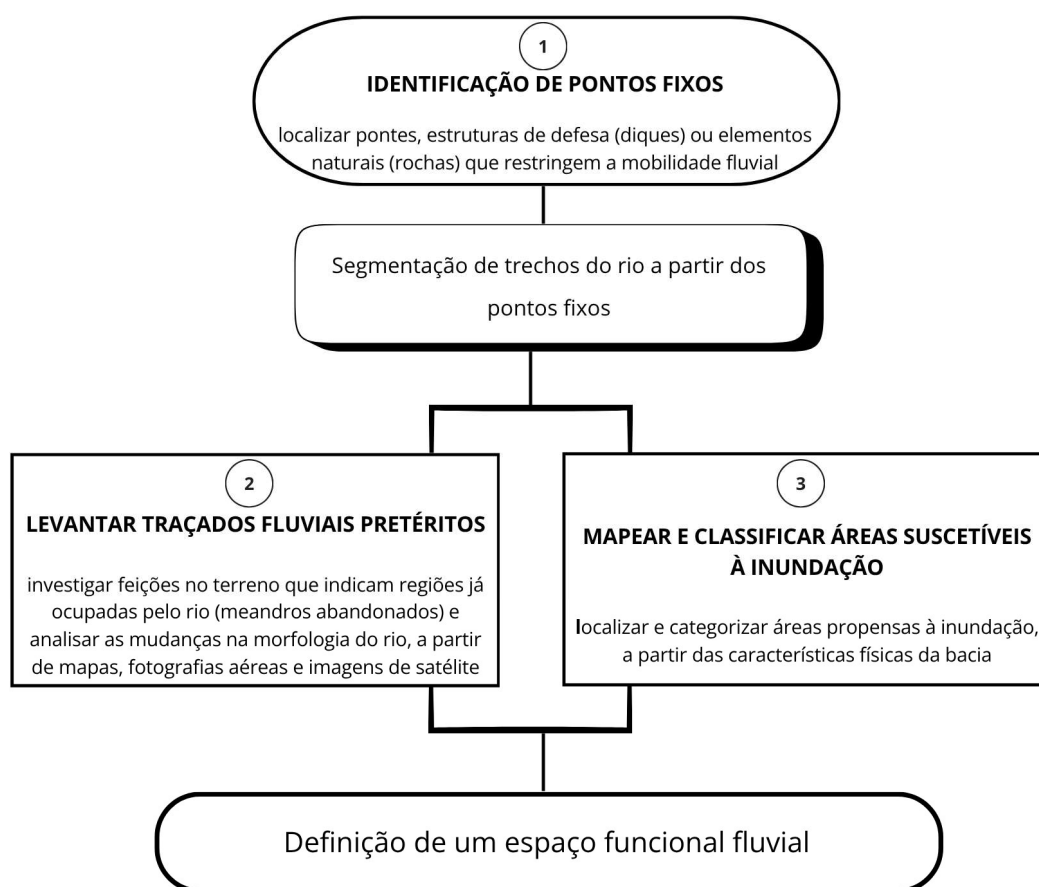


Figura 1 – Critérios adotados para delimitar um espaço funcional fluvial

O levantamento das informações relacionadas aos critérios (1), (2) e (3), é realizado com o uso de ferramentas de geoprocessamento, de imagens de satélite, de visitas de campo, além de registros históricos como mapas e fotografias aéreas.

Com base nas informações obtidas e na aplicação do ISFMI, delimita-se um espaço funcional fluvial, subdividido em segmentos de análise, definidos pelos pontos fixos identificados em (1). Para cada segmento, serão sobrepostas as informações relativas às marcas do terreno e antigos traçados do rio (2) com a susceptibilidade às inundações (3), permitindo, assim, a definição do envoltório correspondente ao espaço funcional fluvial.

Ferramentas de apoio

Para viabilizar a proposta de requalificação fluvial descrita no item anterior, faz-se necessário o uso de ferramentas, como o geoprocessamento, pelo software QGIS; uma análise multicritério para identificar áreas propensas a inundação, por meio do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI). Em sua dissertação de mestrado, Miranda (2016) desenvolveu uma ferramenta

que permite avaliar qualitativamente áreas propensas à inundação, levando em conta as características físicas do terreno. O ISFMI foi desenvolvido em um Sistema de Informação Geográfica (*Geographic Information System* – GIS), a partir de uma metodologia multicritério e que utiliza quadrículas georreferenciadas como unidade de estudo, considerando quatro indicadores: declividade para drenagem (I_{DEC}), impermeabilização do solo (I_{IMP}), proximidade do curso d'água (I_{PROX}) e cota altimétrica (I_{CA}) (em relação ao nível médio do mar). Os indicadores que compõem o ISFMI são normalizados, variando de 0 a 100, e sua formulação foi feita considerando um produtório, onde um dos termos consiste em um somatório, enquanto o outro termo utiliza o indicador de declividade, destacado dos demais, 'por ser um elemento fundamental para a formação de áreas alagadas' (Miranda, 2016).

A formulação proposta do ISFMI atribui pesos aos indicadores, conforme apresentado pela Equação (1).

$$ISFMI = I_{DEC}^{E1} \times (c1 \times I_{IMP} + c2 \times I_{PROX} + c3 \times I_{ECA})^{E2} \quad (1)$$

onde:

$E1$ = peso atribuído ao indicador de declividade;

$c1$ = peso atribuído ao indicador de impermeabilização;

$c2$ = peso atribuído ao indicador de cota altimétrica;

$c3$ = peso atribuído ao indicador de proximidade de curso d'água;

$E2$ = peso atribuído ao segundo termo do produtório, composto pelos somatórios ponderado aos indicadores de cota, impermeabilização e proximidade.

Obs.: [$E1 + E2 = 1$] e [$c1 + c2 + c3 = 1$]

As faixas consideradas para cada indicador que compõe o ISFMI foram retiradas do estudo mais recente de Miranda *et al.* (2023).

RESULTADOS

A determinação do espaço funcional fluvial tem como primeiro passo a identificação de pontos fixos que atuam como elementos restritivos, limitando a liberdade do rio e, consequentemente, dificultando sua conectividade com a planície de inundação. No trecho retificado do Rio Macaé, que se estende por cerca de 40 quilômetros até o seu deságue no oceano Atlântico, a análise concentrou-se na porção entre o início da retificação e o limite entre as áreas periurbana e urbana. Nesse intervalo, foram identificadas três pontes principais, sem outros pontos fixos, como afloramentos rochosos ou estruturas de contenção. Assim, para o mapeamento de um espaço funcional fluvial nesta seção do Rio Macaé, o trecho foi subdividido em três segmentos de análise, dispostos no sentido montante-jusante. Em cada um dos segmentos em análise, foi feita a identificação das marcas pretéritas do rio

no terreno, onde as imagens de satélite da ESRI e do Google foram utilizadas como mapas base no software QGIS, para identificar feições fluviais visíveis no terreno, como meandros abandonados, lagoas em ferradura, etc. A Figura 2 apresenta as marcas encontradas no terreno, de antigas posições do rio, em um envelope que cobre tais elementos onde é possível observar, com tais informações, que o Rio Macaé já se deslocou por distâncias de até 1,5 km de seu curso original, conforme apresentaram Assumpção e Marçal (2012). Embora muitas feições do terreno ainda estejam visíveis ao longo dos trechos retificados, algumas áreas apresentaram menos vestígios devido às práticas agrícolas que causaram intervenções no solo e encobriram tais marcas.



Figura 2– Mapa da Bacia do Rio Macaé com destaque para o trecho retificado do rio. Os pontos fixos (retângulos brancos) correspondem às imagens: (1) Ponte do Baião (em construção); (2) vestígios da antiga Ponte das Neves que desabou; (3) Ponte das Neves; e (4) ponte sobre a Rodovia BR-101. As feições identificadas no terreno (em amarelo), delimitadas por um envelope azul, estão indicadas no mapa, assim como os traçados atual e anterior à retificação do Rio Macaé.

A aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISFMI) na Bacia do Rio Macaé permitiu identificar e classificar áreas que, por suas características físicas estão mais propensas a inundações, conforme já trazido pelos trabalhos de Miranda (2016) e Miranda *et al.* (2023). Ao utilizar o ISFMI como uma das ferramentas para definir o espaço funcional do rio,

considera-se que as regiões com maior frequência de inundação coincidem com uma faixa de mobilidade do rio, ou seja, onde ele terá liberdade para ocupar durante períodos de cheia.

O ISFMI é calculado a partir da Equação (1) e composto por quatro indicadores: declividade, impermeabilização, proximidade do rio e cota altimétrica. A partir da Equação (1), o ISFMI foi calculado para a bacia do Rio Macaé após serem testados diferentes pesos atribuídos aos indicadores e, também, ao segundo termo do produtório. Isso foi feito para que o índice representasse melhor a região de estudo, tendo como resultado a seguinte equação:

$$ISFMI = I_{DEC}^{0.50} \times (0.2 \times I_{IMP} + 0.4 \times I_{PROX} + 0.4 \times I_{ECA})^{0.50} \quad (2)$$

Dessa forma, com a aplicação da Equação (2), os resultados do ISFMI indicam uma susceptibilidade à inundação de alta a muito alta em áreas próximas ao Rio Macaé, suas planícies de inundação e seus afluentes (Figura 3). Observa-se, ainda, que as regiões com susceptibilidade muito alta concentram-se majoritariamente na região urbana, próximo à foz do rio, o que agrava a situação local, especialmente devido à baixa altitude em relação ao nível médio do mar e ao elevado grau de impermeabilização.

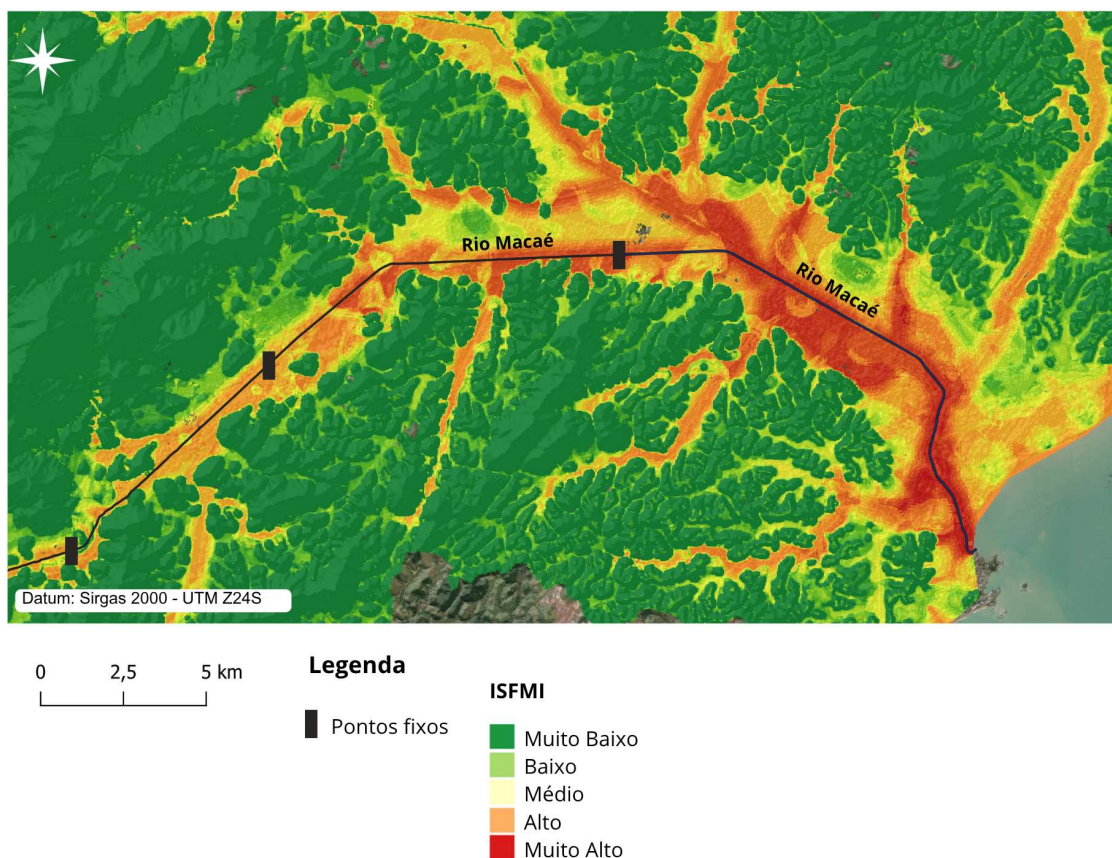


Figura 3 - Resultado da aplicação do ISFMI na Bacia do Rio Macaé, com foco no trecho retificado do rio.

A área de estudo foi dividida em três segmentos com base nos pontos fixos. A partir disso, o envelope das regiões com valores de ISFMI de alto a muito alto foi sobreposto a outro envelope, que

representa as marcas no terreno, previamente ilustrado na Figura 1, o que resulta na Figura 4. A região situada entre o curso atual do Rio Macaé e seu traçado anterior à retificação foi incorporada ao envelope azul, de marcas históricas no terreno, visando à delimitação do espaço fluvial funcional, com exceção das áreas ocupadas por morros e encostas, as quais não são consideradas como parte desse espaço.

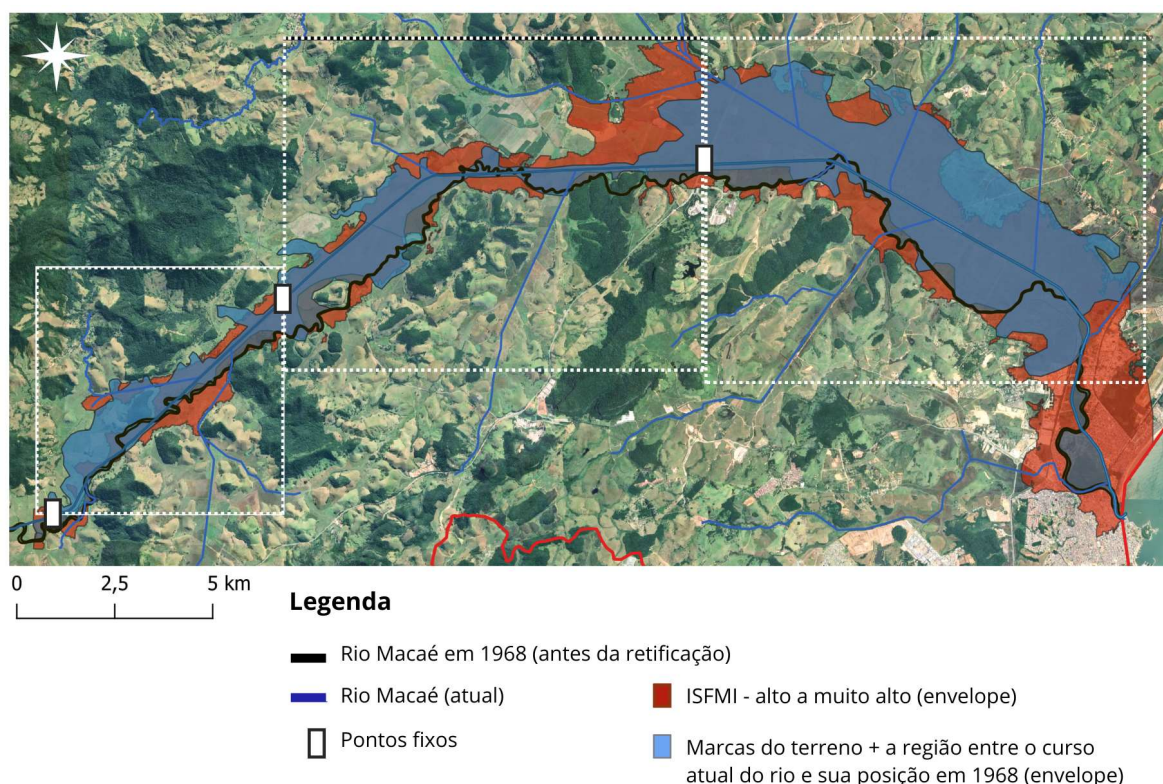


Figura 4 - Os três segmentos de análise, divididos a partir dos pontos fixos e a fronteira entre as zonas periurbana e urbana, com informações utilizadas para delinear o espaço fluvial funcional: o envelope azul (marcos do terreno + a região entre o curso do Rio Macaé antes e depois de sua retificação) e o envelope vermelho (áreas com valores de ISFMI de alto a muito alto).

As marcas no terreno, assim como a alta susceptibilidade a inundações se estendem por distâncias consideráveis para além das áreas adjacentes do traçado atual do Rio Macaé, pois o rio se deslocou significativamente ao longo do tempo na planície aluvial a qual pertence. Assim, a combinação de todas as informações somadas - marcas no terreno + a distância entre os traçados antigo e atual do Rio Macaé + ISFMI - resulta numa perspectiva abrangente, em um envelope maior, definido como um limite de referência superior do espaço funcional fluvial. Por outro lado, a sobreposição das marcas do terreno com as áreas susceptíveis à inundação (muito alta e alta, obtidas pelo ISFMI) identifica uma região de interseção, mais restrita, podendo representar a extensão espacial mínima para manter a funcionalidade do rio em seu processo de requalificação, denominado de limite de referência inferior do espaço funcional fluvial (Figura 5).

Uma vez definidos, esses limites de referência (inferior ou superior) do EFF devem ser preferencialmente preservados, sendo idealmente designados como áreas protegidas (principalmente o EFF mínimo), onde a dinâmica fluvial e a conectividade transversal sejam recuperadas, a qualidade ambiental seja aprimorada e o risco de inundação reduzido.

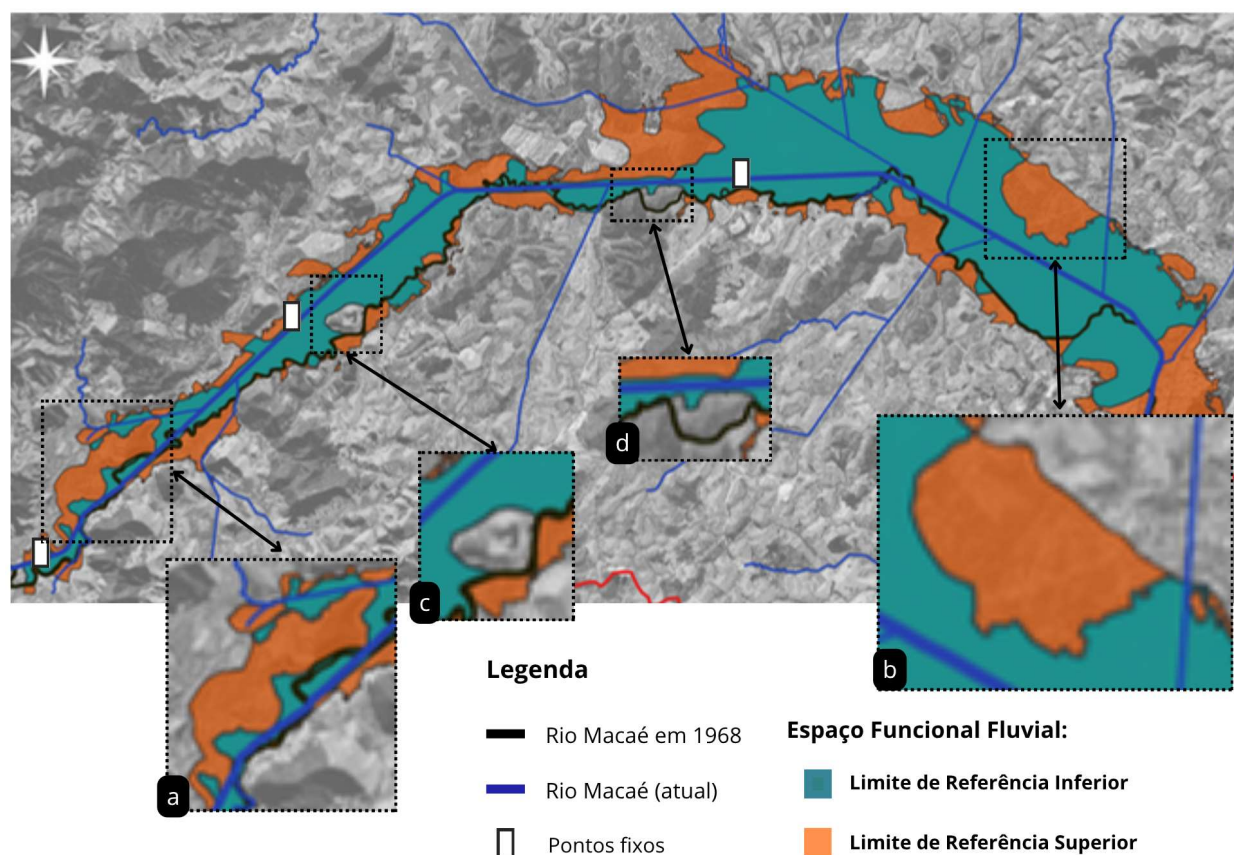


Figura 5 - O espaço funcional fluvial no Rio Macaé, definido por um envelope do limite de referência inferior (verde água) com base em informações sobrepostas (marcas do terreno + posições anteriores do rio + ISFMI) e um envelope do limite de referência superior (laranja), abrangendo todas as informações, em detalhe nas regiões (a) e (b). Algumas áreas foram excluídas do espaço funcional fluvial devido à presença de morros e encostas, como mostrado em (c) e (d).

CONCLUSÕES

A requalificação fluvial busca o restabelecimento das características naturais dos sistemas fluviais, pois essas implicam em melhoria da qualidade da água, na recuperação geomorfológica e na redução do risco hidráulico. A partir desse conceito, é possível afirmar que o restabelecimento das curvas de um rio naturalmente meandrante e o favorecimento de extravasamentos para as planícies de inundação são uma solução sustentável e resiliente e que se caracteriza como uma estratégia de requalificação.

A metodologia desenvolvida para definição do EFF considera aproximações para os processos complexos que ocorrem nos sistemas fluviais, representando uma alternativa baseada nos aspectos

físicos da bacia, com sentido hidrogeomorfológico, e que pode ser utilizada em outras bacias hidrográficas. Ao considerar uma proposta de requalificação de rios retificados e que se encontram muito encaixados em sua calha, como o utilizado no caso desse estudo, é provável que apenas a delimitação de um EFF não seja suficiente para estabelecer uma reconexão do rio com a planície. Nestes casos, são propostas intervenções complementares, como o rebaixamento das áreas marginais ou a instalação de soleiras, ambas simuladas com o suporte de um modelo matemático representativo da bacia.

REFERÊNCIAS

- ASSUMPÇÃO, A.P.; MARÇAL, M.S. (2012) "*Retificação Dos Canais Fluviais E Mudanças Geomorfológicas Na Planície Do Rio Macaé (RJ)*", Revista de Geografia (Recife), v. 29, n. 3, p. 18–36.
- FREITAS, L.E.; NUNES, F.S.B.; CRUZ, J.C.H.O.; VILELA, C.; MENDES, S. SILVA, A.C.; BORGES, G. (2015). *Atlas Ambiental Da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé*.
- KOUSKY, C.; WALLS, M. (2014) "*Floodplain conservation as a flood mitigation strategy: Examining costs and benefits*", Ecological Economics, v. 104, p. 119–128.
- LAWSON, C.; ROTHERO, E.; GOWING, D.; NISBET, T; BARSOUM, N.; BROADMEADOW, S.; SKINNER, A. (2018) "*The natural capital of floodplains: management, protection and restoration to deliver greater benefits*". Valuing Nature Natural Capital Synthesis Report VNP09. [S.l: s.n.].
- MIRANDA, F.,; FRANCO, A.B.; REZENDE, O.; COSTA, B.B.F; NAJJAR, M.; HADDAD, A.N.; MIGUEZ, M. (2023) "*A GIS-Based Index of Physical Susceptibility to Flooding as a Tool for Flood Risk Management*", Land, v. 12, n. 7, p. 1–22.
- MIRANDA, F.M. (2016) Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações como Ferramenta para o Planejamento Urbano. Dissertação de MSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, UFRJ.
- STÜRCK, J.; POORTINGA, A.; VERBURG, P.H. (2014) "*Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe*". Ecological Indicators, 38, 198–211.
- VINDIGNI, G.; MOSCA, A.; BARTOLONI, T.; SPINA, D. (2021) "*Shedding light on peri-urban ecosystem services using automated content analysis*", Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 16.
- WALSH, C.J.; ROY, A.H.; FEMINELLA, J.W.; COTTINGHAM, P.D.; MORGAN, R.P. (2005) "*The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure*", Journal of the North American Benthological Society, v. 24, n. 3, p. 706–723.
- ZHOU, K.; KONG, F.; YIN, H.; DESTOUNI, G.; MEADOWS, M.E.; ANDERSSON, E.; CHEN, L.; CHEN, B.; LIM Z.; SU, J. (2024) "*Urban flood risk management needs nature-based solutions: a coupled social-ecological system perspective*". npj Urban Sustainability, 4, 25.