

VÁRZEAS CONSTRUÍDAS COMO SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA (SbN) PARA READEQUAÇÃO DE RIOS E CÓRREGOS URBANOS

João Pedro Coelho Belini
Filipe Chaves Gonçalves
Joaquín Ignacio Bonnacarrère Garcia

RESUMO

A abordagem adaptativa do planejamento urbano busca construir uma capacidade de resiliência como etapa prévia para sustentabilidade. Em sintonia, o estudo adotou as Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para propor a Readequação de rios e córregos urbanos, aliando interesses ambientais e socioeconômicos. Propôs-se assim a utilização de Sistemas de Tratamento por Várzeas Construídas (STVC). Estes congregam as funções das várzeas naturais, elementos da geomorfologia fluvial que são desconsiderados na drenagem urbana convencional, sendo otimizadas por elementos da Engenharia. Assim, como hipótese de pesquisa, considerou-se que os STVC atuariam no tratamento das águas pluviais, diminuindo a carga de poluição difusa carregada até os corpos hídricos pelo sistema convencional de drenagem. Além disso, que sua utilização também corroboraria com a retenção temporária de parte do volume escoado na bacia urbana, favorecendo sua infiltração. Logo, a proposição teve como objetivo aliar tanto o controle quantitativo como, principalmente, o qualitativo das águas urbanas, atuando como barreira protetora do ecossistema aquático. A concepção dos STVC se alinha ainda com o que propõe os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, ODS, propostos pela ONU. E, para verificação da hipótese inicial de atuação combinada quali-quantitativa, realizou-se revisão bibliográfica sobre as potencialidades da implantação de tais sistemas e a consideração do estudo de cenários. As conclusões do estudo permitem destacar o potencial, em termos da drenagem urbana sustentável, que os STVC conferem. Logo, acredita-se que um melhor detalhamento técnico, obtido pela implantação dos sistemas em escala real, pode gerar resultados que validem sua aplicação.

Palavras-chave: Soluções Baseadas na Natureza (SbN); LID; Drenagem urbana; Planejamento Urbano Adaptativo; Resiliência.



LLANURAS ALUVIALES CONSTRUIDAS COMO SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA (SbN) PARA MEJORAR RÍOS Y ARROYOS URBANOS

João Pedro Coelho Belini
Filipe Chaves Gonçalves
Joaquín Ignacio Bonnacarrère García

RESUMEN

El enfoque adaptativo de la planificación urbana busca desarrollar la resiliencia como un paso previo a la sostenibilidad. En línea con esto, el estudio adoptó Nature-Based Solutions (SbN) para proponer el reajuste de los ríos y arroyos urbanos, combinando intereses ambientales y socioeconómicos. Por lo tanto, se propuso el uso de sistemas de tratamiento de llanuras de inundación construidas (LIC). Estos combinan las funciones de las llanuras aluviales naturales, elementos de geomorfología fluvial que son descartados en el drenaje urbano convencional, siendo optimizados por elementos de Ingeniería. Así, como hipótesis de investigación, se consideró que el LIC actuaría en el tratamiento de las aguas pluviales, reduciendo la carga de contaminación difusa transportada a los cuerpos de agua por el sistema de drenaje convencional. Además, su uso también corroboraría la retención temporal de parte del volumen drenado en la cuenca urbana, favoreciendo su infiltración. Por tanto, la propuesta pretendía combinar el control cuantitativo y, principalmente, cualitativo de las aguas urbanas, actuando como barrera protectora del ecosistema acuático. La concepción del LIC también está en línea con lo propuesto por los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, propuestos por la ONU. Y, con el fin de verificar la hipótesis inicial de acción combinada cualitativo-cuantitativa, se realizó una revisión de la literatura sobre las potencialidades de implementar dichos sistemas y la consideración del estudio de escenarios. Las conclusiones del estudio permiten destacar el potencial, en términos de drenaje urbano sostenible, que confiere el LIC. Por tanto, se cree que un mejor detalle técnico, obtenido al implementar los sistemas a gran escala, puede generar resultados que validen su aplicación.

Palabras clave: Soluciones basadas en la naturaleza (SbN); LID; Drenaje urbano; Planificación Urbana Adaptativa; Resiliencia.



CONSTRUCTED FLOODPLAIN TREATMENT SYSTEMS AS NATURE-BASED SOLUTIONS (NbS) FOR READJUSTMENT OF URBAN RIVERS AND STREAM

João Pedro Coelho Belini
Filipe Chaves Gonçalves
Joaquin Ignacio Bonnacarrère Garcia

ABSTRACT

The adaptive approach to urban planning seeks to build resilience as a pre-step to sustainability. In line with this, the study adopted Nature-Based Solutions (NbS) to propose the readjustment of urban rivers and streams, combining environmental and socioeconomic interests. Thus, the use of Constructed Floodplain Treatment Systems (CFTS) was proposed. These combine the functions of natural floodplains, elements of fluvial geomorphology that are disregarded in conventional urban drainage, being optimized by elements of Engineering. Thus, as a research hypothesis, it was considered that the CFTS would act in the treatment of rainwater, reducing the load of diffuse pollution carried to water bodies by the conventional drainage system. Furthermore, its use would also corroborate the temporary retention of part of the volume drained in the urban basin, favoring its infiltration. Therefore, the proposal aimed to combine both quantitative and, mainly, qualitative control of urban waters, acting as a protective barrier for the aquatic ecosystem. The conception of the CFTS is also in line with what is proposed by the Sustainable Development Goals, SDGs, proposed by the UN. And, in order to verify the initial hypothesis of combined qualitative-quantitative action, a literature review was carried out on the potentialities of implementing such systems and consideration of the study of scenarios. The study's conclusions allow to highlight the potential, in terms of sustainable urban drainage, that the CFTS confer. Therefore, it is believed that a better technical detail, obtained by implementing the systems on a full scale, can generate results that validate their application.

Keywords: Nature Based Solutions (NbS); LID; Urban drainage; Adaptive Urban Planning; Resilience.

1. INTRODUÇÃO

A convivência com os Rios e Córregos Urbanos é um desafio. A expansão das cidades, ao não levar em consideração tais ecossistemas, sufocou a rede hidrográfica existente. Logo, uma das formas de melhorar a convivência no ambiente urbano passa pela proposição de um tratamento sistêmico, em nível de planejamento, incorporando os ecossistemas aquáticos urbanos nas medidas urbanísticas. Tal abordagem refere-se ao Planejamento Urbano Adaptativo, no qual se propõe e estimula-se a capacidade de resiliência do Ecossistema Urbano (AHERN, 2011; SOTTO *et al.*, 2019). Resiliência refere-se então à capacidade de resposta de um sistema, em meio a perturbações, de manter seu estado básico de constituição (WALKER & SALT, 2006; PAIVA & SCHICCHI, 2019). Nesse sentido, e uma vez transferido para a abordagem do planejamento urbano, o interesse passou a ser a construção de uma capacidade de resiliência urbana, de modo a antecipar falhas e projetar estrategicamente (FEAGAN *et al.*, 2019). Dessa forma, percebe-se que a construção de uma capacidade adaptativa (AHERN, 2011; IWANIEC *et al.*, 2020) provém da observação dos fenômenos naturais e permite que a infraestrutura urbana possa ser pensada de modo a promover uma resiliência urbana (BOTEQUILHA-LEITÃO & DÍAZ-VARELA; SALAS & YEPES, 2020).

Em relação às estratégias possíveis, considerou-se aqui a adoção de Infraestruturas Verde-Azul como um provável meio para construção dessa capacidade de resiliência do sistema urbano (DROSOU *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2020), haja vista que ela se baseia e interage diretamente com abordagens adaptativas, como as Adaptações Baseadas em Ecossistemas (EbA), com foco nas Mudanças Climáticas e seus impactos (RICHERZHAGEN *et al.*, 2019; LAVOREL; VENTER; ZARI *et al.*, 2020), e as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), em espectro mais amplo (BUSH and DOYON, 2019; DUSHKOVA & HAASE; LA ROSA & PAPPALARDO, 2020; ARTMANN; BUSH; RONCHI *et al.*, 2020). Por sua vez, o interesse da promoção da Sustentabilidade e Resiliência Urbana está alinhado também aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, ODS, apresentados pela ONU em 2015 (UNGA, 2015). Ainda, considerando-se as projeções mundiais de incremento de população nas cidades, percebe-se que as metas propostas pelos ODS serão implantadas na realidade urbana, tornando-a palco para as ações no sentido da Sustentabilidade (OPOKU; VALENCIA *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2019a; ZHANG *et al.*, 2019b; CROESE *et al.*, 2020).

Partindo-se desse escopo, voltado para a dinâmica urbana, destaca-se a questão dos rios e córregos urbanos. Vistos como canais para afastamento dos esgotos pela visão Higienista, tais sistemas foram e ainda vem sendo sobrepujados, perdendo seu traçado, perdendo suas várzeas para a ocupação e sendo poluídos por fontes pontuais e

difusas (CAPPS *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2017; FERREIRA *et al.*, 2018; BALTHAZARD-ACCOU; YANG *et al.*, 2019; MARTINES *et al.*, 2020). Contudo, tal tratamento em relação aos recursos hídricos urbanos tem resultado em frequentes eventos de inundação, com prejuízos de ordem social e econômica, bem como a disputas em relação ao recurso e provisão de água (SERRANO-NOTIVOLI *et al.*, 2017; XIE *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018). É nesse sentido que surgem as abordagens de Revitalização, Recuperação, Renaturalização dos rios e córregos urbanos, como tentativa de melhorar sua qualidade ambiental. Tais abordagens são então comparadas à Readequação de rios e córregos urbanos proposta. Assim, o Quadro 1 destaca os aspectos que são atendidos totalmente (verde), parcialmente (amarelo), ou não são considerados (cinza) pelos termos citados. Sua construção foi possível a partir de buscas de cada terminologia na base de dados Scopus, sendo o termo "Restauração" o mais recorrente nos artigos mais recentes (MIGUEZ *et al.*, 2015; PRIOR, 2016; BAPTISTA *et al.*, 2017; MROZIŃSKA *et al.*, 2018; BECKER; CHAPMAN; GOMES; SAMMEN; WANG; SKRINAR *et al.*, 2019; CHEN & CHO, 2019; PALMER & RUHI, 2019; BLAZY, 2019; ALENCAR & PORTO, 2019; WIKANTIYOSO *et al.*, 2020;). Percebe-se, a partir da análise dos artigos e do quadro resumo, que a proposta do termo Readequação tem o foco voltado para a funcionalidade, em termos antrópicos, dos rios e córregos urbanos, no sentido da promoção de serviços ecossistêmicos, aliado por sua vez a manutenção de uma qualidade ambiental satisfatória desses ecossistemas. Ainda, vale destacar a proposta da Readequação no sentido da segurança hídrica do ecossistema urbano (HOEKSTRA *et al.*, 2018; MAHLKNECHT; SODIQ *et al.*, 2019; WALLERSTEIN, 2020), em meio aos eventos extremos, de seca e cheias, oriundos das Mudanças climáticas em escala local (JARAMILLO & NAZEMI, 2018; JENSEN & WU, 2018; HORNE *et al.*, 2018).

QUADRO 1. Comparativo entre os termos recorrentes na literatura em relação aos rios urbanos: aspectos atendidos totalmente (verde), parcialmente (amarelo), ou não considerados (cinza).

Fonte: Autores.

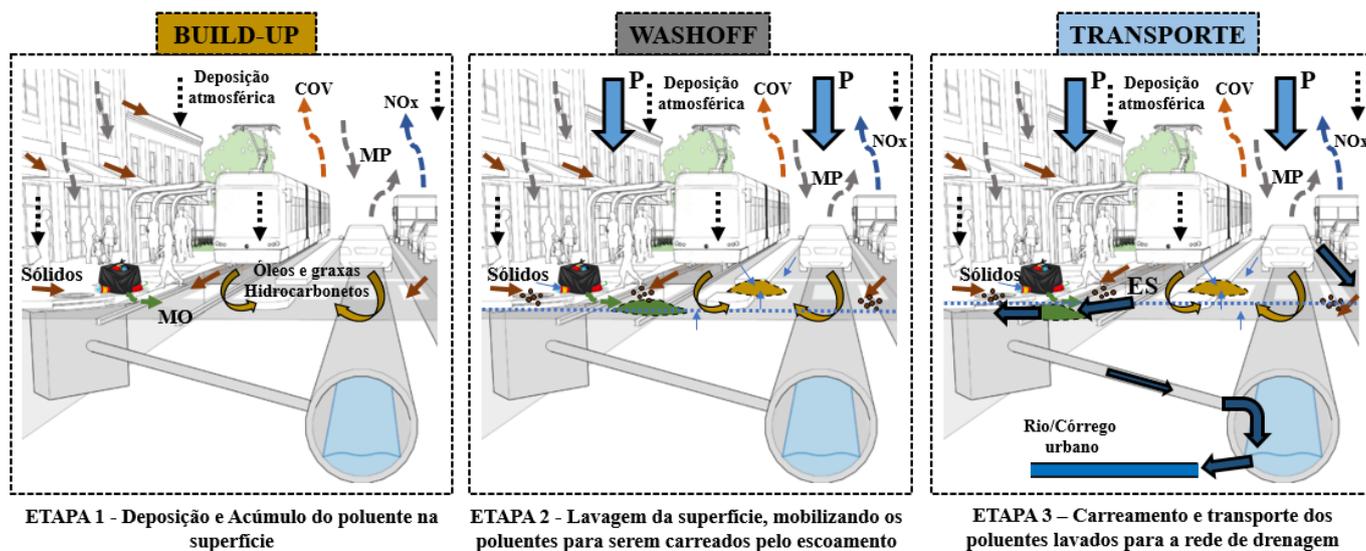
ASPECTOS	TERMOS				
	Readequação	Restauração	Revitalização	Recuperação	Renaturalização
Proporciona Lazer/ Recreação	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo
Beneficia a Drenagem Urbana	Verde	Verde	Amarelo	Cinza	Verde
Considera preceitos Ecológicos	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde
Considera a funcionalidade do rio e seus usos (termos antrópicos)	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Cinza
Considera a despoluição da água	Verde	Verde	Cinza	Verde	Verde
Considera o retorno as condições anteriores a degradação sofrida	Amarelo	Verde	Cinza	Cinza	Verde
Manutenção da fauna e flora nativa desse ecossistema	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde
Considera o tratamento dos poluentes e sedimentos carregados pelo escoamento superficial	Verde	Verde	Cinza	Cinza	Cinza
Considera ações ativas, via obras de engenharia, e os processos naturais do ecossistema para sucesso dos projetos	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

A hipótese levantada neste trabalho é de que a Readequação dos rios e córregos urbanos, como antes descrita, pode ser alcançada via adoção de sistemas de tratamento das águas urbanas. Estes, denominados aqui de Sistemas de Tratamento por Várzea Construída (STVC), levam em consideração uma nova adequação: tanto do desenho da cidade em relação ao curso d'água, como deste em relação ao ecossistema urbano. O "nova", neste caso, faz referência a adequação anteriormente sofrida pelos sistemas hídricos urbanos, motivada pelos interesses do capital imobiliário, que validou a ocupação desenfreada das várzeas, retificação dos rios e córregos, seu tamponamento e enclausuramento em estreitas faixas do espaço urbano (THOMS, 2003; AHILAN *et al.*, 2018; MARTINES *et al.*, 2020). Dessa forma, a partir da reconsideração da importância do compartimento ambiental das várzeas, permite-se um redesenho dos canais abertos antropizados, no sentido de adequar novamente esses canais em termos de sua qualidade ambiental. Portanto, defende-se aqui a terminologia de "Readequação", salientando que essa nova adequação proposta é entendida aqui como SbN e alinhada aos ODS. E, que ela tem como um dos seus objetivos corroborar para com a Resiliência urbana frente a extremos climáticos de seca e cheia (DA SILVA *et al.*, 2018).

A importância das áreas de várzea, que formam a planície de inundação dos corpos hídricos, reside na sua capacidade de suporte, sequestro e amortecimento (SCHIEMER *et al.*, 1999; THOMS, 2003). Assim, atuam como barreiras físicas filtrando e acumulando sedimentos que seriam carregados até o canal como parte da poluição difusa, podendo causar assoreamento - Figura 1.

FIGURA 1. Etapas e processos que levam a poluição difusa urbana até o sistema hídrico.

Fonte: Autores.



Seu papel como escudo e controladora dos processos físicos de adsorção, filtragem e acúmulo permite que sejam eficientes no balanço de estabilidade dos canais (MAY, 2006; GURNELL *et al.*, 2007; HUPP

et al., 2009). São áreas também que permitem o amortecimento nos eventos pluviométricos, em que o canal passa a atingir seus distintos leitos (Figura 2).

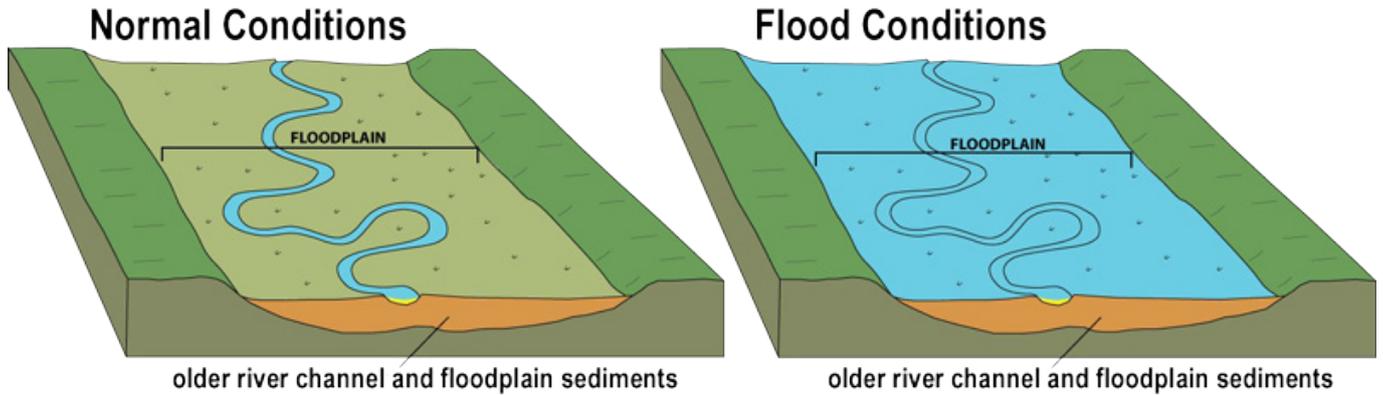


FIGURA 2. Área de várzea, planície de inundação.
Fonte: CITY OF PEACHTREE CORNERS.

Outra questão considerada no layout proposto dos STVC foram as Áreas de Preservação Permanente (APPs), previstas e asseguradas por lei, sendo até o momento definidas e reguladas pelo atual Código Florestal (2012) brasileiro. Este, mesmo que cabível de críticas, estabelece a largura das APPs que margeiam os cursos d'água (Figura 3).

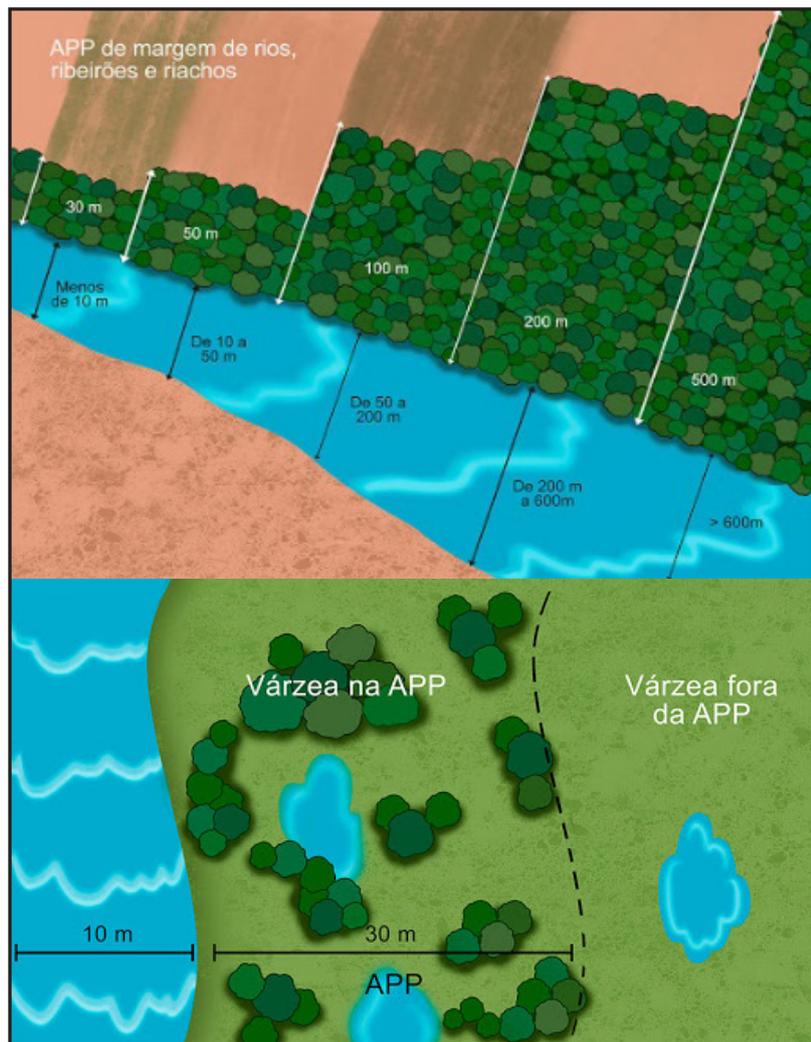


FIGURA 3. Largura da APP em função da largura da seção regular do curso d'água e faixa de Várzea.
Fonte: CARTILHA DO CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO (2012).

E, com a mudança de critério adotado, ocorre que a várzea ou pelo menos parte dela deixa de ser considerada. O que por um lado favorece o capital imobiliário, que ocupou essas áreas no passado e ainda vem ocupando, e por outro corrobora com a perda dessa porção de amortecimento das cheias. Por isso, propõem-se que os STVC sejam construídos na faixa de APP, pois sua estrutura otimiza a menor área existente – quando em comparação a área de várzea natural – buscando-se assim que o sistema apresente igual ou superior eficiência ao do compartimento natural. Isso em termos de tratamento quali-quantitativo das águas pluviais, já que a várzea ou planície de inundação natural atua tratando o escoamento, antes que ele chegue ao corpo hídrico, como também no amortecimento das cheias.

Em vista do que foi apresentado, destaca-se como hipótese de pesquisa que a utilização de Sistema de Tratamento por Várzea Construída (STVC) deve corroborar com o tratamento da poluição difusa, carreada pelo escoamento superficial, antes que este chegue ao corpo hídrico, bem como deve reter e armazenar temporariamente parte do volume escoado na bacia, contribuindo com a drenagem. O objetivo do trabalho foi então de propor uma alternativa de tratamento do escoamento superficial, em termos quali-quantitativos, a partir da consideração da função natural das áreas de várzea, da estrutura básica das biorretenções (LID) e do entendimento que os sistemas propostos se configuram como Soluções Baseadas na Natureza (SbN).

E, como sequência da pesquisa, busca-se propor a utilização da modelagem Hidrológico-Hidráulica para avaliar se os sistemas propostos são efetivos para a melhora da qualidade da água que chega aos rios e córregos urbanos, bem como quanto corroboram para o armazenamento temporário do escoamento superficial – em comparação as SbN descentralizadas na bacia urbana integradas ao sistema convencional de drenagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

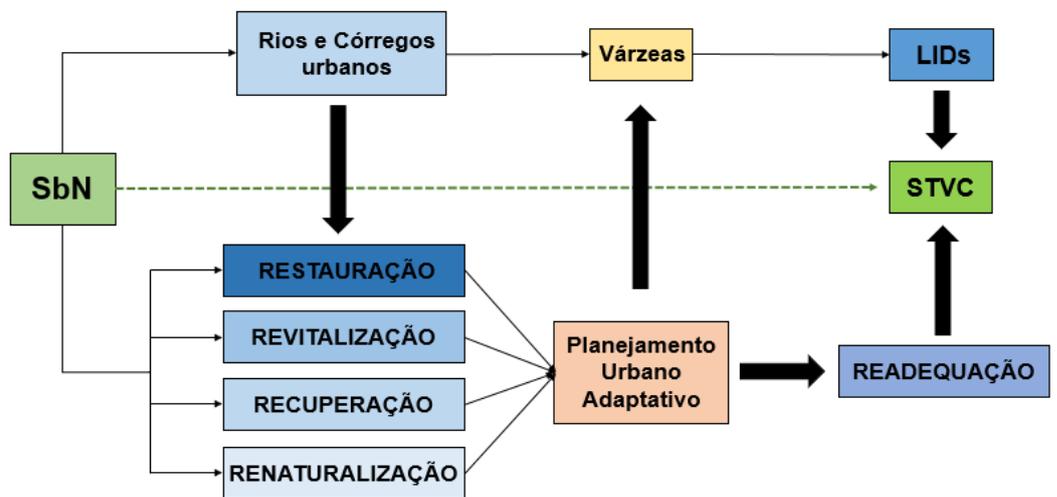
2.1 Pesquisa bibliográfica

A construção do trabalho adotou como norteadora a abordagem adaptativa, e ecossistêmica, das Soluções Baseadas na Natureza, SbN. Seu escopo foi referente aos rios e córregos urbanos, desde sua importância em termos ecológicos e socioeconômicos, até o descaso conferido pelo processo de urbanização vigente. Situação essa que motivou o estudo e verificação de quadro abordagens, que podem ser consideradas como medidas dentro das SbN: Renaturalização; Revitalização; Recuperação; Renaturalização. A revisão buscou estudar as particularidades de cada abordagem, embasando a proposta do que os autores entendem como “Readequação”, no âmbito da hidrografia urbana.

Em sintonia, e na tentativa de construção da terminologia de Readequação, foram revisadas as bases do Planejamento Urbano Adaptativo. Este, em termos da resiliência e sustentabilidade urbana, foi relacionado a abordagem da Readequação, a partir da consideração de um dos compartimentos da Geomorfologia Fluvial: as várzeas, ou planícies de inundação. Além desses foram pesquisados nas bases de dados Scopus e Web of Science artigos e trabalhos referentes aos sistemas de Desenvolvimento de Baixo Impacto, LIDs, que foram considerados para otimização das funções já desempenhadas pelas áreas de várzea.

A Figura 4 apresenta as relações e termos que foram pesquisados dentro desta etapa da metodologia aplicada no trabalho.

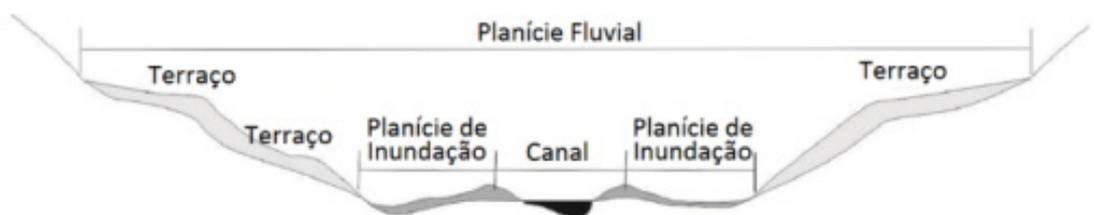
FIGURA 4. Termos e conexões traçadas para pesquisa bibliográfica.
Fonte: Autores.



2.2 Concepção para Modelagem

Com as bases da pesquisa bibliográfica feita foi possível desenvolver uma concepção de sistema que buscou aproveitar a formação geomorfológica das várzeas dos rios, que atuam no amortecimento de cheias, formando sua planície de inundação (Figura 5).

FIGURA 5. Corte transversal de uma seção fluvial.
Fonte: DA LUZ & RODRIGUES, 2020.

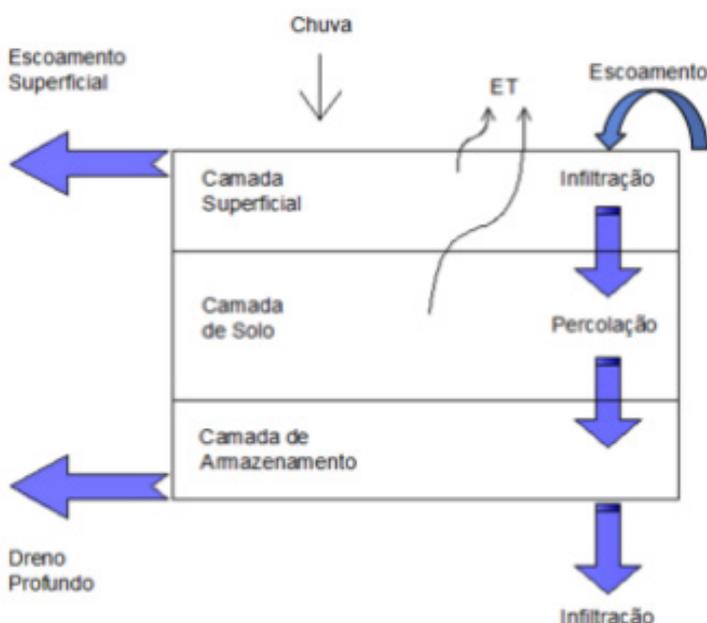


Além disso, pensando em termos de modelagem, estipulou-se uma concepção que pudesse ser verificada via simulação Hidráulico-Hidro-lógica. Assim, o trabalho estabeleceu o uso do *Storm Water Management Model*, SWMM, como software para verificação. Sua escolha deu pela versatilidade e possibilidade de simulação do fluxo nos condutos por meio do Método da Onda Dinâmica, que permite a ob-

tenção de resultados mais precisos. Desenvolvido em 1971 pela U.S. EPA (HUBER & DICKINSON, 1992), o SWMM é considerado um modelo dinâmico de chuva-vazão, que permite a simulação do escoamento produzido na bacia e as cargas poluidoras geradas. Ainda, sua versatilidade permite a simulação via eventos discretos ou através de séries históricas, dita contínua (JAMES *et al.*, 2008). Em resumo, o modelo atua através das equações de conservação da massa e quantidade de movimento para fluxo não permanente, regido pelas equações de Saint-Venant. Definiu-se ainda a aplicação do modelo pela interface do PCSWMM, da CHWater, que corresponde ao SWMM acoplado a um SIG - Sistema de Informação Geográfica. O PCSWMM permite então a calibração e validação automática do modelo, baseando-se na análise de incerteza dos parâmetros que serão fornecidos para simulação. A ferramenta presente no PCSWMM que permite tal função é a Sensitivity-based Radio Tuning Calibration - SRTC.

Ainda, dentre os processos e compartimentos físicos considerados pelo SWMM/PCSWMM, (JAMES *et al.*, 2008), destacam-se os que terão importância para a modelagem e verificação da concepção proposta: Escoamento Superficial; Infiltração; Águas Subterrâneas; Propagação de fluxos; Comportamento e evolução da qualidade da água; LIDs como SbN (GUO *et al.*; KIM *et al.*; ZHANG *et al.*, 2019). Através do software são testados os cenários descentralizados e o STVC centralizado, simulado como um reservatório linear no modelo, bem como variadas as possibilidades de simulação para verificação da melhor estratégia - se discreta ou contínua. Tais variações de abordagem permitem a comparação entre os cenários propostos.

FIGURA 6. Esquema conceitual de uma LID no SWMM/PCSWMM.
Fonte: JAMES *et al.*, 2008.



2.3 Construção de cenários

A proposição de cenários considerou basicamente a existência de sistemas SbN descentralizados de tratamento da drenagem e a proposição do STVC como medida centralizada. Dessa maneira, partindo do par "descentralizada x centralizada", foi possível construir quatro cenários para estudo e concepção, para que pudessem posteriormente ser aplicados em campo e testados via simulação. A Figura 6 apresenta o esquema de uma LID considerado pelo PCSWMM, dando ênfase aos compartimentos e sentidos do fluxo de água.

Destaca-se ainda o diferencial dos STVC em comparação as medidas estruturais comumente propostas, que são adicionadas ao

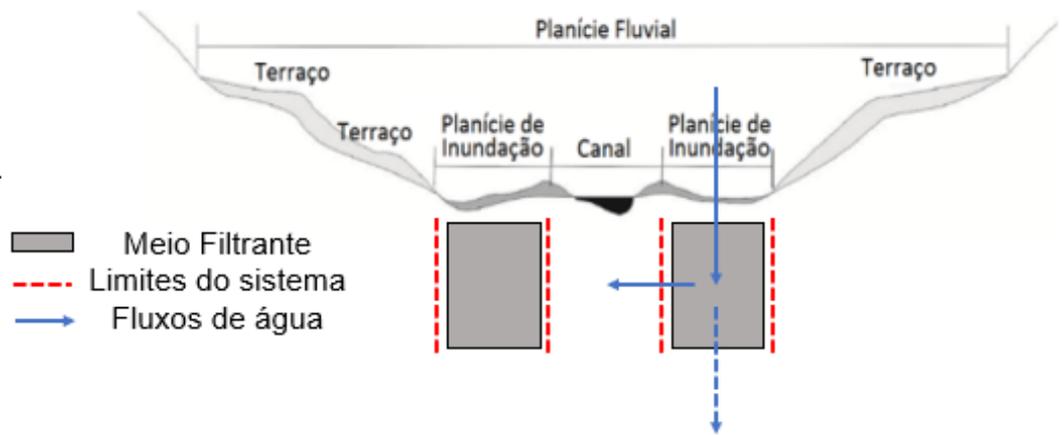
sistema convencional de drenagem de modo descentralizado na bacia urbana. Por isso, a proposição de cenários buscou considerar tal traço distintivo para estudo e verificação da eficiência apresentada em termos quali-quantitativos, quando em comparação as SbN descentralizadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Concepção

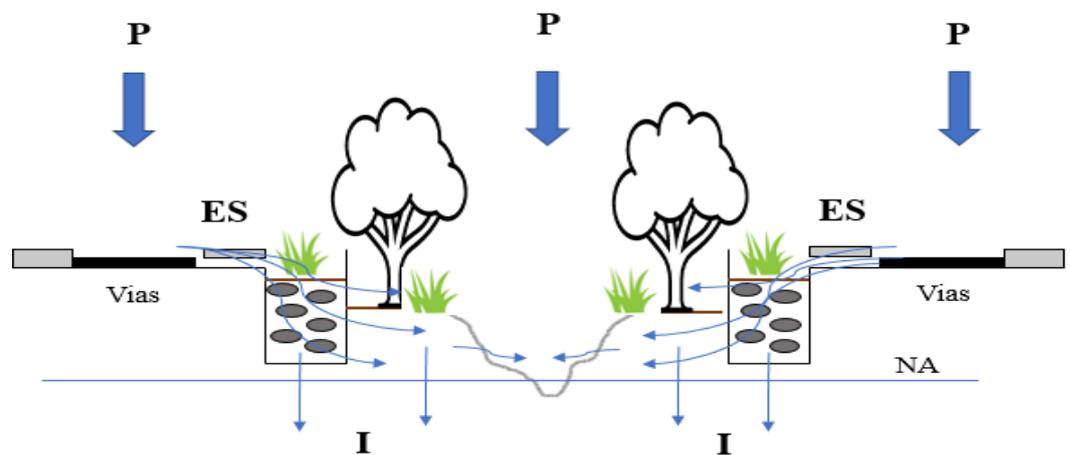
A Figura 7 ilustra esquematicamente o sistema proposto, concebido a partir das premissas apresentadas anteriormente, e sua alocação na faixa que margeia o canal.

FIGURA 7. Esquema de alocação do sistema proposto.
Fonte: Adaptado de DA LUZ & RODRIGUES, 2020.



Em complemento, objetivando atingir a Readequação como medida de adaptação para os rios e córregos urbanos, a Figura 8 apresenta o esquema de um corte transversal do canal urbano - contando com os STVC, mata ciliar, vias e infraestrutura de mobilidade urbana para os pedestres. A Figura 8 apresenta ainda as componentes do Balaço Hídrico - Precipitação, P, Escoamento Superficial, ES, e Infiltração, I. Os fluxos são destacados para evidenciar o funcionamento do sistema.

FIGURA 8. Esquema do Sistema de Tratamento proposto.
Fonte: Autores.



Já o desenho apresentado na Figura 9 destaca os compartimentos e layout adotado para o STVC, pensado de modo a atender ao binômio Tratamento+Amortecimento. Em síntese, seu funcionamento como meio filtrante se baseia estruturalmente como uma biorretenção, uma SbN. A ideia é permitir que a faixa de APP, que margeia os rios e córregos, possa ser otimizada e passe a desempenhar tanto a função de proteção do corpo hídrico como de tratamento das águas pluviais.

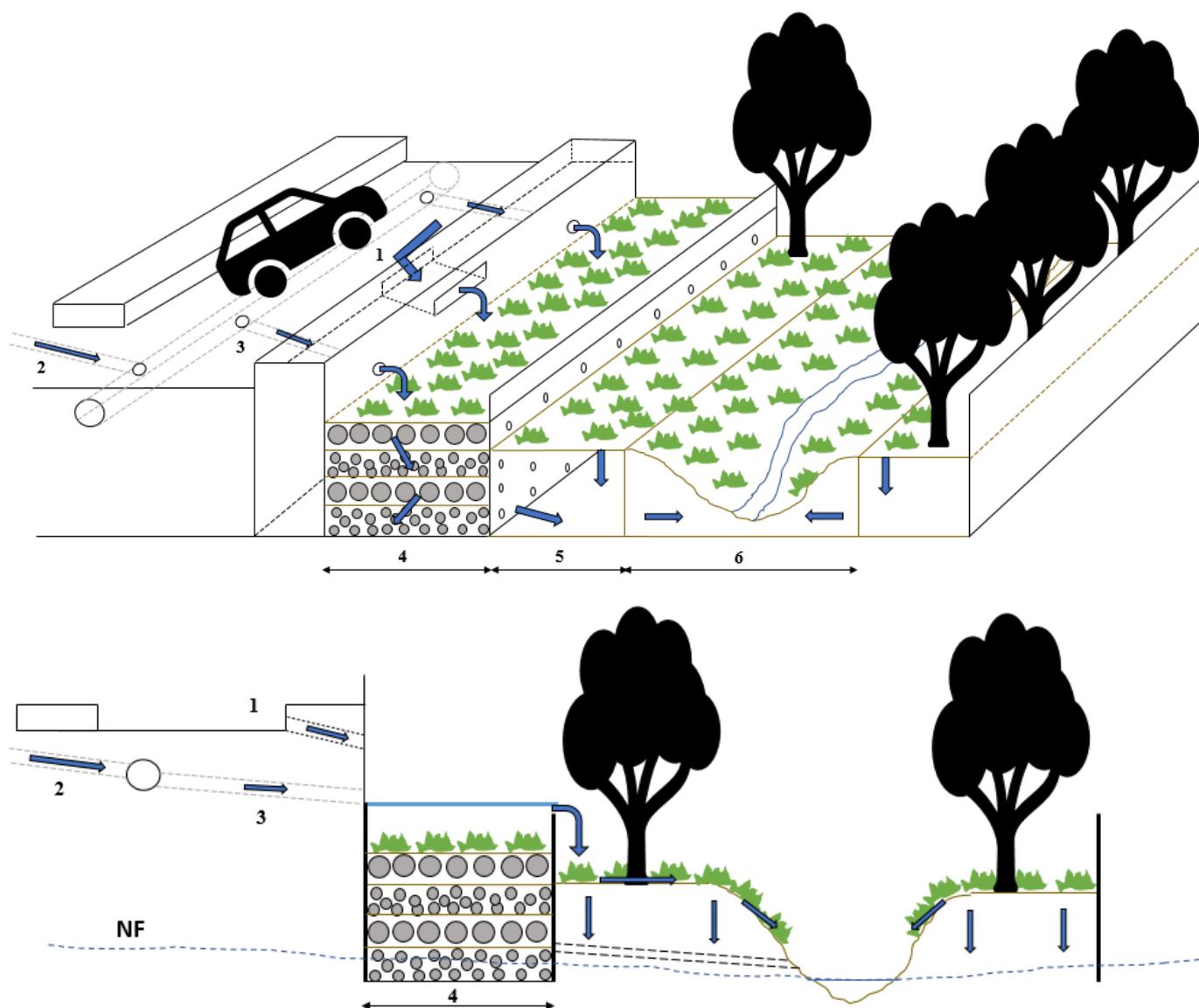


FIGURA 9. Layout dos STVC construídos da área de APP prevista por lei.
Fonte: Autores.

A numeração adotada na Figura 9 permite detalhar os compartimentos que atuam na Readequação dos rios e córregos urbanos. Assim, em termos de sistema construído têm-se apenas o compartimento "4", o STVC. Este é então formado por camadas de material filtrante - brita, areia, pedregulhos, etc. Para o compartimento são direcionados o escoamento superficial, da via, que entra por "1" no sistema e as águas pluviais, coletadas pelo sistema de drenagem urbana de montante. A combinação entre vegetação e meios filtrantes permite a filtragem e

tratamento das águas, que percolam e infiltram no sistema. Por sua vez, para o caso de saturação do STVC, são estipulados orifícios e dreno inferior que permitem o escape do volume excedente. O compartimento "5" não apresenta meio filtrante, apenas vegetação e o solo local. Assim, não se trata de um compartimento construído, mas que atua como barreira de segurança que permite o tratamento do excedente de volume, que ao percolar pelo terreno e escoar pela vegetação acaba sendo tratado. Por último está o compartimento 6, que comporta os estágios do leito fluvial possíveis de serem ocupados pelo rio ou córrego. Para realidades em que a tubulação final da macrodrenagem está muito profunda propõem-se uma adequação do STVC, como mostrado na Figura 10 - contando com um reservatório primário de amortecimento, antes de atingir o STVC propriamente dito.

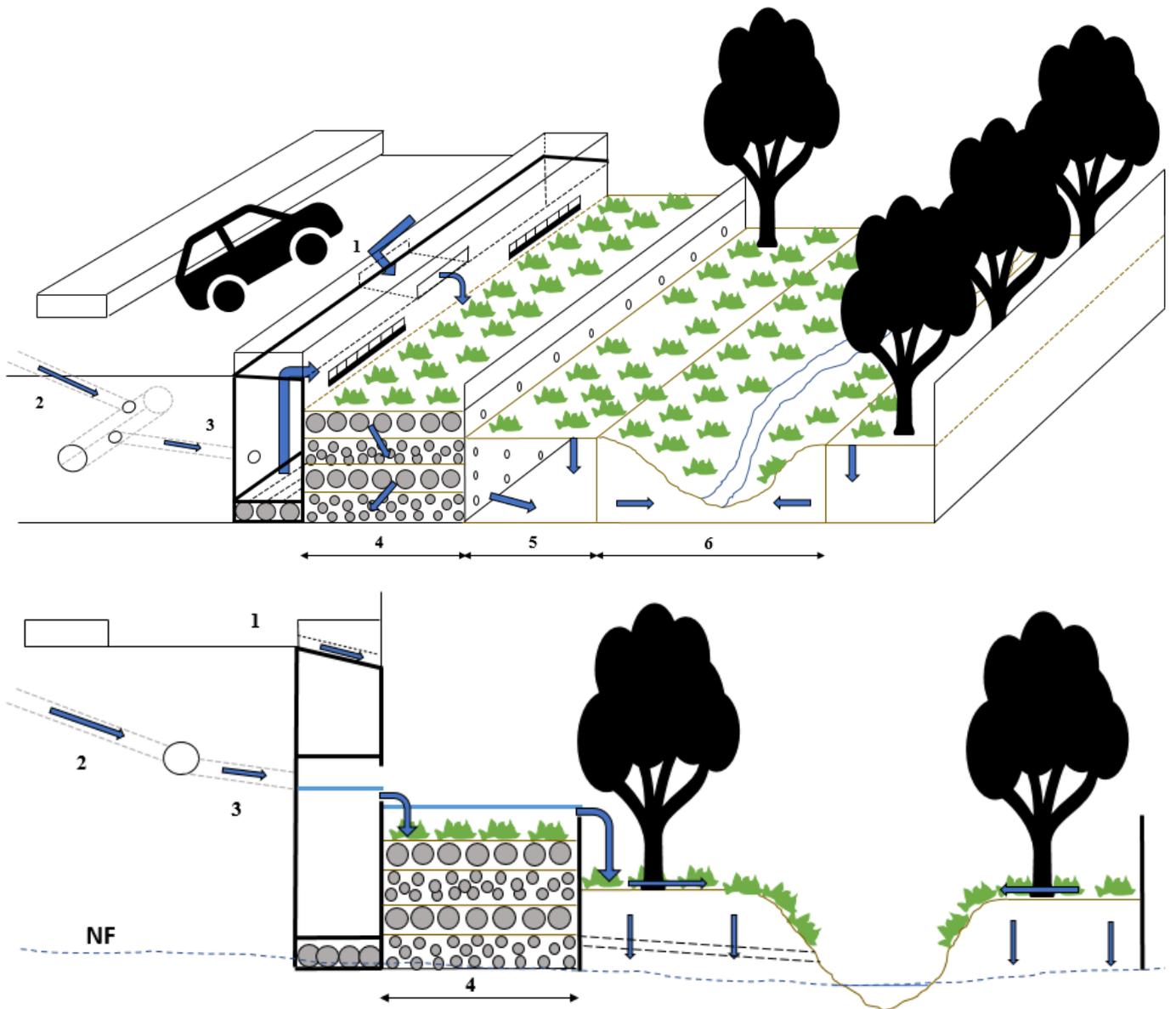


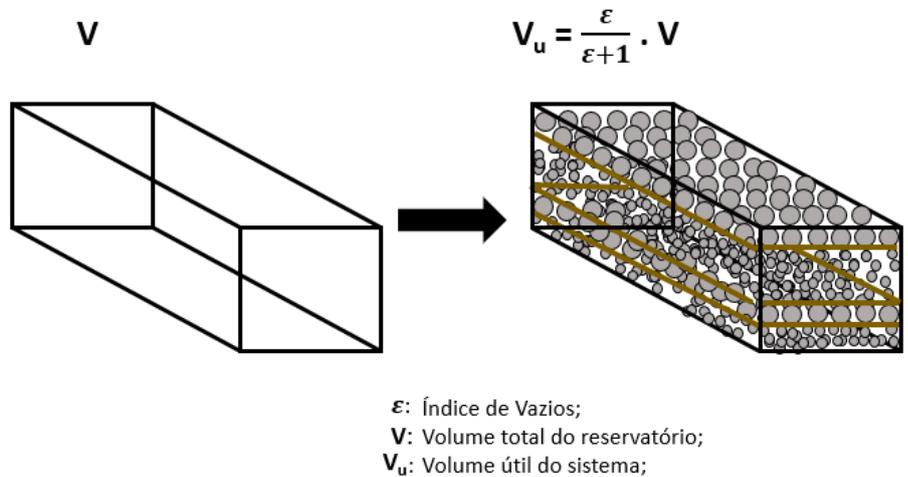
FIGURA 10. Layout considerando reservatório de amortecimento.
Fonte: Autores.

A opção pelo STVC precedido do reservatório de amortecimento se dá em função da rede de drenagem a montante já existente.

3.2 Proposição para Modelagem Hidráulico-Hidrológica

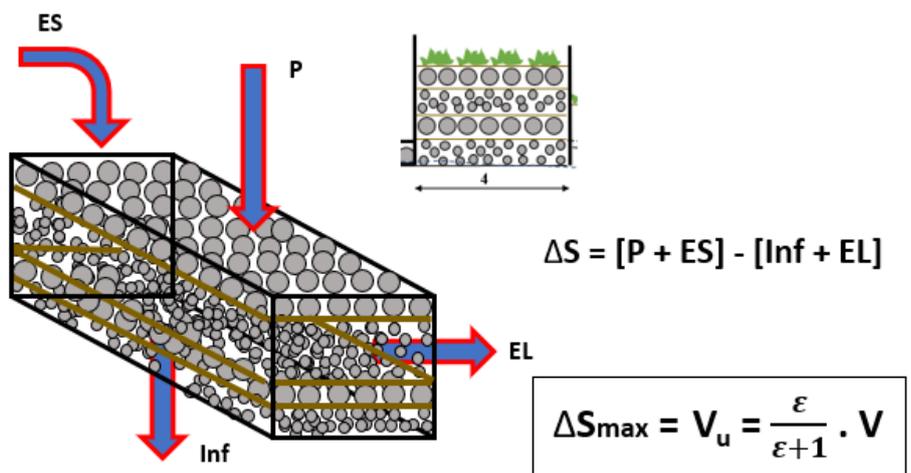
Verificadas as limitações em termos de simulação, via PCSWMM, percebeu-se que a modelagem do sistema proposto deveria ser feita como um "Reservatório Linear", e não propriamente como uma LID. Isso devido ao fato do modelo não permitir um maior controle em termos do interior destes sistemas, enquanto tratar o sistema como Reservatório Linear, preenchido com meio filtrante, permite maior controle dos fenômenos de interesse. A Figura 11 esquematiza o STVC em termos do que o SWMM/PCSWMM consegue representar.

FIGURA 11. Esquema conceitual do STVC como reservatório linear preenchido com meio filtrante.
Fonte: Autores.



E a Figura 12 apresenta o sistema em termos de balanço hídrico e seu volume efetivo, considerando o índice de vazios produzido pelo meio filtrante escolhido. Nela, P é a Precipitação, ES o Escoamento Superficial direto, Inf a Infiltração e EL ao Escoamento lateral do sistema. Já o ΔS refere-se ao armazenamento de água no volume de controle, ϵ o índice de vazios, V o volume teórico do sistema e V_u o volume efetivo.

FIGURA 12. Volume efetivo do STVC.
Fonte: Autores.



3.3 Cenários

Os cenários produzidos partiram tanto da realidade da drenagem urbana convencional, sem sistemas de tratamento, como das complementações feitas com SbN descentralizadas e o STVC proposto. Assim, na Figura 13, são representados elementos da micro e macrodrenagem, sendo que convencionalmente as bocas-de-lobo recebem o escoamento superficial e o transportam até o curso d'água sem qualquer tratamento da carga de poluição difusa.

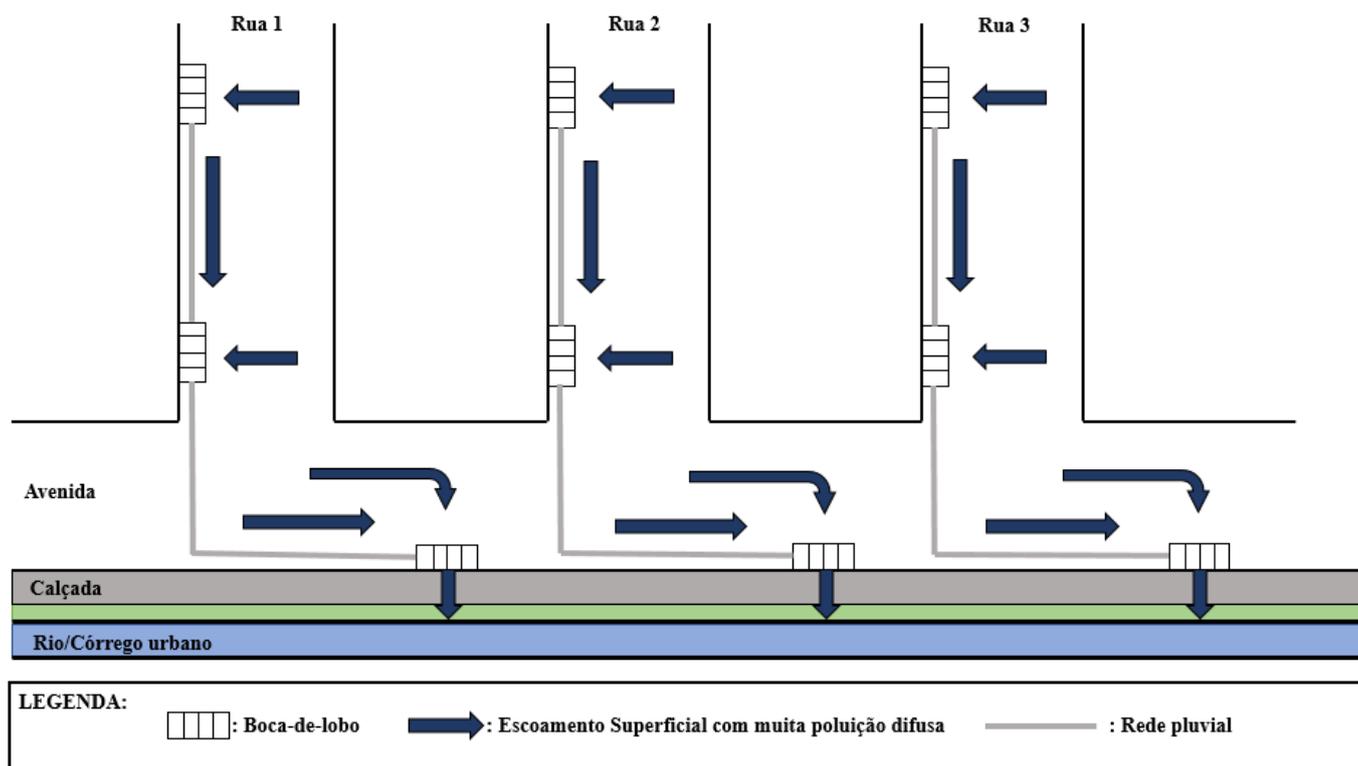


FIGURA 13. Esquema do sistema convencional de micro e macrodrenagem urbana.
Fonte: Autores.

Este primeiro cenário, convencional, indica a carga de poluição difusa que é recebida pelo sistema hídrico. Como verifica-se tal articulação do traçado da rede de drenagem é representativa da realidade brasileira e de inúmeros países. Neste caso as sarjetas e bocas-de-lobo atuam como direcionadores do fluxo, que é liberado diretamente no rio ou córrego urbano.

O cenário 2 por sua vez já passa a considerar melhorias no sistema, em nível descentralizado. Assim, a Figura 14 apresenta a troca das bocas-de-lobo convencionais por sistemas LIDs, sejam eles canteiros pluviais, trincheiras de infiltração, biorretenções, etc. (FLETCHER et al., 2015). Nesse cenário tais SbN são dispostas apenas no começo da rede drenagem, nas cabeceiras do sistema. Esta opção acaba por tratar o escoamento nesses pontos, mas, quando utilizado em complemento a rede de drenagem convencional, há risco de que o escoamento tratado seja novamente poluído pelos fluxos provenientes das vias que margeiam o canal urbano.

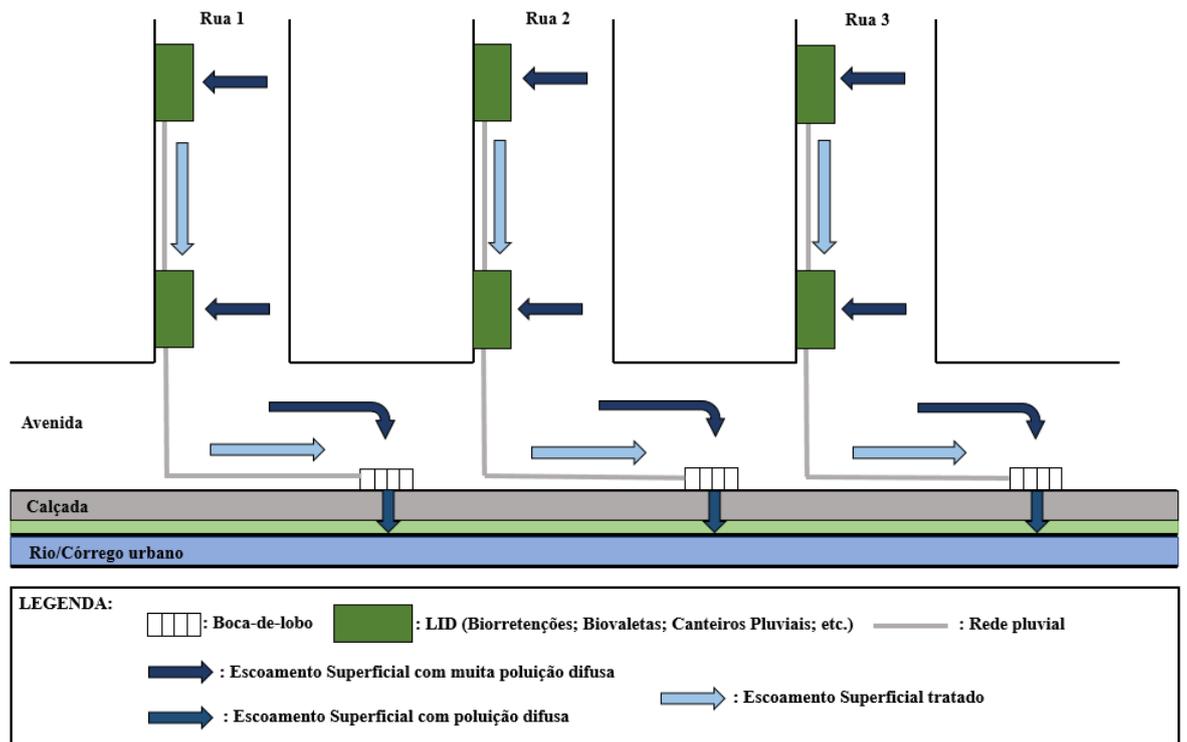


FIGURA 14. Adoção de SbN combinadas ao sistema convencional de micro e macrodrenagem. Fonte: Autores.

O cenário 3 em teoria corrige parcialmente as falhas do cenário 2, em termos da poluição do escoamento próximo ao canal. Consideram-se então SbN distribuídas pela rede de drenagem, o que permite que margeiem também o canal que recebera o escoamento (Figura 15).

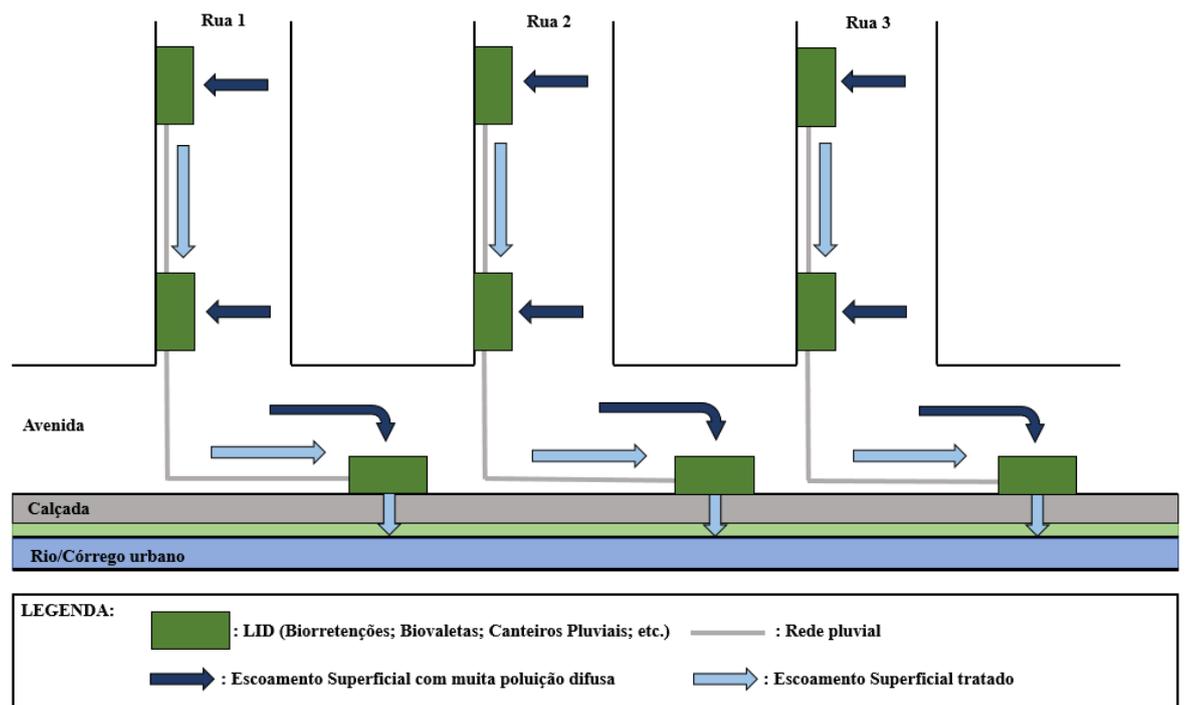
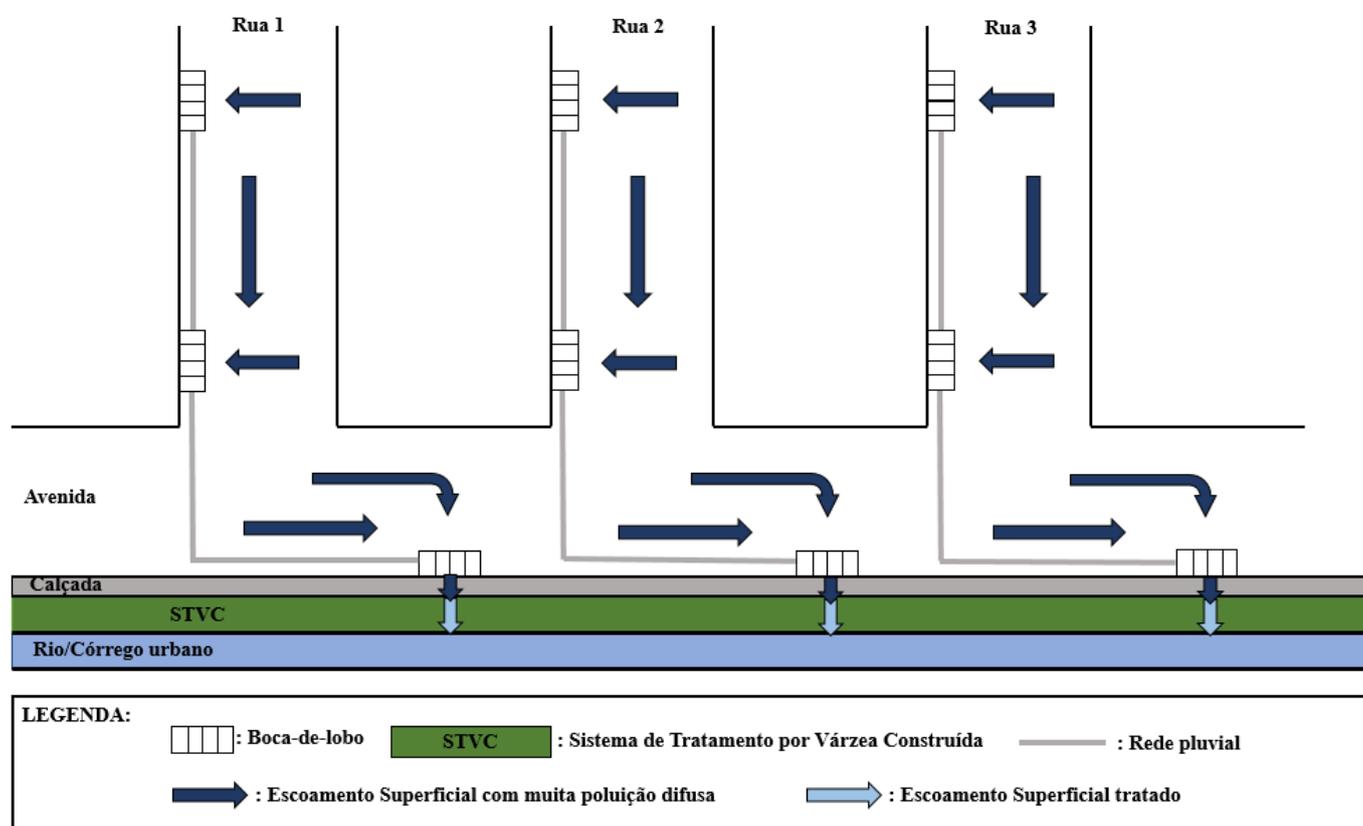


FIGURA 15. Esquema teórico de adoção das SbN em substituição as entradas e saídas do sistema convencional de micro e macrodrenagem urbana. Fonte: Autores.

E, neste caso, a alocação de SbN margeando o canal permite que tratem também a entrada de escoamento nesses pontos, que no cenário 2 atuavam como fontes de nova poluição para o escoamento já antes tratado.

Em comparação aos cenários 2 e 3, de adoção de SbN descentralizadas e distribuídas pela bacia urbana, apresenta-se o cenário 4. Este, considera a existência apenas dos STVC, que margeiam o canal, instalados em sua área de APP (Figura 16). Esta concepção pode requerer menores alterações na rede de drenagem já existente, o que beneficiaria a alternativa em termos de custo de adequação. Contudo, são necessários estudos de alternativa para verificar se esta hipótese se verifica.

FIGURA 16. Esquema de manutenção do sistema de drenagem urbana existente ao STVC proposto.
Fonte: Autores.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos e apresentados anteriormente foram condizentes com os objetivos do trabalho, em termos da proposição de um sistema de tratamento da drenagem como SbN. Ainda, a pesquisa permitiu a proposição de uma fase complementar, referente a modelagem do STVC proposto, pela interface do software PCSWMM. Fase essa que deverá considerar os cenários aqui estipulados, de modo a permitir a verificação da melhor eficiência quali-quantitativa em termos das abordagens descentralizadas ou centralizada, via STVC. Contudo salienta-se

que o estudo selecionou, dentro da revisão bibliográfica feita, indícios de que o sistema proposto seja condizente com a hipótese de pesquisa levantada, mas que a não verificação em campo de um protótipo limita as conclusões decorrentes da pesquisa. Logo, destaca-se o potencial do STVC como estrutura de tratamento quali-quantitativo das águas pluviais urbanas, mas que outros estudos em escala de campo e de simulação devem ainda corroborar para sua validação como alternativa.

5. REFERÊNCIAS

AHILAN, S. et al. The influence of floodplain restoration on flow and sediment dynamics in an urban river. *Journal of Flood Risk Management*, v. 11, p. S986-S1001, 2018.

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, v. 100, n. 4, p. 341-343, 2011.

ALENCAR, J. C.; PORTO, M. F. A. Restoring, Revitalizing and Recovering Brazilian Rivers: Application of the Concept to Small Basins in the City of São Paulo, Brazil. *International Journal of Urban and Civil Engineering*, v. 13, n. 3, p. 183-189, 2019.

ALVES, A. et al. Exploring trade-offs among the multiple benefits of green-blue-grey infrastructure for urban flood mitigation. *Science of the Total Environment*, v. 703, p. 134980, 2020.

ARTMANN, M.; SARTISON, K.; VÁVRA, J. The role of edible cities supporting sustainability transformation—A conceptual multi-dimensional framework tested on a case study in Germany. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, p. 120220, 2020.

BAE, C.; LEE, D. K. Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 44, p. 101412, 2020.

BALTHAZARD-ACCOU, K. et al. Pollution of Water Resources and Environmental Impacts in Urban Areas of Developing Countries: Case of the City of Les Cayes (Haiti). In: *Environmental Health-Management and Prevention Practices*. IntechOpen, 2019.

BAPTISTA, M. N. et al. Impact of Urbanization on the Hydrodynamics of a Water Table in a Floodplain with High Potential for Renaturation. *Water Resources Management*, v. 31, n. 13, p. 4091-4102, 2017.

BECKER, N.; GREENFELD, A.; ZEMAH SHAMIR, S. Cost-benefit analysis of full and partial river restoration: the Kishon River in Israel. *International Journal of Water Resources Development*, v. 35, n. 5, p. 871-890, 2019.

BLAZY, R. Revitalization of Riverside Boulevards in Poland—A Case Study on the Background of the European Implementation. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 042102.

BOTEQUILHA-LEITÃO, A.; DÍAZ-VARELA, E. R. Performance Based Planning of complex urban social-ecological systems: the quest for sustainability through the promotion of resilience. *Sustainable Cities and Society*, p. 102089, 2020.

BUSH, J.; DOYON, A. Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? *Cities*, v. 95, p. 102483, 2019.

BUSH, J. The role of local government greening policies in the transition towards nature-based cities. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 35, p. 35-44, 2020.

- CAPPS, K. A.; BENTSEN, C. N.; RAMÍREZ, A. Poverty, urbanization, and environmental degradation: urban streams in the developing world. *Freshwater Science*, v. 35, n. 1, p. 429-435, 2016.
- CARTILHA DO CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO, 2012. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/cartilha/index.html>.
- CHAPMAN, P. The river becomes the mediator—urban river restoration creating new spaces for intercultural dialogue and mediation. *Comunicação e sociedade*, n. Special Issue, p. 199-211, 2019.
- CHEN, W. Y.; CHO, F. H. T. Environmental information disclosure and societal preferences for urban river restoration: Latent class modelling of a discrete-choice experiment. *Journal of cleaner production*, v. 231, p. 1294-1306, 2019.
- CITY OF PEACHTREE CORNERS, Georgia - EUA. Disponível em: <https://www.peachtreecornersga.gov/government/public-works/stormwater/floodplain-management?navid=414>.
- CROESE, S.; GREEN, C.; MORGAN, G. Localizing the Sustainable Development Goals Through the Lens of Urban Resilience: Lessons and Learnings from 100 Resilient Cities and Cape Town. *Sustainability*, v. 12, n. 2, p. 550, 2020.
- DA LUZ, R. A.; RODRIGUES, C. O processo histórico de ocupação e de ocorrência de enchentes na planície fluvial do rio Pinheiros de 1930 até os dias atuais. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, v. 24, n. 2, p. 340-360, 2020.
- DA SILVA, C. V. F. et al. Climate change impacts and flood control measures for highly developed urban watersheds. *Water*, v. 10, n. 7, p. 829, 2018.
- DROSOU, N. et al. Key factors influencing wider adoption of blue-green infrastructure in developing cities. *Water*, v. 11, n. 6, p. 1234, 2019.
- DUSHKOVA, D.; HAASE, D. Not Simply Green: Nature-Based Solutions as a Concept and Practical Approach for Sustainability Studies and Planning Agendas in Cities. *Land*, v. 9, n. 1, p. 19, 2020.
- FEAGAN, M. et al. Redesigning knowledge systems for urban resilience. 2019.
- FERREIRA, C. S. S.; WALSH, R. P. D.; FERREIRA, A. J. D. Degradation in urban areas. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 5, p. 19-25, 2018.
- FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.
- GOMES, R. P. et al. Evaluation of the raw water quality: physicochemical and toxicological approaches. *Environmental geochemistry and health*, v. 41, n. 6, p. 2425-2442, 2019.
- GUO, Xiaochen et al. Modelling low impact development in watersheds using the storm water management model. *Urban Water Journal*, v. 16, n. 2, p. 146-155, 2019.
- GURNELL, A.; LEE, M.; SOUCH, C. Urban rivers: hydrology, geomorphology, ecology and opportunities for change. *Geography compass*, v. 1, n. 5, p. 1118-1137, 2007.
- HE, C. et al. Environmental degradation in the urban areas of China: Evidence from multi-source remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, v. 193, p. 65-75, 2017.
- HOEKSTRA, A. Y.; BUURMAN, J.; VAN GINKEL, K. C. H. Urban water security: A review. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 5, p. 053002, 2018.

- HORNE, J.; TORTAJADA, C.; HARRINGTON, L. Achieving the Sustainable Development Goals: improving water services in cities affected by extreme weather events. *International Journal of Water Resources Development*, v. 34, n. 4, p. 475-489, 2018.
- HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1992.
- HUPP, C. R.; PIERCE, A. R.; NOE, G. B. Floodplain geomorphic processes and environmental impacts of human alteration along coastal plain rivers, USA. *Wetlands*, v. 29, n. 2, p. 413-429, 2009.
- IWANIEC, D. M. et al. The co-production of sustainable future scenarios. *Landscape and Urban Planning*, v. 197, p. 103744, 2020.
- JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E.; PITT, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A. User's Guide to SWMM 5, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canadá. 2008.
- JARAMILLO, P.; NAZEMI, A. Assessing urban water security under changing climate: Challenges and ways forward. *Sustainable cities and society*, v. 41, p. 907-918, 2018.
- JENSEN, O.; WU, H. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science & Policy*, v. 83, p. 33-45, 2018.
- KIM, H. et al. Considering the effect of groundwater on bioretention using the Storm Water Management Model. *Journal of environmental management*, v. 231, p. 1270-1276, 2019.
- LA ROSA, D.; PAPPALARDO, V. Planning for spatial equity-A performance based approach for sustainable urban drainage systems. *Sustainable Cities and Society*, v. 53, p. 101885, 2020.
- LAVOREL, S. et al. Co-producing ecosystem services for adapting to climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 375, n. 1794, p. 20190119, 2020.
- MAHLKNECHT, J.; GONZÁLEZ-BRAVO, R.; LOGE, F. J. Water-Energy-Food Security: A Nexus Perspective of the Current Situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*, p. 116824, 2019.
- MARTINES, M. R. et al. Spatial segregation in floodplain: An approach to correlate physical and human dimensions for urban planning. *Cities*, v. 97, p. 102551, 2020.
- MASSOUDIEH, A.; MAGHREBI, M.; KAMRANI, B.; NIETCH, C.; TRYBY, M.; AFLAKI, S.; PANGULURI, S. A flexible modeling framework for hydraulic and water quality performance assessment of stormwater green infrastructure. *Environ. Model. Softw.* 2017, 92, 57-73.
- MAY, R. "Connectivity" in urban rivers: Conflict and convergence between ecology and design. *Technology in Society*, v. 28, n. 4, p. 477-488, 2006.
- MIGUEZ, M. G. et al. Urban floods in lowlands—levee systems, unplanned urban growth and river restoration alternative: a case study in Brazil. *Sustainability*, v. 7, n. 8, p. 11068-11097, 2015.
- MROZIŃSKA, N. et al. Water Quality as an Indicator of Stream Restoration Effects—A Case Study of the Kwacza River Restoration Project. *Water*, v. 10, n. 9, p. 1249, 2018.
- OPOKU, A. Biodiversity and the built environment: Implications for the Sustainable Development Goals (SDGs). *Resources, Conservation and Recycling*, v. 141, p. 1-7, 2019.

PAIVA, M. P.; SCHICCHI, M. C. da S. O conceito de resiliência urbana: uma ferramenta para a análise de intervenções recentes no centro histórico de São Paulo. 2019.

PALMER, M.; RUHI, A. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, v. 365, n. 6459, p. eaaw2087, 2019.

PRIOR, J. Urban river design and aesthetics: a river restoration case study from the UK. *Journal of Urban Design*, v. 21, n. 4, p. 512-529, 2016.

REZAEI, A. R. et al. A quantity-quality model to assess the effects of source control stormwater management on hydrology and water quality at the catchment scale. *Water*, v. 11, n. 7, p. 1415, 2019.

RICHERZHAGEN, C. et al. Ecosystem-Based Adaptation Projects, More than just Adaptation: Analysis of Social Benefits and Costs in Colombia. *International journal of environmental research and public health*, v. 16, n. 21, p. 4248, 2019.

RONCHI, S.; ARCIDIACONO, A.; POGLIANI, L. Integrating green infrastructure into spatial planning regulations to improve the performance of urban ecosystems. Insights from an Italian case study. *Sustainable Cities and Society*, v. 53, p. 101907, 2020.

SALAS, J.; YEPES, V. Enhancing Sustainability and Resilience through Multi-Level Infrastructure Planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 3, p. 962, 2020.

SAMMEN, S. S.; MOHAMMAD, T. A.; MAJEED, Q. G. Environmental Consideration In Flood Mitigation And River Restoration. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 022088.

SCHIEMER, F.; BAUMGARTNER, C.; TOCKNER, K. Restoration of floodplain rivers: The 'Danube restoration project'. *River Research and Applications*, v. 15, n. 1-3, p. 231-244, 1999.

SERRANO-NOTIVOLI, R. et al. Floodplain occupation and flooding in the Central Pyrenees. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, v. 43, n. 1, p. 309-328, 2017.

SIURB/FCTH. Caderno de Bacia Hidrográfica: Córrego Jaguaré. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (Organizador). São Paulo, 2016.

SKRINAR, A.; MISIK, M.; JANOTA, M. River restoration as an element in sustainable urban development. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 032031.

SODIQ, A. et al. Towards Modern Sustainable Cities: Review of Sustainability Principles and Trends. *Journal of Cleaner Production*, 2019.

SOTTO, D. et al. Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implementação. *Estud. av., São Paulo*, v. 33, n. 97, p. 61-80, Dec. 2019.

THOMS, M. C. Floodplain-river ecosystems: lateral connections and the implications of human interference. *Geomorphology*, v. 56, n. 3-4, p. 335-349, 2003.

UN General Assembly (UNGA). A/RES/70/1 Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolut 25, 1-35 (2015).

VALENCIA, S. C. et al. Adapting the Sustainable Development Goals and the New Urban Agenda to the city level: Initial reflections from a comparative research project. *International Journal of Urban Sustainable Development*, v. 11, n. 1, p. 4-23, 2019.

- VENTER, Z. S.; KROG, N. H.; BARTON, D. N. Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, v. 709, p. 136193, 2020.
- WANG, H. et al. A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city. *Science China Technological Sciences*, v. 61, n. 3, p. 317-329, 2018.
- WANG, J. et al. Discussion on the Construction of Ecological Restoration Model of Shichuan River. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. p. 012189.
- WALKER, B., SALT, D., 2006. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*. Island Press, Washington, DC.
- WALLERSTEIN, D. Food-energy-water (FEW) nexus: Rearchitecting the planet to accommodate 10 billion humans by 2050. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 155, p. 104658, 2020.
- WIKANTIYOSO, R. et al. Green City MIS as a Sustainable Urban GOS Provision Control Implementation Model. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, v. 8, n. 1, p. 160-172, 2020.
- XIE, Chen et al. Sustainable Improvement of Urban River Network Water Quality and Flood Control Capacity by a Hydrodynamic Control Approach—Case Study of Changshu City. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2017. p. 012029.
- YANG, X. et al. Fluvial terrace formation and its impacts on early human settlement in the Hanzhong basin, Qinling Mountains, central China. *Global and Planetary Change*, v. 178, p. 1-14, 2019.
- ZARI, M. P. et al. Devising urban ecosystem-based adaptation (EbA) projects with developing nations: A case study of Port Vila, Vanuatu. *Ocean & Coastal Management*, v. 184, p. 105037, 2020.
- ZHANG, J. et al. Analysis of the Effect of Low Impact Development on Urban Runoff Control Based on the SWMM Model. *Journal of Coastal Research*, v. 96, n. sp1, p. 62-67, 2019.
- ZHANG, Y.; SHAO, C.; SHI, Y. Guilin Sustainable Development City Construction Countermeasure and Idea Design for SDGs in 2030. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019a. p. 052005.
- ZHANG, X. et al. Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, v. 693, n. 13, p. 133536, 2019b.

João Pedro Coelho Belini

Mestrando Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
PPGEC-POLI-USP;

E-mail: joao.pedro.belini@usp.br;

ORCID ID: 0000-0002-0122-3981

Filipe Chaves Gonçalves

Mestrando Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
PPGEC-POLI-USP;

ORCID ID: 0000-0002-5208-8783

Joaquin Ignacio Bonnacarrère Garcia

Docente PHA-POLI-USP; Docente PPGEC-USP;

ORCID ID: 0000-0002-3852-7444

Recebido em: 09/08/2021.

Aceito em: 11/04/2022.