

ENSAIO

Soluções Baseadas na Natureza para a revitalização de corpos hídricos urbanos canalizados: Ribeirão Arrudas, Brasil

Nature-Based Solutions for the revitalization of channeled urban water bodies: Ribeirão Arrudas, Brazil

Ana Lorena Demarques Moura¹, Talita Silvia de Souza², Maria Manoela Gimmmler Netto³, Staël de Alvarenga Perreira Costa⁴, Maria Rita Scotti Muzzi⁵

Resumo

A degradação de corpos hídricos urbanos exige soluções integradas e sustentáveis que restabeleçam funções ecológicas e promovam serviços ecossistêmicos. Em Belo Horizonte, a intensa urbanização transformou o Ribeirão Arrudas em um canal impermeabilizado, sujeito a recorrentes inundações. Este estudo propõe Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para revitalização do Arrudas, articulando infraestrutura verde e azul e reintegrando o rio à paisagem urbana. As intervenções incluem a descanalização parcial, a redução da impermeabilização nas áreas ripárias e o plantio de espécies arbóreas adaptadas, visando ampliar a drenagem, estabilizar margens e recuperar habitats. A metodologia compreende revisão bibliográfica, estudos de caso e modelagem hidrológica, com foco na criação e avaliação de cenários para análise de impactos socioambientais. Os principais objetivos são restaurar o ecossistema fluvial, mitigar inundações, melhorar a qualidade da água, aumentar a biodiversidade e promover espaços públicos sustentáveis. A pesquisa apresenta propostas de SbN para trechos prioritários da bacia sujeitos a risco de inundação.

Palavras-chave: Soluções Baseadas na Natureza (SbN), infraestrutura verde e azul, serviços ecossistêmicos, revitalização de corpos hídricos, mitigação de inundações, Ribeirão Arrudas

Abstract

The degradation of urban water bodies requires integrated and sustainable solutions that restore ecological functions and ecosystem services. In Belo Horizonte, intense urbanization has transformed the Ribeirão Arrudas into an impermeable channel, leading to severe flooding throughout its basin. This study proposes Nature-Based Solutions (NBS) for the revitalization of Ribeirão Arrudas, integrating green and blue infrastructure and reintegrating the river into the urban landscape. The proposed interventions include partial dechannelization, reducing impermeability in riparian areas through the planting of specific tree vegetation capable of enhancing drainage and ensuring bank stabilization. Additionally, the implementation of artificial wetlands and evapotranspiration technologies (TEvap) is suggested in areas with inadequate sanitation infrastructure, aiming to treat sewage that is discharged directly into the river or its tributaries and improve water quality. The methodology is based on a literature review, case studies, and hydrological modeling to assess environmental and social impacts. The main objectives are to restore the ecosystem, mitigate floods, enhance biodiversity, improve sanitation, and create sustainable public spaces. The research presents an NBS proposal for sections of the basin identified as flood-risk areas.

Keywords: Nature-Based Solutions (NbS), blue-green infrastructure, flood mitigation, sanitation and water quality, Ribeirão Arrudas

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, [anademarques\[at\]gmail.com](mailto:anademarques[at]gmail.com)

² Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, [talitass\[at\]ufmg.br](mailto:talitass[at]ufmg.br)

³ Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, [manoelagnetto\[at\]gmail.com](mailto:manoelagnetto[at]gmail.com)

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, [sapc\[at\]ufmg.br](mailto:sapc[at]ufmg.br)

⁵ Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, [mritascottimuzzi\[at\]gmail.com](mailto:mritascottimuzzi[at]gmail.com)

1. Introdução

A urbanização acelerada tem degradado os corpos hídricos urbanos, comprometendo funções ecológicas e ampliando a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, cuja frequência e intensidade vêm aumentando em razão das mudanças climáticas induzidas pelas atividades humanas (IPCC, 2022). Esse panorama global se reflete na dinâmica do Ribeirão Arrudas, em Belo Horizonte, Brasil, cuja história evidencia os impactos das intervenções antrópicas sobre os sistemas naturais.

Embora a escolha de Curral del Rey como capital tenha sido motivada pela extensa rede hídrica local, com inúmeros cursos d'água e nascentes (Minas Gerais, 1893, p. 110; Barreto, 1936, p. 162), o projeto de Aarão Reis¹ negligenciou esses cursos d'água no planejamento urbano, permitindo a ocupação de várzeas e a descaracterização precoce das margens (Borsagli, 2019). Nas décadas seguintes, a expansão urbana de Belo Horizonte foi marcada por sucessivas obras de engenharia, como retificação, canalização e dragagem dos cursos d'água, que confinaram o Ribeirão Arrudas em estruturas rígidas, alteraram seu comportamento hidrológico e intensificaram a recorrência de inundações (Borsagli, 2019; Reis, 2011). A partir da década de 1960, esses processos se intensificaram ainda mais, com a ampliação da canalização e retificação da rede hídrica e o aumento da impermeabilização do solo, consolidando o cenário atual de grandes enchentes (Figura 1).

Figura 1. Planta topográfica da Cidade de Minas Belo Horizonte (1895) com a retificação dos cursos d'água para o traçado ortogonal

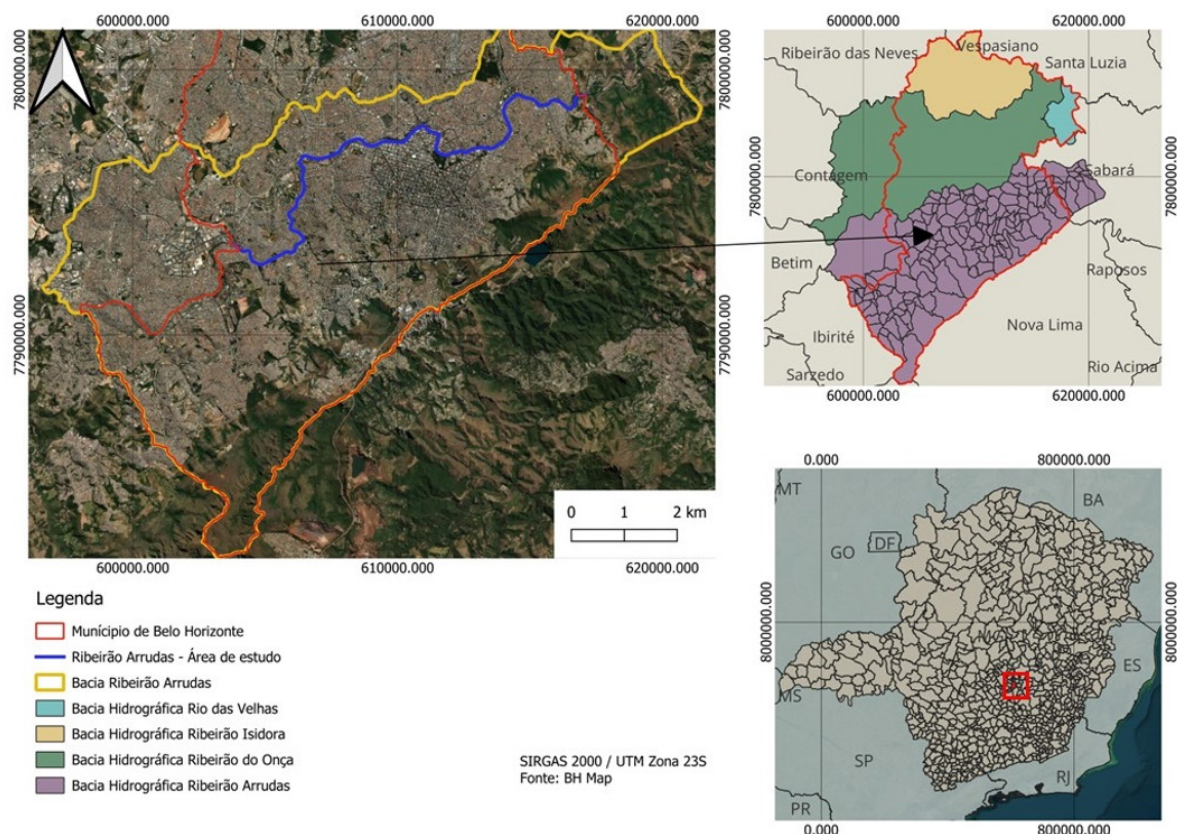


Fonte: Arquivo Público Mineiro (1895).

¹ Aarão Reis foi engenheiro civil e urbanista brasileiro, responsável pela coordenação da Comissão Construtora da Nova Capital de Minas Gerais no final do século XIX, liderando o planejamento e a implantação da então nova capital, Belo Horizonte. Seu trabalho incorporou princípios de racionalidade geométrica, higiene urbana e ordenamento territorial, alinhados ao ideário do urbanismo moderno e às concepções sanitaristas vigentes à época (FJP, 1997).

O Ribeirão Arrudas tem suas nascentes no município de Contagem, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, e percorre os municípios de Belo Horizonte e Sabará, onde deságua no Rio das Velhas. Sua bacia hidrográfica está inserida em dois contextos geológicos distintos: o embasamento cristalino do Cráton do São Francisco e os metassedimentos do Supergrupo Minas, estes últimos predominantes na porção sul do município de Belo Horizonte (Reis, 2011). Inserido na Bacia do Rio das Velhas, sub-bacia integrante da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, o Ribeirão Arrudas apresenta proximidade espacial e interações territoriais com as bacias dos rios Onça e Isidoro, ambos também afluentes do Rio das Velhas (Figura 2).

Figura 2. Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas



Fonte: BH Maps modificado pelos autores (2025).

Em 2025, os prejuízos causados pelas inundações no centro urbano demonstram que a abordagem tradicional de engenharia, baseada na canalização rígida dos cursos d'água, não tem sido eficaz. A experiência de Belo Horizonte com o Ribeirão Arrudas evidencia a necessidade de repensar a gestão hídrica urbana, buscando alternativas mais sustentáveis, como as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), capazes de aumentar a resiliência diante do crescimento urbano desordenado e dos impactos das mudanças climáticas (Tucci, 2007).

As SbN incluem medidas como a renaturalização dos cursos d'água, a restauração da vegetação ripária, a criação de parques alagáveis, jardins de chuva e sistemas de infiltração urbana. Além disso, envolvem estratégias integradas de prevenção, planejamento territorial e zoneamento adequado; monitoramento por meio de sistemas de alerta e modelagem hidrológica; e ações de convivência com riscos naturais, incluindo educação ambiental, participação comunitária e políticas públicas voltadas à redução da vulnerabilidade das populações mais expostas.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo principal desenvolver e avaliar propostas de SbN para a revitalização do Ribeirão Arrudas, promovendo sua reintegração à paisagem urbana e a ampliação de seus serviços ecossistêmicos. Para isso, serão exploradas estratégias como a renaturalização parcial do curso d'água, a restauração da vegetação ripária para a melhoria da

qualidade da água e a mitigação de inundações. Além de propor e avaliar diferentes cenários paisagísticos e ambientais a partir dessas intervenções na paisagem fluvial, o estudo visa integrar abordagens sustentáveis de drenagem e saneamento à gestão da bacia hidrográfica, fortalecendo a resiliência climática e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população.

2. Metodologia

O presente estudo iniciou-se por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada sobre as SbN, infraestrutura verde e azul, bem como sobre a revitalização de rios urbanos. Paralelamente, foram analisados estudos de caso referentes a processos de reversão da canalização, ou seja, renaturalização em contextos análogos, com o objetivo de enquadrar a seleção das intervenções propostas. Posteriormente, realizou-se o mapeamento e a modelagem hidrológica visando a simulação dos impactos ambientais e sociais das intervenções planejadas. A definição dos critérios para a seleção das estratégias levou em consideração aspectos físicos, urbanísticos e ambientais característicos da bacia hidrográfica do Ribeirão Arrudas.

A modelagem hidráulica foi desenvolvida através do software *HEC-RAS*², escolhido pela sua capacidade reconhecida de simular fluxos em canais naturais e artificiais. Este procedimento possibilitou a criação de cenários distintos para a avaliação do comportamento hidrológico do Ribeirão Arrudas frente às intervenções propostas.

Para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE), indispensável às simulações, foram utilizadas as curvas de nível fornecidas pela Prodabel/Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), garantindo a precisão topográfica da área de estudo. Com base no MDE, foram extraídas as seções transversais inseridas no modelo hidráulico.

Foram simulados três cenários distintos para avaliar os impactos das intervenções SbN no comportamento hidrológico da bacia: o Cenário A, que considera a permeabilização total do canal e das margens, promovendo máxima infiltração e redução da velocidade do escoamento; o Cenário B, no qual o canal permanece impermeabilizado enquanto as margens são permeáveis, resultando em escoamento acelerado e maior risco de transbordamento; e o Cenário C, que contempla a ampliação da planície de inundação por meio da implementação de áreas vegetadas, favorecendo a retenção hídrica e a mitigação dos picos de vazão.

A análise dos resultados baseou-se na avaliação da extensão das áreas inundadas e das cotas dos níveis d'água obtidas em cada cenário. Esta abordagem permitiu comparar a eficácia das diferentes estratégias de intervenção propostas para a recuperação ambiental e a mitigação dos impactos hidrológicos no Ribeirão Arrudas.

3. Referencial teórico

3.1 Serviços ecossistêmicos

A primeira menção à expressão “serviços ecossistêmicos” ocorreu em 1981, na obra *As Causas e Consequências do Desaparecimento de Espécies*, de Paul e Anne Ehrlich. Embora os autores não tenham apresentado uma definição explícita, evocaram a noção dos benefícios proporcionados pelos ecossistemas, alinhando-se a uma ideia que já vinha sendo tratada, de forma difusa, na literatura científica da época (Potschin et al., 2016).

De forma mais elaborada, os serviços ecossistêmicos podem ser compreendidos como os benefícios gerados a partir das interações dinâmicas entre os componentes bióticos e abióticos dos ecossistemas, cuja estrutura, produtividade, diversidade e padrões de fluxo de nutrientes emergem

² O *HEC-RAS* (Hydrologic Modeling System) é um software desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do U.S. Army Corps of Engineers, projetado para simular os processos de precipitação-escoamento em bacias hidrográficas dendríticas. Utilizado amplamente em estudos hidrológicos, o *HEC-RAS* permite a modelagem de eventos de chuva, estimativa de escoamento superficial e análise de cheias, sendo aplicável tanto em áreas urbanas quanto rurais. Sua versatilidade e precisão têm sido destacadas em diversas pesquisas científicas, consolidando-o como uma ferramenta essencial na gestão de recursos hídricos e no planejamento ambiental (U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

como propriedades sistêmicas. Esses serviços decorrem de processos ecológicos complexos, frequentemente mediados por mecanismos de retroalimentação, tanto positivos quanto negativos, que mantêm um equilíbrio dinâmico e evolutivo no funcionamento dos ecossistemas (Levin, 1988).

No ambiente urbano, essa compreensão torna-se ainda mais desafiadora. Ahern (2007) destaca a dificuldade de captar a complexidade e diversidade das paisagens e funções urbanas, devido à natureza específica dos processos ecológicos envolvidos. Nesse contexto, a Sociedade Ecológica da América define as funções ecológicas como responsáveis pela prestação de serviços como regulação do clima, manutenção do ciclo de nutrientes, controle de pragas, purificação do ar e da água, entre outros (Bainbridge, 2006). Tais funções adquirem valor quando associadas diretamente ao bem-estar humano, físico e econômico. Hueting et al. (1998) reforçam essa ideia ao afirmar que uma função ecológica passa a ser considerada um serviço ecossistêmico quando apresenta potencial de uso humano.

Compreender essa complexidade é essencial para o planejamento urbano. As cidades são sistemas compostos por elementos inter-relacionados, nos quais alterações pontuais podem gerar efeitos amplos em todo o tecido urbano. Por isso, é fundamental identificar os elementos mais significativos e entender as relações causais entre eles, de modo a prever os impactos de diferentes políticas urbanas (Crowther, e Echenique, 1975). Para tanto, são utilizados modelos que representam, de forma simplificada e inteligível, características relevantes da realidade observada.

Nesse contexto, a cidade pode ser compreendida como um mecanismo físico e social voltado à aquisição e distribuição de serviços ecossistêmicos para uma população concentrada (Lee, 2006). Entre os elementos urbanos, as árvores se destacam como componentes-chave do ecossistema e da paisagem urbana. Sua importância vai além do porte ou da conexão emocional que despertam nas pessoas elas atuam como verdadeiros engenheiros ambientais, provendo serviços essenciais para a população urbana, humana ou não (Samson, 2017).

Em síntese, os serviços ecossistêmicos representam benefícios fundamentais fornecidos pelos ecossistemas à sociedade, resultantes de interações ecológicas complexas. Reconhecer sua importância no meio urbano é indispensável para a construção de cidades mais sustentáveis, resilientes e saudáveis. Nesse cenário, a arborização urbana cumpre papel estratégico, contribuindo não apenas com aspectos estéticos e afetivos, mas principalmente com a regulação térmica, purificação do ar e da água, suporte à biodiversidade e promoção do bem-estar humano. Integrar esses serviços ao planejamento urbano é um passo decisivo para garantir a qualidade de vida nas cidades contemporâneas e reforçar o papel das árvores como pilares da infraestrutura ecológica urbana.

3.2 Conceito e importância das Soluções Baseadas na Natureza (SbN)

Nos últimos anos, os conceitos de desenvolvimento sustentável têm ganhado destaque, especialmente devido aos impactos das atividades humanas na natureza e às mudanças climáticas extremas. Diante desse cenário, diversos países buscam enfrentar desafios relacionados à sustentabilidade dos recursos hídricos e energéticos, visando promover a reconexão entre o ambiente urbano e a natureza. Nesse contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) têm se consolidado como estratégias eficazes, proporcionando benefícios sociais, econômicos e ambientais. Essas soluções contribuem para o aumento da resiliência e sustentabilidade das cidades, por meio da restauração de ecossistemas urbanos e da implementação de intervenções locais (Qi et al., 2020).

De acordo com a Comissão Europeia (CE), as Soluções baseadas na Natureza (SbN) têm como principais metas promover uma urbanização sustentável, restaurar ecossistemas degradados, enfrentar e mitigar os impactos das mudanças climáticas, além de fortalecer a resiliência e aprimorar a gestão de riscos (Qi et al., 2020). É importante entender o papel das SbN na adoção da gestão ambiental principalmente garantindo os recursos e processos mantendo o ciclo da água urbana e melhorando a qualidade e garantindo o gerenciamento de riscos de inundação.

Além da mitigação de enchentes, as SbN contribuem para a biodiversidade, a criação de empregos e a melhoria do bem-estar humano. Estudos como o de Eckart et al. (2017) demonstram a eficácia dessas abordagens, destacando a importância de expandir sua implementação para enfrentar os

desafios impostos pelas mudanças climáticas. Segundo Vojinovic (2020) estes estudos demonstram que as SbN podem ser aplicadas em duas escalas. As SbN de pequena escala são voltadas para áreas urbanas e incluem soluções como telhados verdes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva e sistemas de retenção de água, beneficiando diretamente o manejo de águas pluviais e a regeneração de espaços urbanos. Sendo assim, as SbN de grande escala são implementadas em áreas rurais, costeiras e bacias hidrográficas, abrangendo medidas como zonas úmidas, planícies de inundação, manguezais e recifes de coral (Vojinovic, 2020).

Os desastres naturais nas cidades relacionados a fenômenos hidro meteorológicos, como inundações, tempestades e furacões, estão aumentando em frequência e intensidade devido às mudanças climáticas e à elevação do nível do mar (Guha-Sapir et al., 2016). Diante desse cenário, a adaptação climática se torna essencial, e as SbN emergem como uma abordagem promissora para a gestão de inundações, proporcionando benefícios adicionais ao meio ambiente e à sociedade. O conceito de SbN surgiu em 2008 e abrange diversas estratégias relacionadas à redução de riscos hidro meteorológicos (Ruangpan et al., 2020), incluindo desenvolvimentos de baixo impacto, infraestrutura verde, sistemas de drenagem sustentável e infraestrutura azul-verde, entre outras.

3.3 Infraestrutura verde e azul como estratégia de adaptação climática e gestão hídrica

A infraestrutura verde nas cidades é essencial para a provisão de serviços ecossistêmicos, desempenhando um papel fundamental na regulação térmica urbana e na gestão hídrica. A vegetação contribui para o resfriamento das cidades por meio da evapotranspiração e do sombreamento, reduzindo a temperatura do ar e melhorando o conforto térmico em ambientes densamente urbanizados. No entanto, a eficácia desse resfriamento depende não apenas da quantidade de cobertura vegetal, mas também do tamanho e da distribuição dos fragmentos de vegetação. Estudos indicam que manchas maiores de vegetação têm um efeito mais significativo no resfriamento urbano (Gioia et al., 2014), enquanto a cobertura arbórea pode oferecer benefícios diretos ao reduzir a exposição à radiação solar e proporcionar sombra em espaços urbanos (Jiao et al., 2017). Por outro lado, a fragmentação dessas áreas pode comprometer sua eficácia, tornando fundamental um planejamento urbano que maximize sua influência positiva.

No contexto da gestão hídrica, as árvores desempenham um papel essencial na regulação do ciclo hidrológico, criando um sistema de evapotranspiração que melhora a retenção da água no solo e reduz o escoamento superficial. Esse equilíbrio, no entanto, depende da presença contínua de vegetação, que influencia a dinâmica hídrica urbana ao manter diferenças de potencial hídrico no solo. Dessa forma, é essencial preservar e expandir a cobertura vegetal nas cidades para promover uma gestão hídrica mais eficiente e sustentável.

A infraestrutura azul complementa a infraestrutura verde ao fornecer soluções naturais para a gestão da água, promovendo serviços ecossistêmicos como a regulação do escoamento pluvial, a prevenção de enchentes e a melhoria da qualidade da água. Segundo Livesley, McPherson e Calfapietra (2016), a integração de florestas urbanas e espaços verdes à infraestrutura azul contribui para a conservação de energia, o sequestro de carbono e a redução da poluição do ar, solo e água. Essa estratégia também mitiga os impactos da urbanização sobre a hidrologia, ao controlar o escoamento superficial e favorecer o equilíbrio do balanço hídrico. Além dos ganhos ambientais, promove benefícios sociais ao reduzir a ilha de calor urbana e aumentar o bem-estar e a qualidade de vida da população.

3.4 Casos de revitalização de rios urbanos canalizados

Ao longo da história, a relação entre rios e cidades tem sido marcada por uma interação complexa, uma vez que os cursos d'água sempre desempenharam papel fundamental na formação e no desenvolvimento dos assentamentos urbanos, fornecendo recursos essenciais como água,

energia e transporte (Almeida e Carvalho, 2010). Desde as civilizações hidráulicas³, os rios foram progressivamente modificados para atender às necessidades de abastecimento e produção, processo intensificado com a urbanização e a Revolução Industrial, que consolidaram intervenções estruturais como retificação e canalização dos leitos. Segundo Tucci (2003), esse modelo alterou significativamente os processos hidrológicos naturais, aumentando a velocidade do escoamento superficial e os picos de cheia, além de potencializar eventos de inundação em áreas urbanas. Associados à expansão urbana acelerada e, muitas vezes, desordenada, esses processos resultaram em impactos ambientais, sociais e econômicos relevantes, como a degradação da qualidade da água, a supressão de ecossistemas ripários e o aumento da vulnerabilidade urbana frente a eventos hidrológicos extremos. No século XX, a gestão dos rios urbanos passou a incorporar estratégias integradas para controle de inundações e mitigação de impactos ambientais. Projetos de recuperação e restauração foram implementados para reduzir os danos causados pela canalização e ocupação desordenada. Com o passar do tempo, novas abordagens sustentáveis foram desenvolvidas, visando devolver aos rios suas características naturais. Esses projetos incluem o uso de revestimentos naturais e híbridos nos canais, promovendo maior harmonia entre o espaço urbano e os ecossistemas fluviais. A adoção dessas práticas reflete uma mudança de paradigma no planejamento urbano, priorizando a revitalização dos cursos d'água como parte fundamental da adaptação climática e da melhoria da qualidade de vida nas cidades.

Um exemplo notável dessa abordagem sustentável é o canal Cheonggyecheon, em Seul, Coreia do Sul. Inicialmente, o córrego foi coberto por uma via expressa na década de 1970 para resolver problemas de mobilidade urbana (Lima, 2018). No entanto, a reabertura e revitalização do rio trouxeram diversos benefícios, como a melhoria da mobilidade para pedestres, a implantação de vegetação ao longo do canal e a redução do efeito ilha de calor. Além disso, o projeto promoveu o desenvolvimento urbano integrado ao meio ambiente, restaurando o curso natural do rio e proporcionando maior qualidade de vida para os moradores (Lima, 2018). Esse exemplo demonstra a importância da revitalização dos rios urbanos como estratégia para cidades mais resilientes e sustentáveis.

Figura 3. Rio Cheonggyecheon revitalizado em Seul



Fonte: Lima (2018).

³ Civilizações hidráulicas são aquelas que se desenvolveram em torno de grandes rios e que estruturaram sua organização econômica, social e política com base no manejo das águas para agricultura, abastecimento e controle de enchentes. Essas sociedades criaram sofisticados sistemas de irrigação, reservatórios e canais, sendo historicamente localizadas em regiões onde o controle da água era essencial à sobrevivência e ao desenvolvimento urbano (Wittfogel, 1957).

Outro exemplo de intervenção é o caso do Rio Medellín, localizado na cidade de Medellín, na Colômbia, que sofreu ao longo do século XX com processos intensos de degradação ambiental, resultantes da urbanização acelerada, descarte inadequado de efluentes e ocupação desordenada de suas margens (Londoño, 2018). Em resposta a esses desafios, foram implementadas diversas intervenções para sua recuperação, com foco na revitalização ecológica, gestão hídrica e integração urbana. Segundo Londoño (2018), as principais ações incluíram a construção de estações de tratamento de esgoto, a requalificação das margens com a construção de um parque linear e a implantação do sistema de mobilidade integrado ao rio (Figura 4). Como resultado, observou-se uma melhoria significativa na qualidade da água, redução dos riscos de enchentes e aumento da acessibilidade aos espaços públicos adjacentes ao rio. A experiência de Medellín serve como referência para outras cidades que buscam soluções baseadas na natureza para a gestão e revitalização de rios urbanos, demonstrando a importância da integração entre infraestrutura urbana e ecossistêmica na promoção da sustentabilidade e qualidade de vida (Londoño, 2018).

Figura 4. Revitalização do Rio Medellín: áreas verdes, espaço urbano e o sistema viário



Fonte: Bienal Internacional da Paisatge Barcelona (2019).

Por fim, outro exemplo contemporâneo é o projeto desenvolvido no *Bishan Ang Mo Kio Park*, em Singapura, que promoveu a expansão do rio *Kallang* e a transformação de um canal de drenagem em concreto em um rio naturalizado inserido em um parque urbano linear (Figura 5). A intervenção substituiu a canalização rígida por um leito sinuoso com margens estabilizadas por técnicas de bioengenharia, ampliando a seção hidráulica e permitindo o extravasamento controlado durante eventos extremos de chuva. Associada à criação de áreas alagáveis, recomposição vegetal e qualificação dos espaços públicos, a descanalização integrou funções hidráulicas, ecológicas e sociais, convertendo uma infraestrutura cinza em um sistema de infraestrutura verde-azul

multifuncional, direcionado para a adaptação às mudanças climáticas e à reconexão da população com o curso d'água (C40 Cities, 2018).

Figura 5. Intervenção de bioengenharia no rio Kallang na área do parque Bishan Ang Mo Kio, em Singapura, evidenciando o processo de descanalização e a integração entre drenagem urbana, paisagem e espaço público



Fonte: C40 Cities (2018).

4. Caracterização da área de estudo

A população de Belo Horizonte em 2022 foi estimada em 2.315.560 pessoas, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). O crescimento da Grande Belo Horizonte tem sido acompanhado por uma crescente impermeabilização do solo. Aliado aos fenômenos decorrentes do aquecimento global, isso tem resultado em severas alterações climáticas (Razzaghamanesh *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017).

Belo Horizonte possui um clima Tropical de Altitude (Cwa), de acordo com a classificação de Köppen. Ao longo da série histórica de temperaturas, Belo Horizonte demonstra um acréscimo considerável, evidenciando extremos crescentes, como registrado em 1963 com temperatura do ar chegando a 35,5°C e mais recentemente atingindo em 2023 a temperatura de 38,6°C. Essa tendência pode ser atribuída a modificações antrópicas, como a redução de áreas verdes, aumento de veículos e crescimento populacional (Jardim e Silva, 2016). A média anual histórica da temperatura de Belo Horizonte é de 21,1°C e, em altitudes mais elevadas, tende a apresentar temperaturas mais amenas (Assis, 2010).

A vegetação transita entre características de Cerrado e Mata Atlântica (Assis e De Marco, 2019). O surgimento das áreas verdes públicas em Belo Horizonte remonta ao projeto original da cidade elaborado por Aarão Reis, com destaque inicial para o Parque Municipal, seguido pela Praça da Liberdade e pela Praça Raul Soares. Essas áreas foram estabelecidas ao longo da história da urbanização da cidade, mediante a aplicação de diversas legislações de parcelamento do solo urbano, transformando-se em praças ou parques urbanos (Barreto, 1996, p. 576).

Na região da depressão Belo Horizonte predominam colinas com topos que variam de planos a arqueados e encostas côncavo-convexas, com altitudes entre 800 e 900 metros. Essas colinas são formadas pela dissecação fluvial das áreas gnáissicas, promovida pela rede de drenagem dos rios Velhas ou Paraopeba. Localmente, a bacia hidrográfica do município é composta por quatro bacias – Ribeirão do Onça, Ribeirão Arrudas, Ribeirão Izidora e Rio das Velhas – que são integrantes da bacia do rio das Velhas, que abrange Belo Horizonte, Contagem e Sabará, em Minas Gerais (Belo Horizonte, 2022).

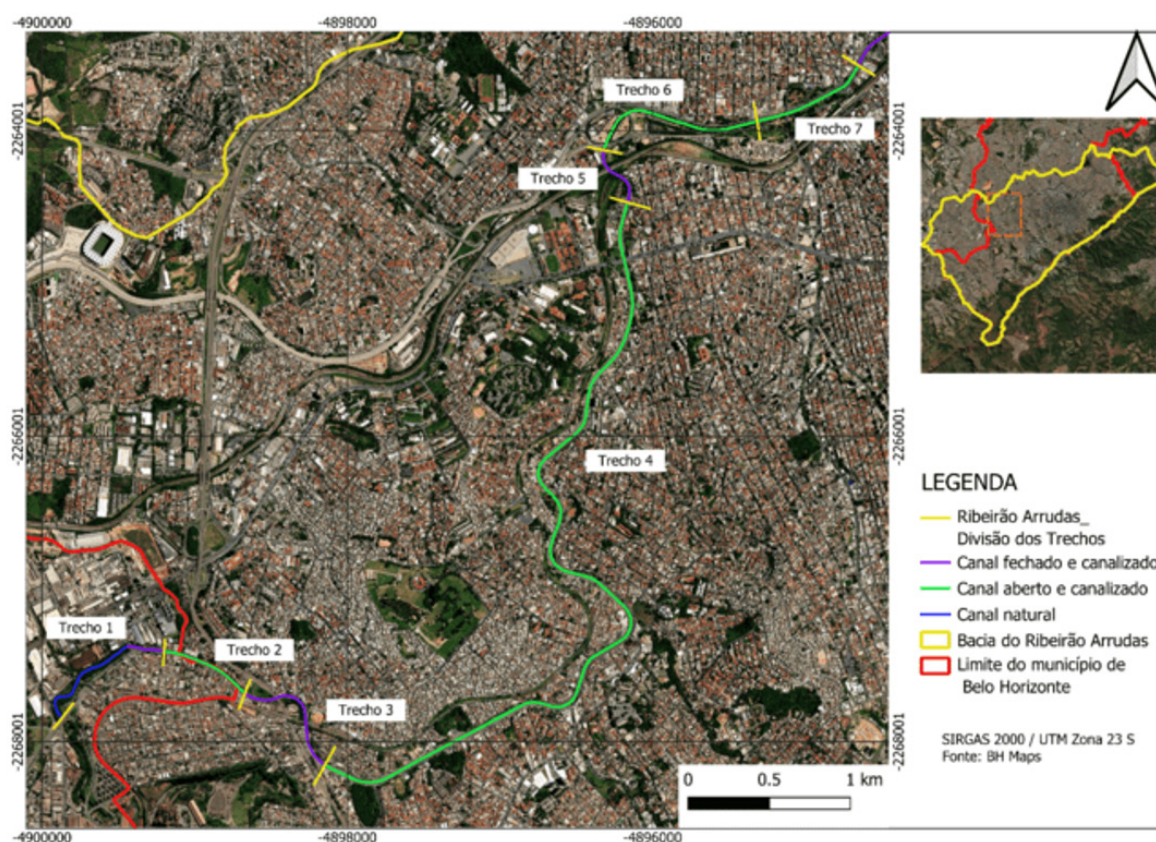
Os aspectos geomorfológicos do Ribeirão Arrudas incidem sobre o compartimento de relevo nomeado de Várzea do Arrudas. (Carvalho, 2001). Segundo Reis *et al.* (2015), a bacia do Ribeirão Arrudas caracteriza-se por apresentar um padrão de rede de drenagem semelhante ao paralelo e elíptico a ramificado conforme definição de Christofletti (1980) em quase toda a sua porção sul, devido às influências exercidas localmente pela Serra do Curral. Segundo Silva *et al.*, (1996) as menores cotas altimétricas localizam-se junto ao eixo de drenagem do Ribeirão Arrudas, que apresenta altitudes

entre 680 e 690m e as máximas em torno dos 1000m, espigões alongados de sentido N-S ou E-W destacam-se na paisagem, mas suas altitudes são inferiores às do domínio metassedimentar. Além de contrastarem pela altitude, os espigões diferenciam-se das colinas por suas declividades médias e altas, muito vulneráveis ao escoamento torrencial (Silva et al., 1996).

4.1 Delineamento experimental do Ribeirão Arrudas

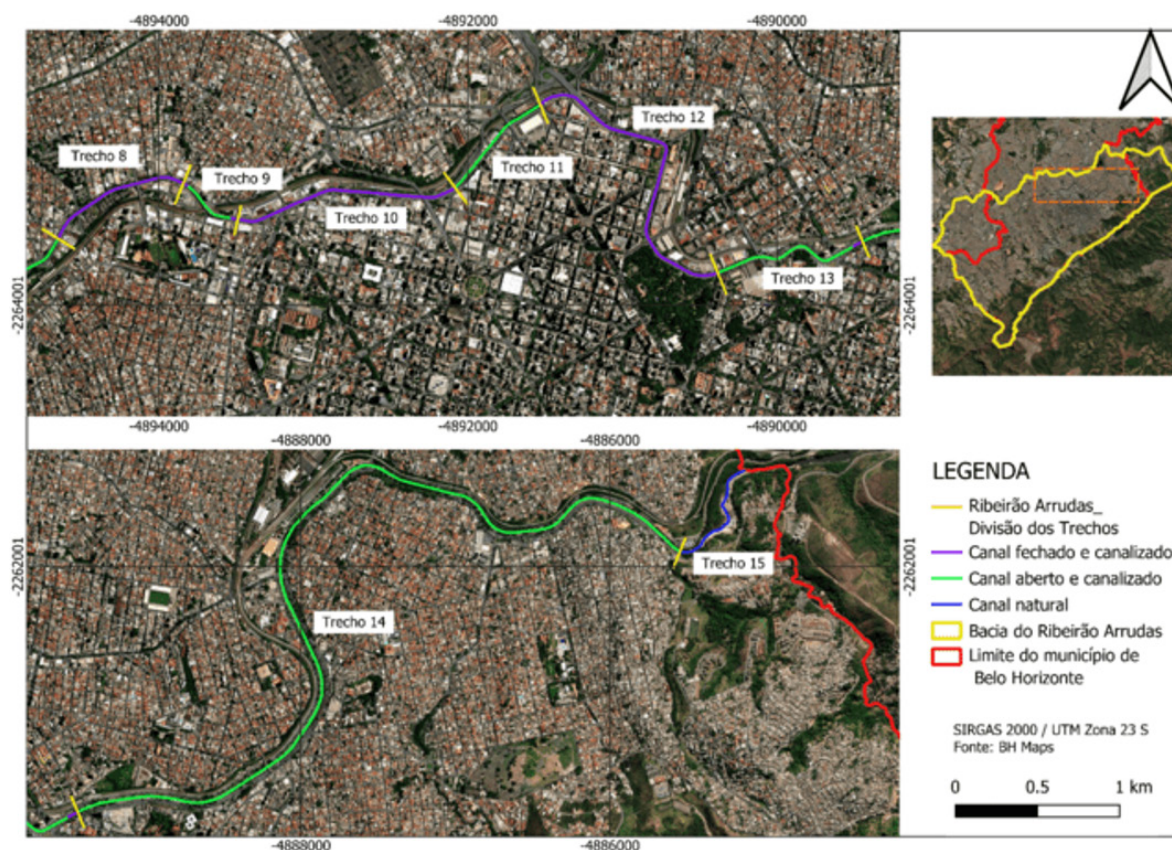
O Ribeirão Arrudas foi dividido em 15 trechos, abrangendo desde áreas mais periféricas e naturais até regiões densamente urbanizadas. A divisão permite compreender a progressão das intervenções antrópicas ao longo da extensão do curso d'água. Os trechos analisados apresentam diferentes formas de canalização, conforme destacado na legenda das imagens representadas pelas Figuras 6 e 7.

Figura 6. Divisão do Ribeirão Arrudas dos trechos 1 a 7



Fonte: BH Maps modificado pelos autores (2025).

Figura 7. Divisão do Ribeirão Arrudas dos trechos 7 a 15



Fonte: BH Maps modificado pelos autores (2025).

A Bacia do Ribeirão Arrudas estende-se pelos municípios de Contagem, Belo Horizonte e Sabará, incluindo trechos situados em áreas limítrofes que sofrem influência direta da gestão intermunicipal dos recursos hídricos. A partir da análise morfológica e das intervenções ao longo do curso d'água, o rio foi segmentado em diferentes trechos, classificados em três tipologias principais:

- Canal fechado e canalizado (roxo): encontrado principalmente nos trechos centrais (trechos 8 a 12). Essas áreas possuem alta densidade urbana, o que resultou na cobertura total do rio, dificultando a interação com o meio ambiente e reduzindo a permeabilidade do solo.
- Canal aberto e canalizado (verde claro): mais presente nos trechos intermediários (trechos 4, 5, 14), onde ainda há infraestrutura urbana significativa, mas com o leito do rio exposto.
- Canal natural (azul): destacam-se os trechos 1 e 15, próximo aos limites municipais, onde a cobertura vegetal é mais presente.

A análise dos trechos indica que a infraestrutura classificada como roxa na área de estudo corresponde a regiões situadas na planície de inundação do Ribeirão Arrudas, caracterizadas por elevado adensamento urbano e expressiva impermeabilização do solo. O Ribeirão Arrudas, assim como vários de seus afluentes, encontra-se totalmente canalizado. A perda da mata ciliar em áreas de várzea foi acompanhada pela substituição por edificações e vias de intenso tráfego, o que contribui para o aumento do escoamento superficial, especialmente das águas pluviais. Como consequência, formam-se áreas sujeitas a enchentes e inundações. A canalização do Ribeirão Arrudas intensifica sua vazão e velocidade, agravando o impacto das inundações naturais e gerando alagamentos com consequências graves.

A infraestrutura verde e natural, também denominada bacia de inundação natural, desempenha um papel fundamental na drenagem e na regulação hídrica. No entanto, na área de estudo, a expansão urbana de Belo Horizonte resultou na significativa modificação dessa infraestrutura, transformando-a em uma paisagem fortemente urbanizada, marcada por um elevado número de

edificações no entorno imediato e por extensas áreas pavimentadas, com baixa permeabilidade. A interação entre o Ribeirão Arrudas e a infraestrutura urbana ao longo de seu curso apresenta variações significativas, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Análise da infraestrutura viária, canalização e drenagem, interação com espaços verdes e densidade urbana

Trecho	Infraestrutura Viária	Canalização e Drenagem	Interação com Espaços Verdes	Densidade Urbana
1	Via Arterial	Canal natural ou parcialmente canalizado e fechado	Baixa interação com espaços verdes	Alta densidade urbana
2	Via Arterial	Canalizado e aberto	Baixa interação com espaços verdes	Alta densidade urbana
3	Via Arterial	Canalizado e fechado	Baixa interação com espaços verdes	Alta densidade urbana
4	Via Arterial	Canalizado e aberto	Alguma interação com vegetação	Densidade urbana intermediária
5	Via Arterial	Canalizado e fechado	Alguma interação com vegetação	Densidade urbana intermediária
6	Via Arterial	Canalizado e aberto	Alguma interação com vegetação	Densidade urbana intermediária
7	Via Arterial	Canalizado e aberto	Alguma interação com vegetação	Densidade urbana intermediária
8	Via Arterial	Canalizado e aberto	Baixa interação com espaços verdes	Alta densidade urbana
9	Via Arterial	Canalizado e fechado	Baixa interação com espaços verdes	Alta densidade urbana
10	Via Arterial	Totalmente canalizado e fechado	Baixa interação com espaços verdes	Alta densidade urbana
11	Via Arterial	Canalização aberta em alguns trechos	Pontos com acesso a áreas de lazer	Densidade urbana intermediária
12	Via Arterial	Canalização fechada	Pontos com acesso a áreas de lazer	Densidade urbana intermediária
13	Via Arterial	Canalização aberta e parcialmente fechada	Maior interação com vegetação	Densidade urbana intermediária
14	Via Arterial	Canalização aberta	Maior interação com vegetação	Redução gradual da densidade
15	Via Coletora	Canal natural	Forte interação com vegetação e leito natural	Redução gradual da densidade

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os trechos analisados ao longo do Ribeirão Arrudas apresentam características distintas em relação à urbanização, infraestrutura viária, canalização e integração com o meio ambiente. Os trechos 1 a 10 são marcados pela forte presença de vias arteriais e sistemas de drenagem integrados, mas com baixa interação com áreas verdes, o que compromete a função ecológica do ribeirão. Dentro desse grupo, os trechos 1 a 3 são fortemente influenciados por grandes vias com alta impermeabilização do solo e aumento do risco de inundações. Os trechos 4 a 12 representam a área de maior impacto urbano, onde o ribeirão está completamente canalizado, e em alguns trechos está coberto, eliminando praticamente qualquer função ecológica do curso d'água.

No entanto, nos trechos 11 a 13, observa-se uma alternância entre pontos de canalização aberta e algumas áreas que proporcionam acessibilidade e funções sociais e áreas verdes com a presença de árvores de grande porte, como no trecho 12, onde está localizado o Parque Municipal Américo Renné

Gianetti. Por fim, os trechos 13 a 15 demonstram uma transição para uma menor densidade urbana, possibilitando uma maior interação do ribeirão com a vegetação. Os trechos 14 e 15, especificamente, apresentam boa conectividade com áreas naturais, o que abre a possibilidade de integração com parques urbanos e projetos de infraestrutura verde. Destaca-se a presença de vegetação em muitos trechos com a presença da espécie invasora *Leucena* (*Leucaena leucocephala*)⁴ inclusive nas paredes de concreto (betão armado) dos canais abertos, com destaque para os trechos 2, 4, 6 e 7.

A análise dos 15 trechos do Ribeirão Arrudas evidencia a influência da urbanização sobre a canalização do curso d'água, afetando a drenagem e a qualidade ambiental. Embora a maioria dos trechos esteja fortemente modificada, ainda existem oportunidades para renaturalização e melhoria da interação com espaços urbanos. Medidas sustentáveis são essenciais para garantir a resiliência ambiental e a qualidade de vida na região. As figuras 8 e 9 representam fotos dos canais do Ribeirão Arrudas em trechos com o canal aberto na Avenida Tereza Cristina e canal fechado, respectivamente.

Figura 8. Fotos do canal aberto nos trechos 4, na Avenida Tereza Cristina, e 6, na Avenida Presidente Juscelino Kubitschek em Belo Horizonte



Fonte: Autores (2024).

⁴ A leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) é uma espécie arbórea exótica originária da América Central, introduzida no Brasil na década de 1940 para fins de produção de madeira, forragem e recuperação de áreas degradadas. No entanto, devido à sua alta capacidade de adaptação, crescimento rápido e reprodução vigorosa, tornou-se uma das espécies invasoras mais agressivas do planeta. No Brasil, estudos apontam que a leucena tem causado impactos ecológicos significativos, como a redução da biodiversidade e a homogeneização da flora nativa, especialmente em áreas degradadas e urbanas (Castro et al., 2018).

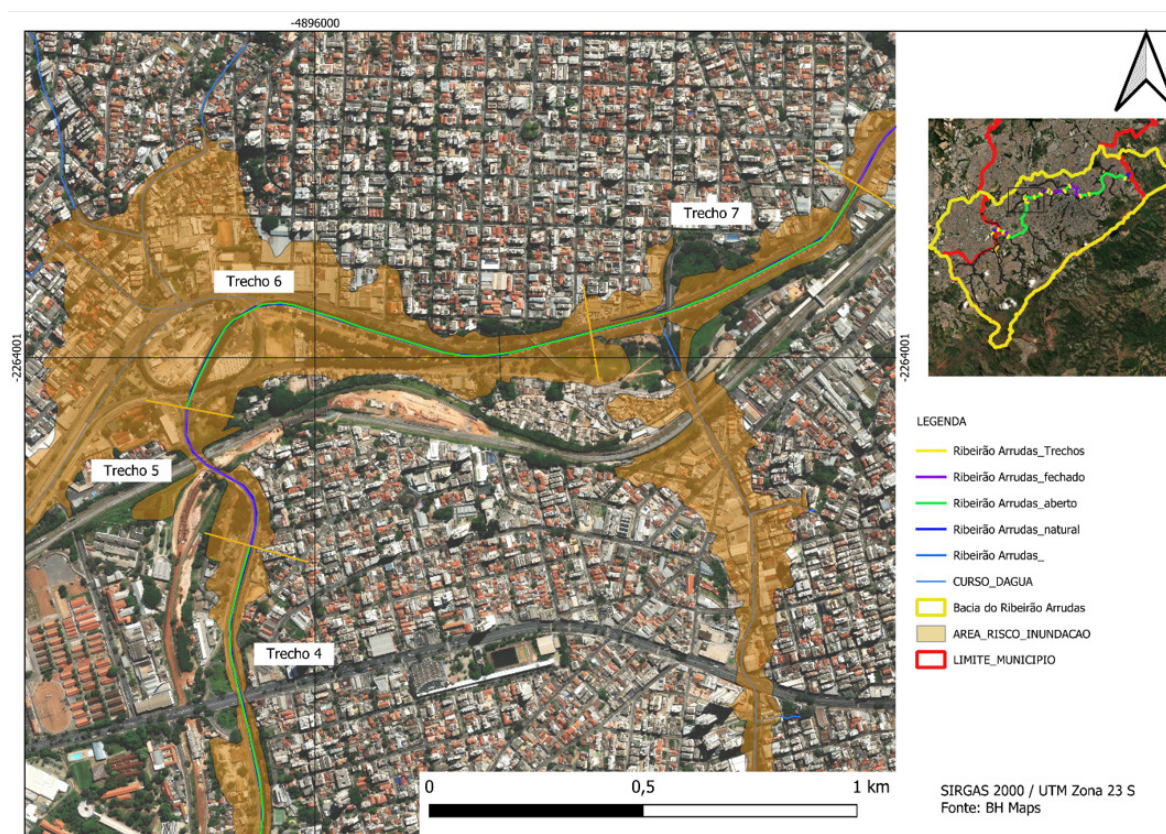
Figura 9. Fotos do canal fechado no trecho 5, na Avenida Tereza Cristina em Belo Horizonte



Fonte: Autores (2024).

Neste trabalho, a área selecionada para modelagem e simulação compreende os trechos 5 a 7 do Ribeirão Arrudas, escolhidos em função de suas características híbridas, da elevada densidade urbana e do potencial de integração com áreas verdes adjacentes. De acordo com Borsagli (2016), esse segmento do curso d'água sofreu, historicamente, intervenções de desvio, retificação e canalização entre os bairros Coração Eucarístico e Padre Eustáquio. Como consequência, a área apresenta extensas zonas suscetíveis à inundação, evidenciando elevada vulnerabilidade a eventos extremos de precipitação, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Área de Risco de Inundação - trechos 5 a 7



Fonte: BH Maps modificado pelos autores (2025).

A proposta de intervenção para os trechos 5 a 7 baseia-se na aplicação de simulações hidráulicas para avaliar a eficácia de cenários fundamentados em Soluções Baseadas na Natureza (SbN), em contraposição à infraestrutura rígida existente. As simulações consideram a implantação de um parque linear, com ampliação significativa das áreas verdes e da permeabilidade do solo, por meio de intervenções nas margens, através da criação de superfícies permeáveis e da utilização de sistemas de infiltração. Tais estratégias incorporam composições vegetais, capazes de potencializar o desenvolvimento radicular e o acúmulo de matéria orgânica, contribuindo para a regulação hidrológica, a mitigação de enchentes.

5. Materiais e métodos

O mapeamento do Ribeirão Arrudas tem como objetivo identificar áreas suscetíveis a intervenções que promovam sua revitalização. Para tanto, são considerados desafios relacionados à excessiva impermeabilização, à ocupação irregular das margens, às deficiências no saneamento e à recorrência de inundações. A pesquisa contempla a segmentação do ribeirão, os diferentes tipos de canalização presentes, o contexto urbano e ambiental envolvido, bem como as divisões geográficas que influenciam diretamente sua dinâmica.

A interação entre urbanização e infraestrutura hídrica apresenta possíveis soluções e propostas de intervenção com SbN:

- Renaturalização de trechos canalizados: possível em trechos com espaço para expansão das margens.
- Implantação de infraestrutura verde: criação de jardins de chuva, corredores ecológicos e sistemas de tratamento de águas pluviais.

- Monitoramento de vazões e qualidade da água: implementação de programas de controle de poluição, com incentivos para a despoluição dos cursos d'água.
- Expansão de parques urbanos: integração do Ribeirão Arrudas a espaços públicos, promovendo lazer e educação ambiental.

A mancha de inundação é a representação espacial das áreas alagadas durante um evento de cheia, sendo gerada a partir da modelagem hidráulica do escoamento em rios e canais. Esse processo considera a topografia do terreno e os níveis de água calculados para prever a extensão e profundidade da inundação, auxiliando no planejamento urbano e na mitigação de riscos. No *software HEC-RAS* a modelagem hidráulica é realizada através da simulação do escoamento superficial, utilizando métodos hidrodinâmicos baseados na equação de *Saint-Venant*, permitindo a análise detalhada do comportamento das inundações em diferentes cenários.

Para a simulação da modelagem hidrodinâmica foram utilizados três momentos para a compreensão das áreas inundáveis dentro do *software*:

- Simulação A margens permeáveis e o canal permeável;
- Simulação B margens permeáveis e canal impermeável;
- Simulação C margens permeáveis e o aumento da área de planície de inundação com vegetação densa e o canal permeável.

Os dados de calibração das simulações hidráulicas no *software HEC-RAS* podem ser observados na Figura 11, onde foram indicados os dados de entrada como: vazão, período, declividade, seções transversais e rugosidade.

Figura 11. Tabela de dados utilizados para a modelagem no *software*

Tabela de dados de entrada para o HEC Ras					
Simulação	Período - Vazão (m³/s) -	Declividade	Seções Transversais	Coeficiente de Manning (rugosidade) (N)	
				Canal Principal	Margens (Bank lines)
Simulação A (canal permeabilizado em toda a calha)	Início do período - 10/06/2016 Vazão - 2.3 m³/s	0.19 (última seção a jusante)	Montante – 2529 Jusante - 94	Alcances muito cheios de ervas daninhas, piscinas profundas ou inundações com pesadas áreas de madeira e arbustos – 0.1 Árvores (Salgueiros densos, verão, retos) - entre 0.1 a 0.2	Alcances muito cheios de ervas daninhas, piscinas profundas ou inundações com pesadas áreas de madeira e arbustos – 0.1 Árvores (Salgueiros densos, verão, retos) - entre 0.1 a 0.2
Simulação B (somente as margens permeáveis)	Fim do período - 24/11/2017 Vazão - 7.93 m³/s (Variação da vazão – 2.3 a 69 m³/s no período de 10/06/2017 a 24/11/2017)	0.019 (declividade média de canal impermeabilizado) (Moura, 2020)	Montante – 2560 Jusante - 90	Concreto (Acabamento em espátula) – 0.013	Concreto (Acabamento em espátula) – 0.015 Árvores (Salgueiros densos, verão, retos) - entre 0.2 a 0.5
Simulação C (aumento da área de planície de inundação)		0.19 (última seção a jusante)	Montante – 2500 Jusante - 108	Alcances muito cheios de ervas daninhas, piscinas profundas ou inundações com pesadas áreas de madeira e arbustos – 0.1	Árvores (Salgueiros densos, verão, retos) - entre 0.1 a 0.2

Fonte: Manual de Referência Hidráulico *HEC-RAS* modificado pelos autores (2025).

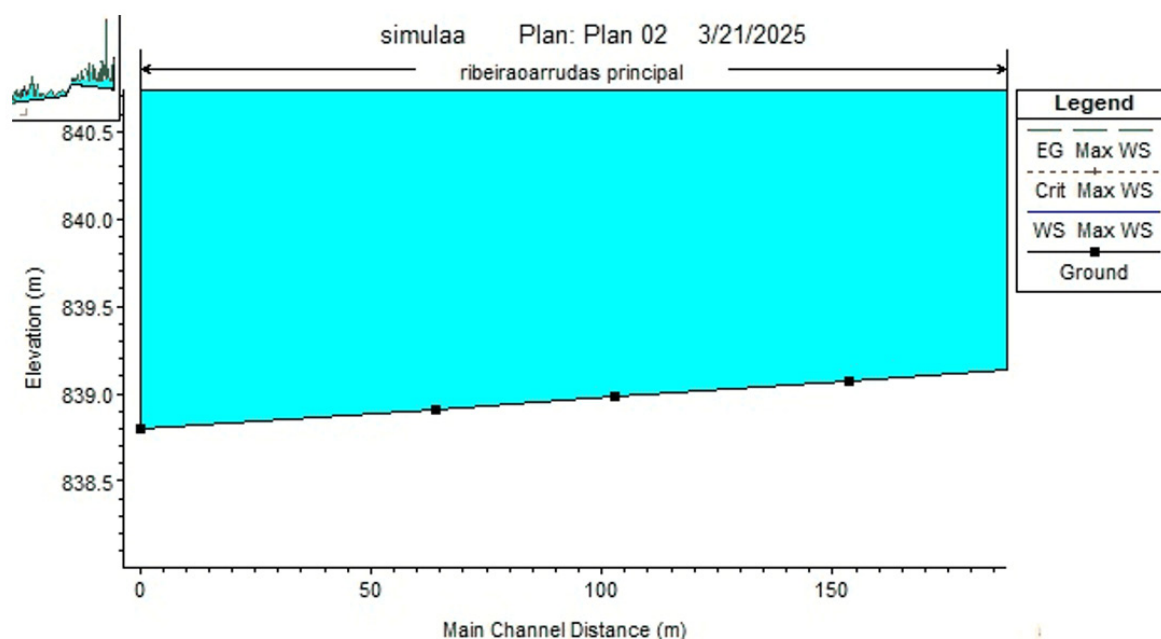
Na Figura 11 a tabela apresenta os dados de entrada utilizados nas simulações hidrodinâmicas no *software HEC-RAS*, considerando três cenários distintos de permeabilidade e áreas de inundação. A Simulação A representa um canal totalmente permeabilizado, com o coeficiente de rugosidade de Manning variando entre 0,1 e 0,2 para as margens e o canal principal, caracterizando um ambiente com vegetação densa e obstáculos naturais. Na Simulação B, onde apenas as margens são permeáveis e o leito foi concretado, observa-se uma redução da rugosidade para valores entre 0,013

e 0,015 no canal principal, indicando maior eficiência no escoamento e menor resistência ao fluxo, o que pode aumentar a velocidade da água e o risco de erosão nas margens. Na Simulação C expande a planície de inundação, mantendo coeficientes de rugosidade semelhantes aos da Simulação A, com valores entre 0,1 e 0,2, o que reforça a presença de vegetação densa nas margens e no leito. Neste cenário indica uma capacidade de amortecimento das cheias, visto que a água pode se dispersar em áreas de planície alagável, reduzindo a velocidade e mitigando riscos de inundação em áreas críticas.

A variação da vazão observada nas simulações oscilou entre 2,3 e 69 m³/s ao longo do período analisado. Os dados de vazão foram obtidos a partir da estação fluviométrica PCH Marzagão Montante (41237500), selecionada por ser a única a apresentar registros recentes, abrangendo informações até o ano de 2017. No entanto, cabe destacar que essa estação está situada a jusante das sub-bacias do Ribeirão Arrudas. As informações referentes às vazões diárias foram extraídas do portal *HIDROWEB*, considerando o intervalo temporal de 10 de junho de 2016 a 24 de novembro de 2017. Para a presente pesquisa, a análise concentrou-se nas vazões máximas horárias, levando em consideração o ano hidrológico.

A declividade foi determinada a partir do perfil transversal do terreno, conforme ilustrado na Figura 12. Considerou-se uma declividade de 0,19% (*normal depth*), correspondente ao trecho final a jusante. Na simulação B, adotou-se a declividade média do canal impermeabilizado, conforme Moura (2020).

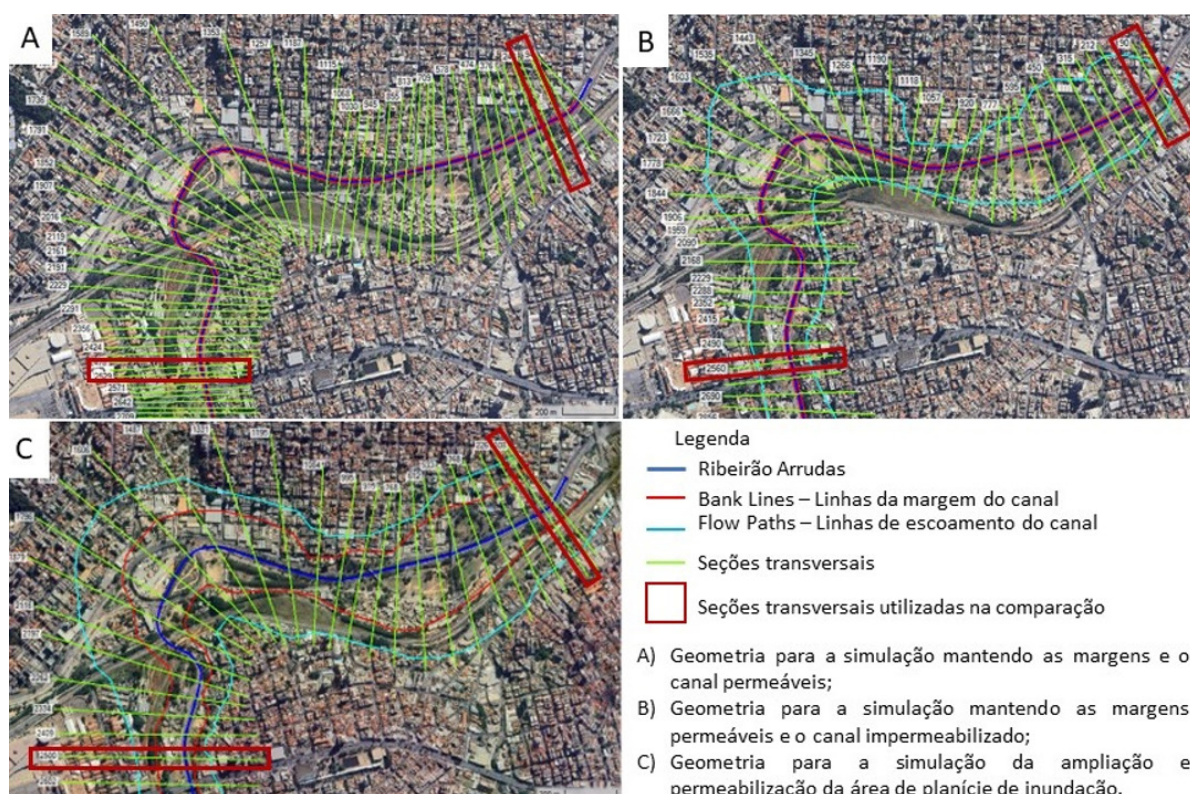
Figura 12. Declividade do Ribeirão Arrudas no último trecho a jusante



Fonte: HEC-RAS modificado pelos autores (2025).

As seções transversais utilizadas no modelo para as três simulações estão apresentadas na Figura 13. Essas seções desempenham um papel fundamental na observação da cota do nível da água nos diferentes momentos de simulação, especialmente ao comparar as margens impermeabilizadas com as áreas de planície de inundação simuladas. Conforme ilustrado na figura, na simulação A foram selecionadas as seções transversais 2532, a montante, e 103, a jusante. Para a simulação B, utilizaram-se as seções 2537, na posição a montante, e 103, na posição a jusante. Contudo, na simulação C no posicionamento a montante foi utilizada a seção transversal 2500 e a jusante a 108.

Figura 13. Geometria das simulações com as seções transversais dos modelos



Fonte: HEC-RAS modificado pelos autores (2025).

Segundo o Manual de Referência Hidráulico *HEC-RAS* (2025), o coeficiente de Manning (N) no *software* utiliza diferentes dados para avaliar a dissipação de energia, incluindo os valores de Manning (n) para perdas por atrito, coeficientes de contração e expansão para perdas de transição, e coeficientes específicos para pontes e bueiros, considerando fatores como formato, fluxo de pressão e condições de entrada e saída. A escolha adequada do coeficiente de Manning é essencial para a precisão das elevações da superfície da água, sendo influenciada por diversos fatores como rugosidade, vegetação, irregularidades do canal e condições sazonais. Sempre que possível, os valores de n devem ser calibrados com dados observados, e, na ausência destes, pode-se recorrer a referências como o livro *Open-Channel Hydraulics* de Chow (1959), que compila coeficientes para diferentes tipos de canais.

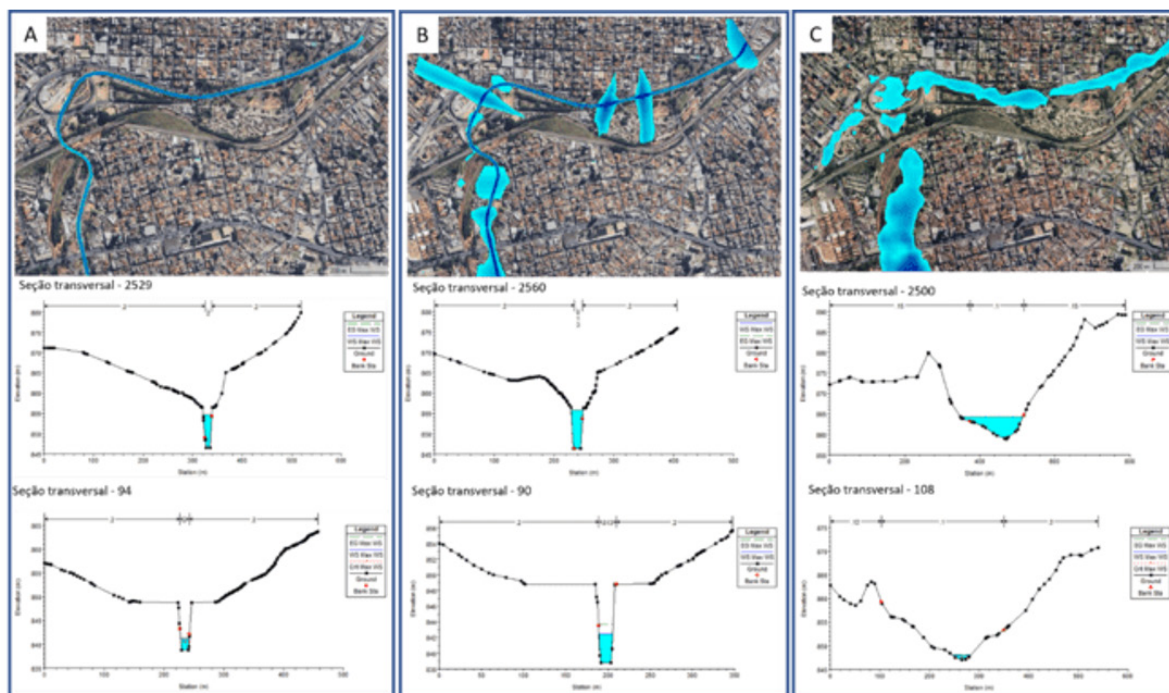
6. Resultados e discussão

As simulações hidrodinâmicas avaliaram diferentes cenários de escoamento e inundação em um trecho urbano, apresentadas na figura 14. Na Simulação A, o canal do Ribeirão Arrudas foi totalmente permeabilizado e revegetado, promovendo maior infiltração e desaceleração do fluxo hídrico, contribuindo para a redução de enchentes e da erosão. Na Simulação B, apenas as margens eram permeáveis, enquanto o fundo do canal permanecia impermeabilizado com concreto (betão armado), resultando em um escoamento acelerado, com menor capacidade de absorção da água e maior risco de transbordamento. Na Simulação C, houve ampliação da planície de inundação e aumento das áreas vegetadas, promovendo maior retenção hídrica e redução dos picos de vazão, mitigando impactos associados a eventos extremos, porém necessita ser de uma ampla área adjacente ao ribeirão para a sua implementação.

Uma análise relevante, apresentada na figura 14 ao comparar as três simulações com as respectivas manchas de inundação e seções transversais, permite inferir os resultados obtidos pelo *software* nas simulações B e C. Na simulação B, observa-se que, ao manter o canal impermeabilizado e promover a permeabilização das margens, a mancha de inundação se expande. Isso ocorre porque

o rio ganha mais espaço e áreas de planície de inundação, permitindo que a água ocupe seu espaço natural previamente impermeabilizado pela expansão urbana. Já na simulação C, o alargamento da planície de inundação aumentou ainda mais a expansão da mancha de inundação, porém o nível da lamina d'água diminuiu e a presença de vegetação densa reforçada nas margens e no leito, favorece a funcionalidade do ciclo hídrico, operando através do sistema conhecido como *continuum* solo-planta-atmosfera (Brady & Weil, 2008). Deste modo a água das precipitações pode ser interceptada no solo e escoada superficialmente (0 a 30%). Entre 5 a 50% dessa água sofre o processo de evapotranspiração retornando à atmosfera através da vegetação, especialmente a arbórea (Brady & Weil, 2008).

Figura 14. Quadro comparativo entre os diferentes cenários da simulação

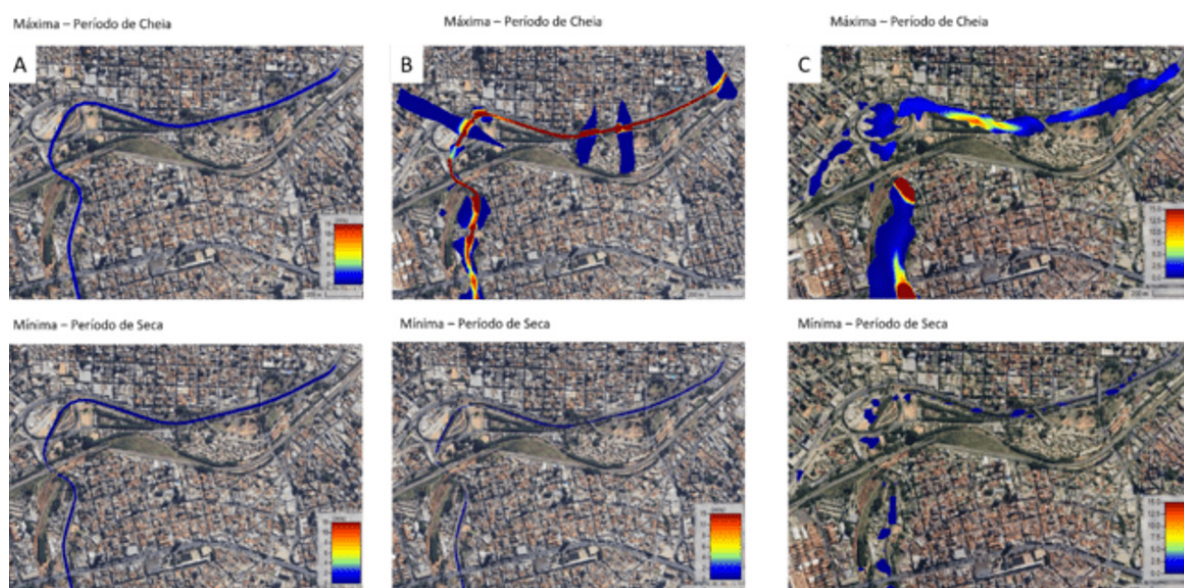


Fonte: HEC-RAS modificado pelos autores (2025).

A figura 15 apresenta os resultados de simulações hidrodinâmicas no Ribeirão Arrudas, analisando diferentes cenários de escoamento e inundação em área urbana. A escala de cores indica velocidade do fluxo hídrico, sendo azul para baixas velocidades e vermelho para altas velocidades, permitindo avaliar o impacto das intervenções propostas. Na Simulação A, o canal foi totalmente permeabilizado e revegetado, resultando em um escoamento mais lento, predominância da cor azul e maior infiltração. Isso reduz o risco de enchentes e erosão, promovendo a recarga do lençol freático e estabilizando as margens do ribeirão. Em contraste, a Simulação B, que manteve o fundo impermeável, apresenta trechos com alta velocidade (vermelho e amarelo), indicando escoamento acelerado e maior risco de transbordamento, mesmo com margens permeáveis.

A Simulação C, por sua vez, equilibra melhor a distribuição das velocidades ao ampliar a planície de inundação e aumentar a cobertura vegetal. O predomínio de áreas em azul e a dissipação da energia do fluxo indicam maior retenção hídrica e redução dos picos de vazão, mitigando eventos extremos e promovendo estabilidade hidrológica (Brady; Weil, 2008). No entanto, essa alternativa iria exigir uma grande área de desapropriação para sua implementação, tornando-se a opção de maior impacto social e financeiro. Comparando os cenários, a Simulação C se destaca como a mais eficiente para a mitigação de enchentes e controle do escoamento, combinando infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza para reduzir os impactos das inundações em ambientes urbanos, embora com desafios adicionais relacionados ao custo e à realocação de moradores e proprietários.

Figura 15. Quadro comparativo da velocidade da água no canal e nas planícies de inundação



Fonte: HEC-RAS modificado pelos autores (2025).

A aplicação de SbN e de infraestruturas verdes e azuis torna-se evidente na Simulação C, na qual a expansão de áreas permeáveis e vegetadas favorece a infiltração da água, a desaceleração do escoamento superficial e a retenção de volumes excedentes, reduzindo assim os riscos de enchentes e erosão. As imagens analisadas evidenciam o impacto positivo dessas estratégias, demonstrando que intervenções ecológicas podem contribuir para a resiliência urbana. A adoção de infraestruturas verdes, como vegetação ripária e áreas de retenção, em conjunto com soluções de infraestrutura azul, como canais naturais e bacias de detenção, fortalece a capacidade adaptativa dos centros urbanos frente a eventos hidrológicos extremos, promovendo um desenvolvimento urbano sustentável.

A análise comparativa dos três cenários simulados permite identificar estratégias de intervenção SbN adequadas a cada contexto, como a implantação de jardins de chuva, parques alagáveis e sistemas de tratamento de águas pluviais.

Na Simulação A, o canal do Ribeirão Arrudas foi totalmente permeabilizado e revegetado, promovendo maior infiltração e desaceleração do fluxo hídrico, o que favorece a redução de enchentes e erosão. Este cenário é particularmente adequado para a implantação de revegetação com espécies nativas, associada à criação de jardins de chuva, potencializando os serviços ecossistêmicos, como a absorção e a filtragem da água.

Na Simulação B, apenas as margens apresentavam permeabilidade, enquanto o fundo do canal permanecia impermeabilizado com concreto (betão armado), resultando em escoamento acelerado, menor capacidade de infiltração e maior risco de transbordamento. Para mitigar esses efeitos, recomenda-se a implantação de jardins de chuva ao longo das margens, auxiliando na absorção parcial da água pluvial.

Por fim, a Simulação C, que ampliou a planície de inundação e aumentou as áreas vegetadas, proporcionou maior retenção hídrica e redução dos picos de vazão, contribuindo para a mitigação de eventos hidrológicos extremos. Para sua aplicação, contudo, é fundamental dispor de um amplo espaço adjacente ao ribeirão, justificando a criação de parques alagáveis, os quais são capazes de acomodar grandes volumes de água, garantindo eficiência e resiliência urbana.

7. Conclusão

A partir das análises realizadas, constatou-se que todas as simulações resultaram na redução da mancha de inundação na área de estudo, quando comparadas à mancha de inundação oficial apresentada pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) (Figura 8). No entanto, a eficácia e a viabilidade

de cada alternativa variam conforme o grau de permeabilização do canal e das margens, bem como a necessidade de intervenções urbanísticas, conforme as simulações:

A Simulação A, na qual o canal do Ribeirão Arrudas foi completamente permeabilizado e revegetado, demonstrou grande eficiência na redução da velocidade do escoamento e na ampliação da infiltração da água, minimizando riscos de enchentes e erosão, além da compatibilidade com o espaço urbano.

A Simulação B, com margens permeáveis, mas fundo impermeável, apresentou melhorias parciais, mas ainda manteve trechos de escoamento acelerado e riscos de transbordamento. Essa abordagem representa um meio-termo entre intervenção ecológica e viabilidade técnica, exigindo menor espaço para implementação, mas oferecendo benefícios limitados na redução dos picos de vazão.

A Simulação C, que ampliou a planície de inundação e incorporou grandes áreas vegetadas, foi a mais eficaz na mitigação de enchentes, proporcionando maior capacidade de retenção hídrica e estabilidade hidrológica. No entanto, essa solução exigiria desapropriações significativas para viabilizar a expansão da planície de inundação, tornando-se um grande desafio social e financeiro.

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) demonstraram seu potencial para aumentar a resiliência hídrica e climática de Belo Horizonte, contribuindo para a redução de enchentes e a criação de espaços ambientalmente sustentáveis com biodiversidade e garantindo os serviços ecossistêmicos. No entanto, a implementação dessas estratégias requer planejamento integrado, considerando desafios como custos elevados, necessidade de adaptação da infraestrutura urbana e envolvimento da comunidade local.

Para avançar nessa direção, recomenda-se que futuras pesquisas realizem monitoramento detalhado das intervenções já implementadas, aprimorem as modelagens hidrodinâmicas e avaliem estratégias híbridas que combinem infraestrutura verde e cinza de forma mais equilibrada. Além disso, estudos de viabilidade social e econômica são essenciais para garantir que as soluções propostas sejam eficazes e aplicáveis dentro do contexto urbano da cidade.

Referências

- Ahern, J. (2007). Green Infrastructures for Cities: the spatial dimension. In: V. Novotny & P Brown (eds.). *Cities of the Future: towards integrated sustainable water and landscape*. London: IWA Publishing.
- Almeida, I. Q. de, Carvalho, P. F. de (2010). Representações, riscos e potencialidades de rios urbanos: Análise de um (des) caso histórico. *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, 11(34), 145–161.
- Amaral, R., Costa, S. de A. P., Muzzi, M. R. S. (2017). O sequestro de carbono em trechos da floresta urbana de Belo Horizonte: por um sistema de espaços livres mais eficiente no provimento de serviços ecossistêmicos urbanos. *Paisagem e Ambiente: Ensaios, São Paulo*, 39, 8–12.
- Assis, E. S., De Marco, C. C. (2019). Um sistema para o manejo de 500.000 árvores das vias de Belo Horizonte. *Jornada Urbanere e Jornada Cires - Congresso Internacional*, 14(2). 33–42.
- Assis, W. L. (2010). O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial. 2010. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte.
- Bainbridge, D. (2006). Adding ecological considerations to "Environmental Accounting". *Bulletin of the Ecological Society of America*, 87, (84), 335–340,
- Barreto, A. (1995). *Belo Horizonte: Memória histórica e descritiva*. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro.
- Borsagli, A (2016). *Rios invisíveis na metrópole mineira*. Belo Horizonte: Clube de Autores.
- Borsagli, A., Bernardes, B. M. (2016). Sob o asfalto do progresso: Os rios invisíveis da zona urbana de Belo Horizonte, *Revista Eletrônica do Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte, Belo Horizonte*, 3, p. 24–45.

- Borsagli, A. (2019). Do convívio à ruptura: rios urbanos e o processo de consolidação territorial do arraial de Belo Horizonte (1894–1930). Dissertação (Mestrado em Tratamento da Informação Espacial) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Brady, N. C., Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soil*. 14. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- C40 Cities. (2025). Singapore bio-engineering works at Bishan-Ang Mo Kio Park to prevent urban flooding. [S. l.]: C40 Cities <https://www.c40.org/pt/case-studies/singapore-bio-engineering-works-at-bishan-ang-mo-kio-park-to-prevent-urban-flooding/>
- Cajazeiro, J. (2012). A paisagem urbana e os impactos das inundações em Belo Horizonte/MG. *Geografias, Belo Horizonte*, 8 (2), 105–124 <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13386>.
- Cajazeiro, J. M. D. (2012). Análise da susceptibilidade à formação de inundações nas bacias e áreas de contribuição do Ribeirão Arrudas e Córrego da Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização. 2012. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem Ambiental) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Cajazeiro, L. (2012). *Enchentes urbanas e vulnerabilidade social: estudo de caso em Belo Horizonte*. Belo Horizonte: UFMG.
- Carvalho, M. (2001). Relevo e paisagem urbana de Belo Horizonte: uma análise geomorfológica. *Seminário Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 7, 2001, Belo Horizonte. *Anais [...]* 7. Seminário Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Belo Horizonte: [s. n.], 102–115.
- Castro, R. A. De, Meiado, M. V., Dantas, B. F. (2018). Banco de Sementes da Exótica Invasora *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit (Fabaceae) na Caatinga. In *Anais da 2ª Jornada de Integração da Pós-Graduação da Embrapa Semiárido*. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido.
- Christofelleti, A. (1980). *Geomorfologia*. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blücher.
- Crowther, D. & Echenique, M. (1975). Desenvolvimento de um modelo de Estrutura Urbana Espacial. In L. Martin, L. March & M. Echenique, *La estructura del espacio urbano*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Drumond, R., Almeida, R., Nascimento, N. (2023). Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte. *Cadernos MetrÓpole*, 25 (58).
- Eckart, K., McPhee, Z., Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development—A review. *Science of the Total Environment*, 607–608, 413–432.
- Fundação João Pinheiro (1987). *Belo Horizonte: memória histórica e descritiva*. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro.
- Gioia, A. et al. (2014). Size matters: vegetation patch size and surface temperature relationship in foothills cities of northwestern Argentina. *Urban Ecosystems*, 17, p. 1161–1174.
- Guha-Sapir, D. et al. (2016). *Annual disaster statistical review 2016: The numbers and trends*. Brussels: CRED.
- Hueting, R. et al. (1998). The concept of environmental function and its valuation. *Ecological Economics*, 25 (1), 31–35.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (s.d.). População estimada de Belo Horizonte. 2022.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, <https://www.wribrasil.org.br/noticias/6-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-mitigacao-das-mudancas-climaticas>
- Jardim, C., Silva, M. (2016). Extremos de temperatura do ar em Belo Horizonte: Variabilidade natural e influência do clima urbano. *Revista do Departamento de Geografia USP, São Paulo*, 27(2), 116–128. DOI: 10.11606/rdg.v1i0.118036.

- Jiao, M. et al. (2017). O tamanho da mancha de árvores afeta sua eficácia no resfriamento: uma perspectiva a partir dos processos de sombreamento e transpiração. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 293–299.
- Lee, K. N. (2006). Urban sustainability and the limits of classical environmentalism. *Environment & Urbanization*, 18, 1, 9–22.
- Levin, S. A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1 (4), 431–436.
- Lima, A. (2018). Projeto de restauração do Cheonggyecheon. Projetobatente. <https://projetobatente.com.br/projeto-de-restauracao-do-cheonggyecheon>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., Calfapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environmental Quality*, 45 (1), 119–124. DOI: 10.2134/jeq2015.11.0567.
- Londoño, J. C. J. (2024). *Recuperación ambiental de ríos urbanos: Río Medellín – Colombia*. Medellín: Universidad de Medellín. DOI: 10.69618/AWLL4041.
- Lucas, T. P. B. et al. (2015). Impactos hidrometeorológicos em Belo Horizonte-MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, 16, 177-194, DOI: 10.5380/abclima.v16i0.37051.
- Moura, N. D. S. (2020). Estudo da influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica de bacias urbanas de pequeno porte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Oliveira, M., Ganem, K., Baptista, G. (2017). Análise sazonal da relação entre sequestro de carbono e ilhas de calor urbanas nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, 69 (1), 159-174. <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44336/23418>.
- Pinto-Coelho, R. M. (2024). *Recuperação de florestas e águas em ambientes urbanos: Projeto Izidora, Belo Horizonte – Brasil*. RMPC - Meio Ambiente Sustentável.
- Potschin, M., Haines-Young, R. (2016). Ecosystem services in the twenty-first century. In M. Potschin et al. (Org.). *Routledge Handbook of Ecosystem Services*. London; New York: Routledge.
- Projeto Manuelzão (2009). *Atlas da qualidade da água e da bacia hidrográfica do Rio das Velhas: Situações e tendências*. Belo Horizonte: Projeto Manuelzão.
- Qi, Y. et al. (2020). Addressing challenges of urban water management in Chinese sponge cities via nature-based solutions. *Water*, 12(10).
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., Salemi, T. (2015). The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4).
- Reis, J. C. (2011). *Diagnóstico ambiental da bacia do Ribeirão Arrudas*. Monografia (Especialização em Análise e Modelagem Ambiental) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Ruangpan, L. et al. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 243–270. DOI: 10.5194/nhess-20-243-2020.
- Samsom, R. (2017). Urban Trees as Environmental Engineers. In D. Pearlmuter et al. (ed.). *The Urban Forest: Cultivating Green Infrastructure for People and the Environment*. Cham: Springer.
- Silva, A. C., Raposo, C. S. D., Meireles, E. (2023). Áreas de conexão verde e conexão fundo de vale: proposição para redução dos impactos de enchentes em Belo Horizonte, Minas Gerais. *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, 24(91), 305–321. DOI: 10.14393/RCG.
- Tucci, C. E. M. (2003). *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.
- Tucci, C. E. M. (2007). *Inundações urbanas*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH / RHAMA).

U.S. Army Corps of Engineers (2025). *HEC-RAS Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center.

Vojinovic, Z. (2020). Nature-based solutions for flood mitigation and coastal resilience: Analysis of EU-funded projects.

Wittfogel, K. A. (1957). *Oriental despotism: A comparative study of total power*. New Haven: Yale University Press.

Como citar este artigo:

Moura, A.L.D. et al. (2026). Soluções Baseadas na Natureza para a revitalização de corpos hídricos urbanos canalizados: Ribeirão Arrudas, Brasil. *CIDADES, Comunidades e Territórios*, sp26, e20260340940. <https://doi.org/10.15847/cct.40940>

Ana Lorena Demarques Moura, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

E-mail: [anademarques \[at\] gmail.com](mailto:anademarques@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6359-1997>

Contribuições para o artigo: concetualização, curadoria dos dados, metodologia, supervisão, visualização, redação do original, revisão e edição.

Talita Silvia de Souza, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

E-mail: [talitass \[at\] ufmg.br](mailto:talitass@ufmg.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-9048>

Contribuições para o artigo: concetualização, curadoria dos dados, investigação, metodologia, análise formal, visualização, redação do original, revisão e edição.

Maria Manoela Gimmler Netto, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

E-mail: [manoelagnetto \[at\] gmail.com](mailto:manoelagnetto@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0045-8962>

Contribuições para o artigo: concetualização, metodologia, revisão e edição.

Staël de Alvarenga Perreira Costa, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

E-mail: [sapc \[at\] ufmg.br](mailto:sapc@ufmg.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1018-204X>

Contribuições para o artigo: concetualização, metodologia, revisão e edição.

Maria Rita Scotti Muzzi, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

E-mail: [mrirtascottimuzzi \[at\] gmail.com](mailto:mrirtascottimuzzi@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7179-9997>

Contribuições para o artigo: concetualização, metodologia, revisão e edição.