

Soluções Baseadas na Natureza e Resiliência Urbana: parâmetros de projeto para redes verde-azul de drenagem pluvial

Nature-Based Solutions and Urban Resilience: design parameters for green-blue stormwater management infrastructure

Soluciones Basadas en la Naturaleza y Resiliencia Urbana: parámetros de diseño para redes de drenaje pluvial verde-azul

Iago Longue Martins

Doutorando, UFES, Brasil
iagolongue.arqurb@gmail.com

Elisa Bomtempo Matos

Doutoranda, UFES, Brasil
elisabmatos9@gmail.com

Bruno Massara Rocha

Professor Doutor, UFES, Brasil
bmassara@gmail.com

RESUMO

As mudanças climáticas têm resultado em eventos extremos, como chuvas torrenciais, alagamentos diversos e deslizamentos, demonstrando a vulnerabilidade urbana diante das dinâmicas hidrológicas. O relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas enfatiza a necessidade urgente de implementar medidas para conter as mudanças climáticas, com especial atenção à redução das emissões de gases do efeito estufa até o ano de 2025. Apesar dos esforços, as emissões continuam altas e, como consequência, a crise climática se intensifica, demandando investimentos em infraestruturas resilientes. Nesse contexto, surgem estratégias de Soluções Baseadas na Natureza (SBN) como alternativas potenciais para essa problemática. As infraestruturas verde-azul, reconhecidas como uma tipologia de SBN, buscam promover serviços ecossistêmicos para restaurar processos naturais e melhorar serviços urbanos atrelados às dinâmicas e fluxos hidrológicos. Sob esse aspecto, este artigo apresenta um conjunto de parâmetros de projeto baseados em variáveis ambientais para melhorar a performance hidrológica das SBN organizadas em rede. A metodologia inclui uma revisão exploratória de literatura, destacando estratégias de drenagem verde-azul, a organização em rede dessas estratégias e o mapeamento de variáveis ambientais que impactam sua eficácia. O objetivo é elucidar aos planejadores a complexa rede de relações necessárias de serem consideradas no ato de se projetar infraestruturas urbanas baseadas em condicionantes e processos naturais. Os resultados demonstram que é necessária atenção ao processo de projeto e planejamento de infraestruturas verdes em grandes escalas, considerando as características do tecido urbano e do território biogeofísico, bem como da própria vegetação aplicada na composição dessas infraestruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Alagamentos urbanos. Mudanças climáticas. Infraestrutura verde.

SUMMARY

Climate change has resulted in extreme events such as torrential rains, various floods, and landslides, highlighting urban vulnerability to hydrological dynamics. The latest Intergovernmental Panel on Climate Change report emphasizes the urgent need to implement measures to curb climate change, with particular attention to reducing greenhouse gas emissions by the year 2025. Despite efforts, emissions remain high, and as a consequence, the climate crisis intensifies, necessitating investments in resilient infrastructure. In this context, Nature-Based Solutions (NBS) strategies emerge as potential alternatives to address this issue. Green-blue infrastructures, recognized as a typology of NBS, aim to promote ecosystem services to restore natural processes and improve urban services related to hydrological dynamics and flows. In this regard, this article presents a group of design parameters based on environmental variables to enhance the hydrological performance of NBS organized in a network. The methodology includes an exploratory literature review, highlighting green-blue drainage strategies, the network organization of these strategies, and the mapping of environmental variables impacting their effectiveness. The aim is to elucidate to planners the complex network of relationships necessary to be considered when designing urban infrastructures based on natural conditions and processes. The results demonstrate the need for attention to the design and planning process of large-scale green infrastructures, considering the characteristics of urban fabric, biogeophysical territory, and the vegetation applied in the composition of these infrastructures.

KEYWORDS: Urban flooding. Climate change. Green infrastructure.

RESUMEN

El cambio climático ha provocado eventos extremos, como lluvias torrenciales, inundaciones y deslizamientos de tierra, demostrando la vulnerabilidad urbana a la dinámica hidrológica. El informe más reciente del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático enfatiza la urgente necesidad de implementar medidas para frenar el cambio climático, con especial atención a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta 2025. A pesar de los esfuerzos, las emisiones siguen siendo altas y, como consecuencia, la crisis se intensifica, exigiendo inversiones en infraestructura resiliente. En este contexto, las estrategias de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) emergen como posibles alternativas a este problema. Las infraestructuras verde-azul, reconocidas como tipología de SBN, buscan promover servicios ecossistémicos para restaurar procesos naturales y mejorar los servicios urbanos vinculados a la dinámica y los flujos hidrológicos. En este sentido, este artículo presenta un conjunto de parámetros de diseño basados en variables ambientales para mejorar el desempeño hidrológico de las SBN organizadas en red. La metodología incluye una revisión exploratoria de literatura, destacando las estrategias de drenaje azul-verde, la organización en red de estas estrategias y el mapeo de variables ambientales que impactan su efectividad. El objetivo es aclarar a los planificadores la compleja red de relaciones necesarias a tener en cuenta al diseñar infraestructuras urbanas basadas en condiciones y procesos naturales. Los resultados demuestran que es necesario atención al proceso

de diseño y planificación de infraestructuras verdes a gran escala, considerando las características del tejido urbano y del territorio biogeofísico, así como la propia vegetación aplicada.

PALABRAS CLAVE: *Inundaciones urbanas. Cambio climático. Infraestructura verde.*

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas refletem o impacto claro das intervenções antrópicas sobre os sistemas naturais. Essas intervenções ganharam intensidade e extensividade a partir da Revolução Industrial, de modo que transformaram drasticamente o equilíbrio de diversos ciclos e dinâmicas naturais (STEFFEN et al., 2015). Assim, as mudanças climáticas têm ampliado a ocorrência de eventos extremos, como as secas prolongadas, calor intenso, chuvas torrenciais e alagamentos, o que expõe as cidades a uma gama de vulnerabilidades relacionada à água - tanto pelo seu excesso quanto pela sua falta (THORSLUND et al., 2017).

O mais recente relatório do Painel Internacional sobre as Mudanças Climáticas - IPCC, na sigla em inglês - publicado em 2022, enfatiza a urgência de ações voltadas à contenção do avanço das mudanças climáticas, destacando a necessidade de controle das emissões de gases do efeito estufa (GEE). O documento reforça que as estratégias para redução de emissões devem ser implementadas até o ano de 2025, para assegurar que o aumento da temperatura média global não ultrapasse 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais (IPCC, 2022). Entretanto, observando o panorama mundial, é possível perceber que os esforços direcionados à redução das emissões de GEE ainda não são suficientes para cumprir a meta sugerida pelo IPCC, apontando para uma tendência de continuidade de altas emissões ao longo desta década. Como consequência, espera-se que os efeitos percebidos em relação à crise climática continuem a se intensificar, demandando que as cidades invistam em intervenções e adaptações de suas infraestruturas a eventos climáticos extremos.

Nesse contexto, emergem um conjunto de estratégias e processos que buscam mimetizar ou se apoiam em dinâmicas naturais e ecossistêmicas para a adaptação e mitigação de desafios ambientais provocados pelas mudanças climáticas. Essas estratégias se referem às Soluções Baseadas na Natureza (SBN), as quais se apropriam da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos para auxiliar o ambiente construído na complementação de funções desempenhadas por suas infraestruturas cinzas (RUANGAN et al., 2020).

As infraestruturas concebidas a partir de estratégias de SBN buscam promover a interseção entre fatores urbanos e ambientais a fim de atender às demandas urbanas por drenagem e oferta de espaços livres qualificados, por exemplo. Além disso, devem favorecer a reconexão entre as interfaces urbanas e periurbanas com objetivo de restaurar e fortalecer os ecossistemas que participam do território biogeofísico em questão (RUANGAN et al., 2020).

Nesse contexto, as infraestruturas verde-azul são reconhecidas como uma tipologia de SBN, visando promover serviços ecossistêmicos para a restauração de processos naturais e urbanos atrelados às dinâmicas hidrológicas. O projeto de infraestrutura verde-azul organizadas em rede deve se basear nas condições específicas do local, incorporando um conjunto de variáveis ambientais que interferem no desempenho urbano para o processo de implementação e dimensionamento de suas estratégias (VALENTE DE MACEDO et al., 2021).

Diante dessa complexidade, torna-se importante investigar alternativas para auxiliar o desenvolvimento desse tipo de projeto, considerando estruturas conceituais e estratégicas para a definição de diretrizes. Assim, o presente artigo tem por objetivo elucidar aos planejadores a complexa rede de relações necessárias de serem consideradas no ato de se projetar infraestruturas urbanas baseadas em condicionantes e processos naturais, por meio de um mapeamento de parâmetros de projeto pautados em variáveis ambientais para potencializar a performance hidrológica das SBN. Espera-se que a observância dessas variáveis auxilie no planejamento de infraestruturas resilientes a eventos climáticos extremos, preservando a sua capacidade de contribuir para a mitigação de problemas ambientais mesmo sob condições atípicas.

2 METODOLOGIA

A metodologia delineada para esta pesquisa compreende uma revisão exploratória de literatura, a qual não pretende esgotar a temática selecionada para investigação, mas, sim, contribuir para a produção de novos conhecimentos a partir do debate e da análise de conceitos previamente apresentados (GIL, 2002). Tal metodologia foi estruturada em três etapas principais, voltando-se à compreensão dos mecanismos de drenagem verde-azul e de suas estratégias de implementação em ambientes urbanos consolidados.

Na primeira etapa, o foco foi direcionado à compreensão das estratégias comumente empregadas em mecanismos e infraestruturas de drenagem verde-azul e em como elas são aplicadas no meio urbano. Essa análise foi realizada por meio de uma revisão abrangente de pesquisas acadêmicas acerca de estratégias baseadas na natureza, como telhados verdes, pavimentos permeáveis e arborização urbana. O material foi coletado a partir de buscas em bases de dados científicas, como *Web of Science* e *Science Direct*, utilizando como descritores as palavras-chave em inglês "*nature-based solutions*", "*blue-green infrastructure*" e "*urban flooding*". As buscas foram organizadas em duas sintaxes de pesquisa distintas: (1) "*nature-based solutions*" AND "*blue-green infrastructure*" AND "*urban flooding*" - a fim de localizar trabalhos que aplicassem as SBN como estratégias de drenagem verde-azul; e (2) "*nature-based solutions*" OR "*blue-green infrastructure*" AND "*urban flooding*" - para expandir o campo de análise tanto para o contexto específico de aplicação das SBN para lidar com os desafios dos alagamentos urbanos, quanto para a utilização das infraestruturas verde-azul para essa mesma finalidade.

A seleção de documentos se deu a partir da identificação de pesquisas compatíveis com o objetivo deste artigo. Na sequência, tais publicações foram examinadas a fim de mapear as estratégias mais eficazes para o gerenciamento de águas pluviais, para a recuperação e preservação da biodiversidade e demais desdobramentos positivos para o ambiente urbano, como através da qualificação dos espaços livres.

A segunda etapa metodológica foi desenvolvida a partir das informações coletadas na revisão exploratória de literatura. Nessa etapa, foi proposta uma metodologia de organização em rede das estratégias de SBN mais utilizadas nas pesquisas selecionadas, considerando nesse processo a caracterização do tecido construído e as especificidades de cada estratégia. A

intenção desta etapa foi estabelecer diretrizes para a criação de redes de drenagem verde-azul eficientes, integrando o espaço construído aos elementos naturais que compõem a paisagem local.

Por fim, a terceira etapa metodológica se concentrou no mapeamento das variáveis ambientais que impactam a performance hidrológica das estratégias de drenagem verde-azul organizadas e descritas anteriormente. Características topográficas, cobertura e uso do solo, padrões de precipitação sobre o território e a própria configuração urbana foram incluídos para compreender as interações complexas entre essas variáveis e o desempenho das estratégias de SBN. Através da listagem dessas variáveis, pretende-se contribuir para o planejamento de infraestruturas de drenagem urbana sustentável, conectando-as às dinâmicas inerentes ao território biogeofísico, por vezes suprimidas ou descaracterizadas pela instalação de infraestruturas edificadas (DA-SILVA ROSA et al., 2018).

Além disso, ao abordar esses procedimentos teórico-conceituais de forma integrada, a presente pesquisa possibilita oferecer *insights* para a implementação sustentável e eficiente das Soluções Baseadas na Natureza na gestão de águas pluviais em ambientes urbanos consolidados, os quais, geralmente, encontram os maiores desafios durante o processo de adaptação às mudanças climáticas. Desse modo, a abordagem adotada visa contribuir para a construção de cidades mais resilientes e ecologicamente equilibradas, condições fundamentais para o enfrentamento das questões climáticas de nosso tempo.

3 RESULTADOS

3.1 Panorama das Soluções Baseadas na Natureza

As Soluções Baseadas na Natureza compreendem um conjunto de estratégias orientadas ao aproveitamento de serviços prestados pela vegetação e pelos ecossistemas em prol da mitigação e adaptação aos desafios impostos pelas mudanças climáticas (MARAGNO et al., 2018). Sob uma ótica simplificada, as SBN podem ser descritas como uma mescla entre os conceitos e estratégias vinculados às infraestruturas verdes e à adaptação baseada em ecossistemas enquanto medidas para responder aos riscos hidrometeorológicos desencadeados por variáveis diversas, como as características de ocupação do território e os processos climáticos (RUANGAN et al., 2020).

Nesse sentido, as SBN podem ser categorizadas a partir de três vertentes: (1) estratégias voltadas à recuperação e proteção de ecossistemas naturais ou protegidos; (2) estratégias voltadas à sustentabilidade e à gestão multifuncional de ecossistemas; e (3) estratégias de projeto e gestão de novos ecossistemas (EGGERMONT et al., 2015). Considerando as categorias mencionadas, o escopo de exploração desta pesquisa se concentra sobre a segunda vertente, ocupando-se em contribuir para estruturação de procedimentos e mecanismos para a gestão de águas pluviais urbanas.

Nesta vertente, as SBN são organizadas a partir do seu porte, considerando estratégias de pequena ou grande escala aplicáveis à redução do risco hidrometeorológico. As estratégias de pequena escala tratam dos níveis da edificação e das ruas, enquanto que aquelas voltadas a

grandes escalas abarcam o nível urbano e regional. Ambas tipologias incorporam técnicas que replicam sistemas e processos naturais, como a infiltração e evapotranspiração. Dessa forma, elas incluem uma variedade de práticas, tais como telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis, e alagados construídos. Essas estratégias utilizam a vegetação e processos inspirados em diferentes ecossistemas para a redução do volume e da velocidade do escoamento das águas pluviais a fim de favorecer a sua infiltração no solo (MABROUK et al., 2023).

Conforme apresentado no Quadro 1, as estratégias de SBN voltadas à gestão hidrometeorológica aplicam, de modo geral, infraestruturas que contenham vegetação e pavimentação permeável em edificações, vias e áreas mais abrangentes de tecido urbano visando recuperar as propriedades naturais de percolação e interceptação pluvial (PRUSKI et al., 2014). Com isso, tais estratégias buscam mitigar os impactos da impermeabilização e artificialização excessivas alcançadas através da urbanização. Atendo-se especificamente à questão do porte, as estratégias para pequenas escalas se constituem de mecanismos menos complexos, se comparados àqueles que incidem sobre a escala urbana e regional. Por esse motivo, as estratégias para pequenas escalas, como telhados verdes e jardins verticais, têm sido mais exploradas nos últimos anos (ASARE et al., 2023; COSTA et al., 2021).

Quadro 1- Estratégias para Soluções Baseadas na Natureza

Soluções SBN	Escala	Características gerais
Alagados construídos	Cidade	Corpos d'água a céu aberto concebidos para manter uma reserva permanente de água. Quando gerenciados de maneira apropriada, esses corpos d'água têm o potencial de aprimorar o microclima, promover a recuperação das águas subterrâneas e contribuir para a estética das áreas de lazer.
Biovaletas	Rua/ Cidade	Depressões lineares contíguas a uma superfície pavimentada, dotadas de plantio de espécies múltiplas capazes de resistir a inundações regulares.
Canteiros pluviais	Rua/ Cidade	Depressões lineares e superficiais (como vasos ou áreas) com leitos selados, repletas de solo fértil e abundantemente plantadas com vegetação hidrofílica.
Captação de água da chuva	Edifício/ Cidade	A captação da água pluvial ocorre no topo da estrutura e é direcionada para uma cisterna, poço de interceptação, aquífero ou reservatório com sistema de percolação.
Corredores verdes	Cidade/ Região	Os corredores verdes são faixas de espaço verde linear que têm a capacidade de oferecer serviços de conectividade, abrangendo desde habitats naturais até trajetos recreativos.
Jardins de chuva	Edifício/ Cidade	Pequenas áreas rebaixadas e recipientes, que abrigam vegetação resistente a inundações, são utilizados para coletar águas pluviais, visando seu reaproveitamento ou infiltração no solo.
Jardins verticais	Edifício	Técnica de incorporação da vegetação em paredes, cercas e outras estruturas verticais, utilizando vinhas ou plantas em vasos.
Pavimento permeável	Rua/ Cidade	Áreas de superfície plana e com leve inclinação construídas a partir de materiais porosos, tais como cascalho, pedras, gramado, grades ecológicas preenchidas com grama ou cascalho, entre outras opções.
Telhados verdes	Edifício	Técnica de desenvolvimento para coberturas de telhados e tetos, consistindo em diversas camadas de substrato que proporcionam um ambiente propício para o crescimento da vegetação.

Fonte: Adaptado de MABROUK et al., 2023 e MORAES et al., 2020.

A eficácia dessas estratégias estão atreladas à proporção e à frequência dos eventos de precipitação, uma vez que quanto mais intensa a pluviosidade, mais rapidamente essas infraestruturas atingem o estágio de saturação, reduzindo a sua capacidade de interceptação pluvial. Conseqüentemente, elas contribuem menos para a contenção do escoamento superficial. Diante desse aspecto, as estratégias aplicadas na escala do edifício, como os telhados verdes e os jardins verticais, demonstram ser mais eficazes em tempestades de menor intensidade e duração, porém, quando combinadas com outros procedimentos, como a arborização e a pavimentação permeável, podem oferecer contribuições mais significativas na redução do escoamento superficial (WELL; LUDWIG, 2020).

Já as soluções aplicáveis a grandes escalas, ou seja, aquelas que abrangem o nível urbano e regional, são essenciais para enfrentar os desafios relacionados à gestão de águas cinzas, principalmente quando considerados os impactos por alterações climáticas, uso do solo e crescimento populacional. Essas SBN proporcionam benefícios além da redução de inundações, incluindo oportunidades de recreação, *habitat* e biodiversidade, ou seja, oferecendo uma gama de serviços ecossistêmicos que beneficiam não apenas o meio urbano, como também o periurbano e rural (HAMERS et al., 2023).

3.2 Proposta de Rede de Drenagem Verde-Azul

Após a compreensão do panorama de estratégias de Soluções Baseadas na Natureza comumente utilizadas na gestão de águas pluviais urbanas e de como cada uma delas atua em diferentes escalas do tecido construído, o presente tópico se ocupa em propor uma metodologia de organização dessas estratégias em uma rede verde-azul para drenagem pluvial.

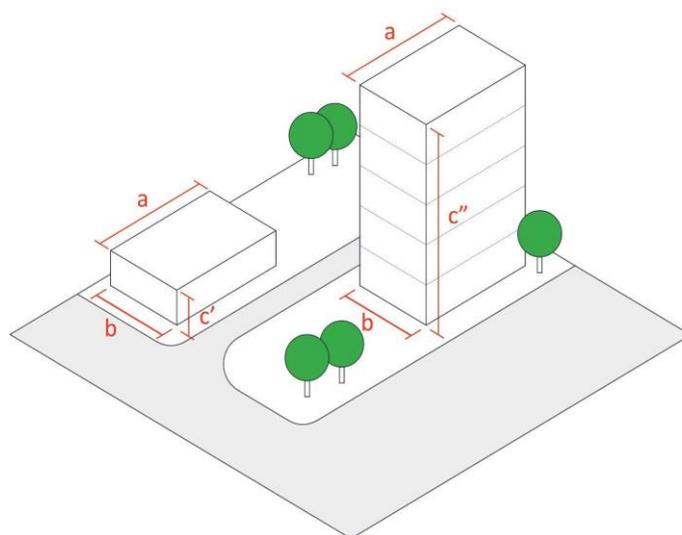
As discussões foram estruturadas em dois momentos principais. Em um primeiro momento, comenta-se a metodologia aplicada para hierarquização das estratégias de SBN, demonstrando como cada uma delas pode se conectar durante a transposição dos níveis de organização do tecido construído. Isso permite que o volume de escoamento superficial gerado em meio urbano possa ser progressivamente absorvido ao longo do percurso. Ao mesmo tempo, o volume excedente é drenado para fora do território urbano e acomodado em alagados construídos.

Em um segundo momento, a abordagem se volta à demonstração de um passo a passo para a implementação dessa rede de drenagem no tecido construído, observando suas características morfológicas e topográficas. A apresentação desse tipo de *framework* auxilia na adequação da metodologia proposta em diferentes configurações urbanas, respeitando as especificidades das condições locais.

Iniciando pela estruturação em rede das estratégias de SBN, toma-se como ponto de partida a dimensão da edificação. Na edificação, pode-se trabalhar com os telhados verdes, auxiliando na contenção do escoamento superficial gerado na cobertura dos edifícios, o que reduz a pressão sobre os sistemas de drenagem urbana (MORAES et al., 2020). Além disso, os jardins verticais também podem ser aplicados como uma alternativa para conter o escoamento superficial gerado nas fachadas (MAJIDI et al., 2019), principalmente em edificações verticalizadas cujas áreas de fachada são mais expressivas que a área de cobertura (Figura 1).

Figura 1 - Esquema de dimensionamento do fluxo de escoamento superficial em coberturas e fachadas
Escoamento Superficial (Q_{max}) = Intensidade de Precipitação (I_m) x Área (A) x ...

↑ A = ↑ Q_{max}



Se:
 $a \times b > b \times c'$
 $a \times b > a \times c'$

Logo:
 $Q_{max} a \times b > Q_{max} b \times c'$
 $Q_{max} a \times b > Q_{max} a \times c'$

Se:
 $b \times c'' > a \times b$
 $a \times c'' > a \times b$

Logo:
 $Q_{max} b \times c'' > Q_{max} a \times b$
 $Q_{max} a \times c'' > Q_{max} a \times b$

Fonte: AUTORES, 2024.

Conforme demonstrado pela Figura 1, em edificações muito verticalizadas, as fachadas contribuem mais para a formação do escoamento superficial do que a própria cobertura. Ao considerar que as edificações correspondem a grande parte da área do tecido urbano, a redução do escoamento superficial através da aplicação dessas estratégias a nível da edificação contribui consideravelmente para o controle dos alagamentos em toda a esfera urbana (MARTINS, 2022).

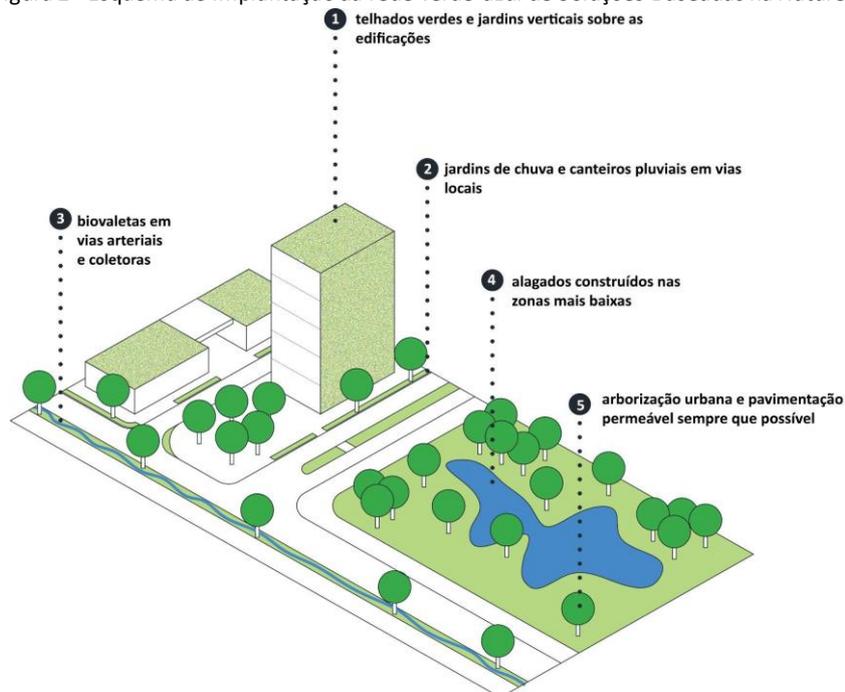
Partindo para a escala das ruas, é nessa dimensão que as estratégias implementadas assumem o caráter de rede, uma vez que as ruas e demais infraestruturas de circulação podem auxiliar na conexão entre diferentes elementos e estruturas dispostas ao longo do tecido urbano. Devido a sua morfologia linear, infraestruturas como os jardins de chuva, biovaletas e canteiros pluviais são apropriadas para instalação nesses ambientes urbanos. Essas estratégias auxiliam não apenas na abertura de áreas permeáveis em meio à pavimentação necessária para a funcionalidade viária, como também contribuem para a drenagem do volume excedente de águas cinzas, funcionando como rios temporários (ALENCAR et al., 2022).

Por se constituírem como canais permeáveis, ao contrário dos dutos de drenagem pluvial das infraestruturas cinzas, essas infraestruturas lineares de SBN contribuem para que o volume de escoamento superficial gerado em meio urbano infiltre progressivamente no solo ao longo do percurso da água. Esse processo contribui para a recarga do lençol freático em meio urbano, além de reduzir a exposição aos alagamentos pluviais (MENDES; PINA, 2023).

Ao fim do percurso das infraestruturas lineares de drenagem verde-azul, sugere-se a implantação dos alagados construídos (VASCONCELLOS, 2015). Isso pode ser feito tirando partido da própria topografia do local, como, por exemplo, em cotas mais baixas, além da presença de parques contidos no tecido urbano. Essa estratégia visa reacomodar o volume excedente de águas pluviais que não foi capaz de infiltrar no solo através da mimetização da função ecossistêmica dos pântanos, contribuindo para o armazenamento temporário de águas

cinzas. Isto posto, a Figura 2 apresenta o esquema final da estruturação da rede de drenagem verde-azul descrita anteriormente.

Figura 2 - Esquema de implantação da rede verde-azul de Soluções Baseadas na Natureza



Fonte: AUTORES, 2024.

Visando aumentar a contribuição desse tipo de sistema de drenagem compensatória, é importante combinar a instalação das estratégias descritas com a implementação de pavimentação permeável em calçadas e vias além do incremento na arborização urbana. Ambas estratégias potencializam o controle do escoamento superficial no ambiente urbano, tanto pelo aumento da capacidade de infiltração do solo, quanto pela interceptação pluvial na copa das árvores (ACOSTA; HAROON, 2021).

Partindo para a segunda etapa de discussões nesse tópico, a qual se volta à compreensão das diretrizes para a implementação dessas estratégias em grandes escalas, evidenciam-se cinco etapas principais, as quais serão comentadas e detalhadas a seguir.

Primeiramente, durante a etapa de planejamento dessas infraestruturas, deve-se (1) localizar a existência de fragmentos vegetados contidos no tecido urbano, incluindo as áreas de preservação permanente e os parques urbanos. Esses fragmentos atuam como elementos estruturais para a instalação das redes de drenagem verde-azul, possibilitando a sua reconexão com o entorno vegetado urbano e periurbano. Na sequência, é necessário (2) observar a caracterização da topografia do local, identificando as zonas contidas em cotas mais baixas, as quais, geralmente, tendem a alagar com mais facilidade. Nessas áreas, a instalação de alagados construídos é facilitada, devido ao próprio comportamento hidrológico do terreno, que tende a drenar o escoamento superficial para esses pontos.

Na sequência, deve-se (3) identificar as principais vias arteriais e coletoras para instalação das biovaletas, direcionando o fluxo de drenagem para os alagados construídos instalados dentro e fora do tecido urbano. Devido ao porte dessas vias, a implementação desse

tipo de infraestrutura robusta se torna facilitada. Para dar continuidade à distribuição da rede de drenagem verde-azul, (4) conecta-se, posteriormente, as biovaletas às vias locais, onde serão instalados os jardins de chuva e os canteiros pluviais, auxiliando na coleta do escoamento superficial desde a escala de bairro e edificações. Por fim, (5) implementam-se forrações verdes nas edificações, como os telhados verdes e jardins verticais, para a diminuir o escoamento superficial gerado no âmbito da edificação. Além disso, é necessário observar as possibilidade de incremento na arborização urbana e na introdução de pavimentos permeáveis em calçadas e vias para o complementar o ciclo de intervenção aqui descrito, reduzindo significativamente o impacto do escoamento superficial sobre o meio urbano.

3.3 Mapeamento de Variáveis

O processo de planejamento e projeto de infraestruturas multifuncionais, como a rede verde-azul de drenagem compensatória proposta nesta pesquisa, demanda atenção a uma série de variáveis que participam das dinâmicas abrangidas por esse tipo de intervenção. Iniciando pelos indicadores externos, os quais se relacionam diretamente às questões do território biogeofísico, os principais grupos de variáveis a serem observadas nesse contexto são: (1) o das variáveis meteorológicas e (2) o das variáveis topográficas.

As variáveis meteorológicas expressam as condições climáticas do local, como o regime e intensidade das chuvas que comumente se precipitam sobre a bacia analisada. Nesse sentido, é importante produzir, na etapa de análise preliminar da intervenção, um mapeamento do número de dias de precipitação a fim de estabelecer o período de retorno médio das chuvas, um panorama do volume médio das precipitações que causam alagamentos e a sua duração média em horas (ALVES et al., 2016). Por meio da identificação e mensuração dessas variáveis, é possível compreender o padrão de intensidade de chuvas que causam alagamentos em determinado lugar, bem como a sua periodicidade. Assim, ao considerar esses aspectos, as infraestruturas projetadas para compor a rede de drenagem proposta podem ser dimensionadas para atuar na compensação do volume de escoamento superficial que tende a provocar alagamentos em determinada localidade. O Quadro 2 apresenta uma relação das variáveis supracitadas e suas respectivas unidades de medida.

Quadro 2 - Variáveis Meteorológicas

Parâmetros Primários	Unidade
Número de dias de precipitação por ano	Dias (d)
Período de retorno da precipitação	Ano (a)
Média de chuvas que causam alagamentos	Milímetros (mm)
Duração média das chuvas	Horas (h)
Intensidade média das chuvas	Milímetros por hora (mm/h)

Fonte: Adaptado de ALVES et al., 2016.

As variáveis topográficas, por sua vez, se referem às características fisiográficas do território, como a altitude e a inclinação do terreno, o tipo de solo, a distribuição das microbacias e suas dinâmicas de drenagem, além dos usos e da cobertura do solo no local (VOJINOVIC et al.,

2021). Essas características são fundamentais para a compreensão do comportamento de drenagem do solo no ambiente de intervenção. Assim, é importante destacar as áreas mais impermeabilizadas, bem como aquelas mais propensas à ocorrência de alagamentos, seja devido à presença de solos mais argilosos, que possuem maiores limitações para drenagem pluvial, seja por conta das próprias características morfológicas e estruturais da bacia hidrográfica em questão. O Quadro 3 apresenta uma relação das variáveis abrangidas por essas dinâmicas e suas referidas unidades de medida.

Quadro 3 - Variáveis Topográficas

Parâmetros Primários	Unidade
Altitude	Metros (m)
Inclinação	Graus (°)
Tipo de solo	-
Cobertura e uso do solo	-
Distribuição de microbacias de drenagem	-

Fonte: Adaptado de VOJINOVIC et al., 2021.

Uma vez conhecidos os fatores externos que interferem nos processos de planejamento das infraestruturas verde-azul, o próximo passo a ser empreendido durante a etapa de planejamento se refere às características de cada tipologia de estratégia ou infraestrutura implementada. Sendo assim, é importante considerar quais são as variáveis que se relacionam e impactam a performance pluvial da arborização e demais infraestruturas vegetadas, como os jardins chuva e canteiros pluviais, analisando, também, o tipo de vegetação aplicado e suas características de folha e de estrutura vegetal. O Quadro 4 apresenta uma síntese desses aspectos.

Quadro 4 - Variáveis de Arborização e Vegetação

Estratégia	Parâmetros primários	Parâmetros secundários
Árvore /Vegetação	Características físicas da arborização/vegetação	Densidade da copa/vegetal
		Diâmetro da copa/vegetal
		Altura da árvore/vegetal
		Altura do tronco
		Textura do tronco
	Projeto de plantio	Taxa de cobertura
		Local de plantio
		Espaçamento entre as árvores/vegetal
		Distribuição das árvores/vegetal

Fonte: Adaptado de ALVES, 2015.

Em termos gerais, não se pode considerar o impacto da arborização como sendo proporcional à quantidade de indivíduos arbóreos presentes no tecido urbano, devido à própria influência das características da planta sobre a sua performance hidrológica. A eficácia de uma

árvore pode ser subutilizada se esta for plantada em local inadequado, por exemplo, levando a podas excessivas e deformação de suas características de copa.

Com isso, o planejamento do plantio deve contemplar uma escolha apropriada da planta, do local de plantio, a sua disposição, orientação e espaçamento entre as demais árvores presentes no entorno, visando otimizar a área de cobertura e a interceptação pluvial da arborização (ALVES, 2015). Assim, o plantio deve permitir que uma arborização ou vegetação densa seja aplicada sobre áreas comumente alagáveis, tirando partido da sobreposição de copa e de estruturas vegetadas para potencializar a interceptação pluvial.

No caso dos telhados verdes (Quadro 5), as características da vegetação também desempenham um papel importante, uma vez que a camada vegetal é responsável pela interceptação pluvial, de modo que quanto maior for a capacidade de interceptação pluvial, maior também será a contribuição do telhado verde para a redução do escoamento superficial. Outro fator que interfere na efetividade desse tipo de estratégia é a caracterização do substrato, pois quanto mais profunda for a camada de substrato e quanto maior a sua capacidade de retenção pluvial, maior será a sua contribuição para a redução do fluxo de escoamento de águas cinzas (PUMO et al., 2023).

Quadro 5 - Variáveis do Telhado Verde

Estratégia	Parâmetros primários	Parâmetros secundários
Telhados verdes	Características físicas / método de construção	Telhados verdes intensivos (substrato profundo)
		Telhados verdes extensivos (substrato raso)
	Design de plantio	Índice de cobertura
		Densidade e tipologia da vegetação

Fonte: Adaptado de PUMO et al., 2023.

Alguns modelos de telhado verde, chamados de telhado verde-azul, possuem uma camada extra de armazenamento de água, como uma pequena cisterna integrada, que permite potencializar a capacidade de retenção pluvial em sua estrutura. Essa alternativa é aplicável tanto para telhados verdes intensivos, quanto extensivos (PUMO et al., 2023), podendo auxiliar na compensação dos índices de interceptação pluvial da camada de vegetação nos casos em que as espécies selecionadas para o local - até mesmo por conta das características do bioma - não apresentem boa performance sob esse aspecto.

De maneira geral, o índice de cobertura vegetal se correlaciona positivamente com a capacidade de interceptação pluvial, promovendo um impacto significativo no que se refere ao controle do fluxo de escoamento superficial a nível urbano. Limites de cobertura ideais foram indicados em cerca de 50% a 75% para que a interceptação pluvial na estrutura das plantas possa participar de maneira significativa nesse processo (WELL; LUDWIG, 2020).

Para os jardins verticais (Quadro 6), a relação entre as características da vegetação e do substrato também são relevantes para a compreensão da performance hidrológica desse sistema. Entretanto, conforme apontado por Liu et al. (2021), a orientação do plantio e o *layout*

dos módulos que compõem o jardim vertical também influenciam na efetividade da retenção pluvial. Se as células de plantio, bem como a própria vegetação, estiverem orientadas para cima, esse tipo de infraestrutura consegue reter uma porcentagem maior de água da chuva.

Quadro 6 - Variáveis do Jardim Vertical

Estratégia	Parâmetros primários	Parâmetros secundários
Jardins Verticais	Design de plantio	Índice de cobertura
		Orientação do plantio
		Layout do jardim vertical
		Dimensões do substrato

Fonte: Adaptado de LIU et al., 2021.

Em relação aos corpos d'água em geral, como é o caso dos alagados construídos (Quadro 7), sua principal contribuição para as dinâmicas hidrológicas urbanas está relacionada à capacidade de armazenamento de águas cinzas. Ou seja, as dimensões do reservatório e o fluxo de escoamento superficial despejado são variáveis importantes de serem consideradas no processo de projeto. Além disso, é necessário prever a instalação de mecanismos de escoamento emergencial para situações em que o fluxo de escoamento superficial supere a capacidade de armazenamento do reservatório, sobretudo sob condições extremas de precipitação (WELL; LUDWIG, 2020).

Quadro 7 - Variáveis dos Alagados Construídos

Estratégia	Parâmetros primários	Parâmetros secundários
Alagados construídos	Escopo de Influência	Extensão vertical do reservatório
		Extensão horizontal do reservatório
	Influxos	Fluxo de água
		Altura de tubo de ejeção

Fonte: Adaptado de WEILL e LUDWIG, 2020.

Conforme observado no panorama das variáveis descritas anteriormente, tanto as estratégias condicionadas a pequenas escalas quanto aquelas aplicáveis a grandes escalas dependem dos parâmetros vinculados à vegetação a fim de obter um bom desempenho na redução do escoamento superficial. Em geral, uma cobertura vegetal mais densa tende a aumentar a eficácia na interceptação pluvial e, conseqüentemente, na redução do escoamento superficial. No entanto, a sua efetividade também depende da consideração cuidadosa de outras variáveis específicas para cada tipo de infraestrutura.

Em suma, todas as variáveis apresentadas são relevantes, mas sua importância pode variar a depender da escala e do tipo específico de infraestrutura verde-azul considerada. Da mesma forma, as variáveis podem diferir entre as dinâmicas presentes na micro e macroescala. Na microescala, fatores como a inclinação das ruas - para o caso de infraestruturas lineares, como as biovaletas; tipos de solo e cobertura vegetal nas edificações podem ser mais críticos. Já na macroescala, a topografia do território, a distribuição de microbacias e o escopo de influência dos alagados construídos emergem para o primeiro plano.

De todo modo, a abordagem de planejamento e projeto de infraestruturas multifuncionais, como a rede verde-azul de drenagem compensatória proposta neste artigo, requer uma análise criteriosa de diversas variáveis que afetam as dinâmicas do território. Assim, o mapeamento das principais variáveis de projeto que impactam na performance dessas infraestruturas se torna fundamental para orientar o desenvolvimento de cada um desses processos.

4 CONCLUSÃO

O presente artigo teve por objetivo elucidar aos planejadores a complexa rede de relações necessárias de serem consideradas no ato de se projetar infraestruturas urbanas baseadas em condicionantes e processos naturais, por meio de um conjunto de parâmetros de projeto pautados em variáveis ambientais para potencializar a performance hidrológica das SBN. Com base na revisão de literatura e nas análises empreendidas, foi possível compreender as diferentes estratégias de SBN que se relacionam com os esforços para mitigação e adaptação aos alagamentos pluviais, constituindo-se como instrumentos relevantes no atual contexto de mudanças climáticas.

A partir do desenvolvimento da proposta de estruturação da rede verde-azul de drenagem compensatória, foi possível inferir a importância da combinação de múltiplas estratégias para a gestão do escoamento superficial, superando as limitações inerentes a cada tipo de infraestrutura, principalmente sob condições extremas de precipitação, já que o fenômeno da saturação leva à redução da capacidade de interceptação pluvial e percolação nesses casos.

Outro aspecto importante a ser destacado é a influência do tipo de vegetação aplicado às infraestruturas verde-azul, pelo fato de que, na maioria dos exemplos abordados, a camada de vegetação se configura como um dos principais elementos na retenção da água da chuva, auxiliando na redução do escoamento superficial. Por esse motivo, a escolha da vegetação adequada e adaptada ao contexto climático e biológico do local são questões cruciais para possibilitar um bom desempenho das estratégias delineadas neste artigo.

Por fim, pode-se considerar como uma conclusão importante obtida a partir do desenvolvimento desta pesquisa o fato de que, no planejamento de infraestruturas verdes que abrangem grandes escalas, é necessário ordenar um processo de projeto que seja atento às dinâmicas que permeiam a micro e a macroescala do tecido construído e seu entorno. Ambas as escalas devem ser compatibilizadas, com especial atenção às caracterizações do tecido urbano e do território biogeofísico, para promover uma implementação adequada de cada uma das estratégias que compõem a rede.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) para o desenvolvimento das pesquisas que deram origem ao presente artigo. Também agradecemos

ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGAU-UFES) pelo suporte e o Grupo de Pesquisas Conexão VIX da UFES.

6 REFERÊNCIAS

- ACOSTA, F.; HAARON, S. Memorial Parking Trees: Resilient modular design with Nature-Based Solutions in vulnerable urban areas. **Land**, v. 10, n. 3, 2021.
- ALENCAR, S. et al. Técnicas compensatórias de drenagem urbana para manejo de águas pluviais: revisão sistemática e análise comparativa de métodos convencionais e inovadores no Estado de Mato Grosso, 14., 2022, Brasília. **Anais [...]**. Brasília, 2022.
- ALVES, A. et al. Evolutionary and Holistic Assessment of Green-Grey Infrastructure for CSO Reduction. **Water**, v. 08, n. 402, 2016.
- ALVES, P. **Capacidade de Intercepção pelas Árvores e suas Influências no escoamento Superficial Urbano**, 2015. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- ASARE, P. et al. Spatial Multi-Criteria Analysis for Discovering Nature-Based Solutions Location for Urban Flood Mitigation in Accra. **Applied Spatial Analysis and Policy**, 2023.
- COSTA, S. et al. Effectiveness of Nature-Based Solutions on Pluvial Flood Hazard Mitigation: The Case Study of the City of Eindhoven (The Netherlands). **Resources** (Basel), v. 10, n. 03, 2021.
- DA-SILVA-ROSA, T. et al. O cruzamento das ausências e das presenças na tessitura de vulnerabilidades e de riscos de desastres em áreas de desenvolvimento tardio: o caso de Vila Velha (Espírito Santo, Brasil). **Estudios Rurales**, v. 08, n. 15, p. 179-202, 2018.
- EGGERMONT, H. et al. Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe. **Gaia**, v. 24, p. 243-248, 2015.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.
- HAMERS, E. et al. Effectiveness of Nature-Based Solutions for Mitigating the Impact of Pluvial Flooding in Urban Areas at the Regional Scale. **Water** (Basel), v. 15, n. 04, 642, 2023.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- LIU, Z. et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, v. 200, p. 107939, 2021.
- MABROUK, M. et al. Assessing the effectiveness of nature-based solutions-strengthened urban planning mechanisms in forming flood-resilient cities. **Journal of Environmental Management**, v. 344, p. 118260, 2023.
- MAJIDI, A. N. et al. Planning Nature-Based Solutions for Urban Flooding Reduction and Thermal Comfort Enhancement. **Sustainability**, v. 11, p. 6361, 2019.
- MARAGNO, D. et al. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows. **Ecological Modeling**, v. 386, p. 1-10, 2018.
- MARTINS, I. L. **Biofilia Urbana e Suas Métricas: a lógica algorítmico-paramétrica como ferramenta de suporte à drenagem natural**, 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Cidade). Universidade Vila Velha, 2022.
- MENDES, M.; PINA, S. Soluções Baseadas na Natureza para Gestão de Águas Urbanas: aplicação de jardins filtrantes, jardins de chuva e biovaletas. **Revista Foco**, v. 16, n. 03, e 1382, p. 01-44, 2023.

MORAES, D. et al. Biofilia e sustentabilidade no planejamento urbano: interfaces conceituais e parâmetros de análise. **Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares**, v. 01, e205174, 2020.

PUMO, D. et al. The potential of multilayer green roofs for stormwater management in urban area under semi-arid Mediterranean climate conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 326, 116643, 2023.

PRUSKI, F. et al. **Escoamento Superficial**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.

RUANGPAN, L. et al. Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 20, n. 1, p. 243–270, 2020.

STEFFEN, W. et al. The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. **The Anthropocene Review**, v. 02, n. 01, p. 81-98, 2015.

THORSLUND, J. et al. Wetland as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. **Ecological Engineering**, v. 108, p. 489-497, 2017.

VALENTE DE MACEDO, L. S. et al. Urban green and blue infrastructure: A critical analysis of research on developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127898, 2021.

VASCONCELLOS, A. **Infraestrutura Verde Aplicada ao Planejamento da Ocupação Urbana**. Curitiba: Appris, 2015.

VOJINOVIC, Z. et al. Effectiveness of small- and large-scale Nature-Based Solutions for flood mitigation: The case of Ayutthaya, Thailand. **Science of the Total Environment**, v.789, 2021.

WELL, F.; LUDWIG, F. Blue-green architecture: A case study analysis considering the synergetic effects of water and vegetation. **Frontiers of Architecture Research**, v. 09, n. 01, p. 191-202, 2020.