

# SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA COMO INSTRUMENTO DE MELHORIA DA ARBORIZAÇÃO URBANA, AUXILIANDO NA CONSTRUÇÃO DE CIDADES SENSÍVEIS À ÁGUA E RESILIENTES ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Mariana Marchioni

Anita Raimondi

Juliana Caroline de Alencar da Silva

Luiz Fernando Orsini de Lima Yazaki

Giuliana Del Nero Velasco

Sérgio Brazolin

Carlos Alberto da Silva Filho

Gianfranco Becciu

## RESUMO

Diante do contexto de mudanças climáticas, torna-se cada vez mais imperativa a adoção de estratégias para a construção de paisagens mais resilientes, que consigam responder aos eventos climáticos extremos, como as chuvas intensas e os períodos de estiagem prolongados, que já podem ser observados e segundo às previsões serão ainda mais críticos nas próximas décadas. O conceito de cidades sensíveis à água estabelece os princípios para a construção de um ambiente urbano saudável, onde sejam agregados serviços ecossistêmicos, desempenhado pelos elementos naturais, ao território e a sua comunidade. A arborização urbana é essencial nesse processo, já que atua na manutenção de diversos processos de regulação, de provisão, culturais e de suporte. Apesar de sua importância a arborização urbana encontra nas grandes cidades um ambiente altamente adverso ao seu desenvolvimento, principalmente no que se refere à disponibilidade hídrica, de nutrientes e de espaço para o seu crescimento adequado, sendo a queda das árvores urbanas durante chuvas intensas responsável por danos ao patrimônio e às pessoas. O pivotamento, ou seja, a queda com o soerguimento de todo o sistema radicular, é causado pelo desenvolvimento inadequado do sistema radicular, que em áreas urbanas



se dá devido principalmente a compactação do solo dos passeios públicos ou calçadas; a má distribuição da umidade por todo o volume de solo abaixo do calçamento também contribui para limitar o desenvolvimento das raízes, somado a isso temos muitas vezes a escolha inadequada de espécies que não observa as características do local. As áreas dos canteiros, responsáveis pela captação das águas das chuvas, não são suficientes para coletar um volume de água que permita um ambiente adequado desenvolvimento do sistema radicular e da árvore como um todo. Pavimentos permeáveis, que permitem a infiltração da água no solo e armazenam parte das águas pluviais, podem potencializar um habitat favorável ao desenvolvimento vegetal. Neste estudo foram simulados os processos hidrológicos nos passeios públicos com diferentes configurações com o objetivo de verificar o efeito da implantação de pavimentação permeável na disponibilidade hídrica como instrumento da manutenção da arborização urbana. Os resultados obtidos demonstram a potencialidade do uso destes sistemas para aumentar a disponibilidade hídrica no solo para manutenção da arborização urbana.

**Palavras-chaves:** Soluções baseadas na Natureza (SbNs); Cidade; Adaptação; Mitigação; Pavimento permeável; Arborização Urbana.

# SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO INSTRUMENTO PARA MEJORAR EL ARBOLADO URBANO, AYUDANDO A CONSTRUIR CIUDADES SENSIBLES AL AGUA Y RESISTENTES AL CLIMA

Mariana Marchioni

Anita Raimondi

Juliana Caroline de Alencar da Silva

Luiz Fernando Orsini de Lima Yazaki

Giuliana Del Nero Velasco

Sérgio Brazolin

Carlos Alberto da Silva Filho

Gianfranco Becciu

## RESUMEN

*Dado el contexto de cambio climático, se hace cada vez más imperativo adoptar estrategias para la construcción de paisajes resilientes, que sean capaces de responder a eventos climáticos extremos, como lluvias intensas y periodos prolongados de sequía, que ya se pueden observar y según pronósticos serán aún mayores. más crítico en las próximas décadas. El concepto de ciudades sensibles al agua establece los principios para la construcción de un entorno urbano saludable, donde se incluyan los servicios ecosistémicos, al territorio y su comunidad. La forestación urbana es fundamental en este proceso, ya que actúa en el mantenimiento de diversos procesos de regulación, provisión, culturales y de apoyo. A pesar de su importancia, la forestación urbana encuentra en las grandes ciudades un ambiente altamente adverso para su desarrollo, especialmente en cuanto a la disponibilidad de agua, nutrientes y espacio para su adecuado crecimiento, y la caída del arbolado urbano durante lluvias intensas es responsable de daños a bienes y personas. El pivotamiento, es decir, la caída con levantamiento de todo el sistema radicular, se produce por el inadecuado desarrollo del sistema radicular, que en las zonas urbanas se debe principalmente a la compactación del suelo de las aceras o aceras públicas; la mala distribución de la humedad en todo el volumen de suelo debajo del pavimento también contribuye a limitar el desarrollo de las raíces, además de esto, muchas veces tenemos la*



*elección inadecuada de especies que no observan las características del lugar. Las áreas de arriates, encargadas de captar el agua de lluvia, no son suficientes para recolectar un volumen de agua que permita un ambiente adecuado para el desarrollo del sistema radicular y del árbol en su conjunto. Los pavimentos permeables, que permiten que el agua se infiltre en el suelo y almacenen parte del agua de lluvia, pueden mejorar un hábitat favorable para el desarrollo de las plantas. En este estudio se simularon los procesos hidrológicos sobre aceras con diferentes configuraciones con el fin de verificar el efecto de la implementación de pavimentación permeable sobre la disponibilidad de agua como instrumento para el mantenimiento de la forestación urbana. Los resultados obtenidos demuestran el potencial del uso de estos sistemas para aumentar la disponibilidad de agua en el suelo para el mantenimiento de la forestación urbana.*

**Palabras clave:** Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbNs); Ciudad; Adaptación; mitigación; Pavimento permeable; Arbolado Urbano.



# NATURE-BASED SOLUTIONS AS AN INSTRUMENT FOR IMPROVE URBAN FORESTRY, HELPING TO BUILD WATER-SENSITIVE AND CLIMATE RESILIENT CITIES

Mariana Marchioni

Anita Raimondi

Juliana Caroline de Alencar da Silva

Luiz Fernando Orsini de Lima Yazaki

Giuliana Del Nero Velasco

Sérgio Brazolin

Carlos Alberto da Silva Filho

## ABSTRACT

*Given the context of climate change, it becomes increasingly imperative to adopt strategies for building resilient landscapes, which are able to respond to extreme weather events, such as heavy rains and prolonged drought periods, which can already be observed and according to forecasts will be even more critical in the coming decades. The concept of water-sensitive cities establishes the principles for the construction of a healthy urban environment, where ecosystem services are included, to the territory and its community. Urban afforestation is essential in this process, as it acts in the maintenance of various regulation, provision, cultural and support processes. Despite its importance, urban afforestation finds in large cities a highly adverse environment for its development, especially with regarding water availability, nutrients and space for its adequate growth, and the fall of urban trees during intense rains is responsible for damage to property and people. Pivoting, ie, the fall with the uplift of the entire root system, is caused by the inadequate development of the root system, which in urban areas is mainly due to soil compaction of public sidewalks or sidewalks; the poor distribution of moisture throughout the volume of soil below the pavement also contributes to limiting the development of roots, in addition to this, we often have the inappropriate choice of species that does not observe the characteristics of the place. The bed areas, responsible for capturing rainwater, are not enough to collect a volume of water that allows an adequate environment for the development of the root system and the tree as a whole. Permeable pavements, which allow water to infiltrate the soil and store part of the rainwater, can enhance a favorable habi-*



*tat for plant development. In this study, the hydrological processes on sidewalks with different configurations were simulated in order to verify the effect of the implementation of permeable paving on water availability as an instrument for the maintenance of urban afforestation. The results obtained demonstrate the potential of using these systems to increase the water availability in the soil for the maintenance of urban afforestation.*

**Keywords:** *Nature-based solutions (SbNs); City; Adaptation; Mitigation; Permeable pavement; Urban trees.*

# 1. INTRODUÇÃO

As áreas urbanas enfrentam um grande desafio nas próximas décadas, que é o de construir paisagens resilientes frente ao cenário de mudanças climáticas que resultará em uma maior ocorrência de eventos extremos, sobrecarregando ainda mais os atuais sistemas que já apresentam diversas vulnerabilidades. A arborização urbana tem sido apontada com um importante aliado para mitigar os efeitos das mudanças climáticas em meio urbano e para tornar as cidades mais resilientes a essas mudanças (Buckeridge, 2015), além de ser provedora de vários outros serviços ambientais como impactos positivos na saúde pública; redução da poluição do ar, moderação do microclima, melhoria paisagística, redução da poluição hídrica difusa, abatimento dos picos de inundação, entre outros (Berland et al., 2017; Nowak et al., 2014; Konijnendijk et al., 2016; Ruangpan et al., 2020; Livesley et al., 2016). Observa-se, no entanto, que as condições em que as árvores são cultivadas são muito distintas das encontradas nas florestas, ambiente de onde a maioria das espécies utilizadas na arborização urbana tem origem (São Paulo [Cidade], 2015).

Plantadas em linha ou em pequenos grupos e próximas ao leito carroçável das vias, são submetidas a temperaturas que podem atingir, em São Paulo, a 52 °C (Frota, 1996 e umidades relativas muito baixas (Oliva, 2016).

Árvores isoladas, plantadas em linha, são encontradas em quase todo o tecido urbano e “são cultivadas e mantidas como indivíduos; afetam e são afetadas pelo ambiente também como indivíduos” (Magalhães, 2006), não se beneficiando das interações e trocas que ocorrem entre os organismos nas florestas (Gorzalak et al, 2015).

Segundo o Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP), as modelagens climáticas já realizadas indicam um aumento de 1 a 2° C na temperatura para os períodos de 2010-2030, 2 a 3° C para 2040-2050 e 4° C para 2080-2090 na RMSP (CCST, 2019).

Com relação às precipitações os resultados indicam um aumento de 30% nas precipitações da RMSP entre 2030-2060, já para 2080-2090 os resultados indicam uma redução geral da precipitação na RMSP, com exceção da região oeste da RMSP que sofre um aumento de 10%. Apesar desta redução geral, há uma tendência no aumento da incidência de eventos extremos de precipitação, ou seja, ainda que a precipitação média seja reduzida com o passar do tempo (2080-2090), isto é provocado pelo aumento de dias secos seguidos por chuvas extremas concentradas em poucos dias, o que tornará o

sistema existente ainda mais vulnerável (CCST, 2019). O estudo de Schardong e Srivastav (2014) indicam um aumento de mais de 30% na ocorrência de eventos extremos na cidade de São Paulo (chuvas com período de retorno de 100 anos).

A IUCN - International Union for Conservation of Nature - aponta as soluções baseadas na natureza como a principal estratégia para o enfrentamento das mudanças climáticas. Soluções Baseadas na Natureza - SBN - são ações inspiradas e apoiadas na natureza, promovendo assim benefícios ambientais, sociais e econômicos que auxiliem na construção de sistemas resilientes. O conceito está alinhado com os ODS, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (IUCN, 2021).

Desta forma, a construção de cidades sensíveis às águas, passa pela adoção de SBN a fim de transformá-las em paisagens promotoras de serviços ecossistêmicos, através dos elementos naturais da paisagem que atuam na manutenção de diversos processos de regulação, de provisão, culturais e de suporte. Neste contexto se insere a arborização urbana, como será descrito a seguir.

## 1.1 Arborização Urbana

A arborização urbana tem sido apontada com um importante aliado para mitigar os efeitos das mudanças climáticas em meio urbano e para tornar as cidades mais resilientes a essas mudanças (Buckeridge, 2015), além de ser provedora de vários outros serviços ambientais como impactos positivos na saúde pública; redução da poluição do ar, moderação do microclima, melhoria paisagística, redução da poluição hídrica difusa, abatimento dos picos de inundação, entre outros (Berland et al., 2017; Nowak et al., 2014; Konijnendijk et al., 2016; Ruangpan et al., 2020; Livesley et al., 2016). Observa-se, no entanto, que as condições em que as árvores são cultivadas são muito distintas das encontradas nas florestas, ambiente de onde a maioria das espécies utilizadas na arborização urbana tem origem (São Paulo [Cidade], 2015).

O solo urbano é, também muito distinto dos solos das florestas. É frequente a inversão da ordem dos horizontes no perfil dos solos urbanos (Brady e Weil, 2013); a reação do solo sofre alterações em função da deposição de resíduos (elevação do pH) e a compactação realizada para o solo suportar uma carga pré-definida diminui drasticamente a sua porosidade, a capacidade de trocas gasosas, o desenvolvimento das raízes e a capacidade de retenção de água (Craul, 1993).

Estudo desenvolvido em Roma, na Itália, no ano de 2019 caracterizou, por meio de equipamento não destrutivo (GPR - radar de penetração), o comportamento do sistema radicular de árvores instaladas em vias pavimentadas. Com as imagens obtidas pelo radar, os auto-



res concluíram que, devido à compactação do solo, as raízes tendem a se espalhar horizontalmente e em pequena profundidade, muitas vezes invadindo as camadas drenantes do próprio pavimento. (Barone e Ferrara, 2019).W

As condições do solo também podem afetar a estabilidade estrutural da árvore promovendo a sua queda. Para contextualizar a gravidade deste assunto, foram registradas pela Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP) de 2014 a 2020 a queda de 18.194 árvores no município e, apenas no verão de 2021, registraram-se 776 quedas.

Estudo, ainda não publicado, sobre a queda de árvores na Subprefeitura Sé, entre os anos 2016 e 2018, constatou que 68% (sessenta e oito por cento) das quedas de árvores aconteceram por rompimento de raiz (Rosa et al., 2019) e dados da PMSP dão conta que as quedas acontecem normalmente em dias de intensa chuva ou ventos fortes, causando uma série de danos à infraestrutura urbana, principalmente às fiações elétricas, à mobilidade e à comunidade que nela reside até mesmos mortes. Esses esforços solicitantes associam-se ao desenvolvimento deficitário do sistema radicular, causado pela limitação de espaço e pela falta de nutrientes e água reduzindo sua resistência ao pivotamento, ou seja, tombamento de todo o exemplar (Mattheck e Breloer, 1997).

A compactação do solo das vias (calçada e leito carroçável), associada ao uso de pavimentos impermeáveis reduz expressivamente a quantidade de água disponível para as árvores, limitando o desenvolvimento do sistema radicular que, por consequência, explora um volume de solo insuficiente para obter a quantidade de nutrientes necessária ao pleno desenvolvimento da árvore e à prestação plena dos serviços ambientais do seu potencial genético.

O escopo dessa área de estudo abrange três componentes: os elementos (vegetação) incluídos, a sua localização (intraurbana, suburbana, periurbana e rural) e os benefícios gerados.

## **1.2 Instrumentos para melhoria da qualidade ambiental da arborização urbana**

Existem diversas técnicas que seguem os princípios das SBN que podem atuar na melhoria da qualidade ambiental da arborização urbana, principalmente no que se refere ao aumento da disponibilidade hídrica no solo para a vegetação, dentre elas, este estudo destaca os Jardins de Chuva e os Pavimentos Permeáveis, que foram utilizados como células de bioretenção na modelagem apresentada a diante, por serem técnicas já bem fundamentadas e difundidas.

Os Jardins de chuva (JC) tem sido empregados em áreas urbanas

para a promoção do tratamento das águas do escoamento superficial e como elementos na paisagem para o aumento da biodiversidade. São construídos em depressões rasas, que recebem uma camada de manta geotêxtil, uma camada de leito poroso, seguida por solo composto, onde são plantadas espécies nativas. Além deste sistema que serve de base para a vegetação, é comum os jardins possuírem uma tubulação drenante que conecte as águas drenadas ao sistema de galerias para que aja o escoamento das vazões de pico durante o período chuvoso. O funcionamento ótimo da estrutura se dá nas pequenas precipitações e principalmente no período de estiagem, quando o escoamento superficial vem carregado de cargas difusas. Quando é realizado o plantio de espécies adequadas, os jardins de chuva demandam pouca ou nenhuma irrigação e adubação (Ishimatsu Et al, 2017). Esses sistemas podem ou não ser dotados de uma camada de reservatório granular para aumentar o volume de água armazenado (Woods-Ballard, 2007).

Os Pavimentos Permeáveis (PP) são pavimentos feitos com matérias que permitem a absorção da água do escoamento superficial, permitindo tanto a infiltração destas águas no solo, como o armazenamento em camadas subterrâneas. Dentre as técnicas LID, o pavimento drenante é uma das mais utilizadas, havendo no Brasil leis específicas para sua adoção (Lei do município de São Paulo, N° 11.509/1994). Segundo Wang Et al (2019) de 20% a 40% da superfície das áreas urbanizadas são tratadas com pavimentos, o que torna estes materiais grandes responsáveis por fenômenos climáticos como ilhas de calor e absorção de água. O uso de pavimentos drenantes atua na amenização destes efeitos.



**FIGURA 1.** Exemplos de Células de bioretenção, Jardim de Chuva e Pavimento Permeável, e seus processos hidrológicos. Fontes: Dos autores.

O sistema construtivo do PP fundamenta-se nos Sistemas de Manejo Sustentável de Águas Pluviais (SMSAP); permite a infiltração de água em sua superfície e o acúmulo na base permeável, que funciona como um reservatório (Marchioni e Becciu, 2015; Woods-Ballard, 2007). O volume de água acumulado na base pode ser infiltrado lentamente no solo ou descarregado através de uma tubulação de drenagem interna à base, dependendo das características do solo e das condições específicas do projeto (Marchioni e Becciu, 2015). A seção típica de um pavimento permeável para uso veicular consiste em uma superfície contínua de concreto permeável, ou conglomerado betuminoso permeável, podendo ser também formada por peças de concreto descontínuas com juntas permeáveis. A base permeável é normalmente composta de agregados com granulometria aberta, com um índice de vazios maior ou igual a 32% (ABNT NBR 16416:2015). É opcional o uso de tubos perfurados de drenagem, manta geotêxtil ou asfáltica sobre o subleito.

Em relação ao manejo da água infiltrada, o pavimento permeável pode ser de três tipos: infiltração total, infiltração parcial ou sem infiltração. No primeiro caso toda a água que incide no pavimento é infiltrada no subleito, no segundo caso parte da água é extravasada por meio de tubulações drenantes enquanto, no tipo sem infiltração, o subleito é completamente impermeabilizado e toda a água infiltrada é drenada por tubos de drenagem. A escolha do tipo de pavimento permeável depende das características do solo local (coeficiente de infiltração, nível do aquífero subterrâneo) e de outras condições de contorno (ABNT NBR 16416:2015).

O PP pode ser utilizado em calçadas com tráfego preponderante de pedestres e ocasionalmente de veículos, com atenção ao caso de peças de concreto com juntas abertas que podem restringir a acessibilidade (Marchioni e Becciu, 2015).

São documentadas na literatura a interação do PP com a umidade do solo, assim como a interação com a arborização (Fini et al., 2017; Morgenroth e Visser, 2011; Mullaney et al., 2015; Volder et al., 2019). O uso desse sistema, além de permitir a infiltração da água que incide na superfície no solo, ainda permite que a água armazenada na base permeável seja infiltrada lentamente mantendo uma disponibilidade hídrica mesmo horas após o fim da chuva.

O aumento da disponibilidade hídrica nem sempre acontece. Varia de acordo com o grau de compactação do solo, que pode alterar a condutividade hidráulica e o nível de evapotranspiração (Volder et al., 2019). Os benefícios, nesse caso, vão depender do tipo de solo e da configuração do sistema, o qual deve ser dimensionado para esse fim (Mullaney et al., 2015). Medidas de evapotranspiração em campo de PP observaram valores mais altos em comparação com PC, podendo ter um efeito de redução da disponibilidade hídrica no solo após evento de precipitação (7% PC contra 10-12% PP em relação ao total de precipitação) (Göbel et al., 2013). Vale ressaltar que, aumentar a evapotranspiração, é geralmente considerado um efeito positivo dos SMSAP.

### **1.3 Passeios Públicos**

O Decreto N° 52.903/12 da PMSP estabelece para o passeio público uma faixa livre para a circulação de pedestres com largura mínima de 1,20 m, enquanto o Decreto N° 49.904/05 define que, se presente, a faixa de serviço destinada à instalação de equipamentos e mobiliários urbanos e vegetação localizada em posição adjacente à guia deve ter no mínimo 70 cm. Dessa forma, é permitido o plantio de árvores apenas nos passeios com largura mínima de 1,90 m. Para passeios públicos com largura entre 1,90 a 2,09 m a dimensão mínima para o canteiro é de 0,60 x 0,60 m. Esses parâmetros indicam uma dimensão reduzida dos canteiros que, novamente, associada a um solo altamente compactado pode reduzir a disponibilidade hídrica para a manutenção da vegetação, prejudicando o seu desenvolvimento, aumentando o risco de queda a longo prazo.

O município de São Paulo conta com 646.310 árvores plantadas, ao longo do sistema viário das suas 32 subprefeituras (São Paulo [Cidade], 2014), nas condições descritas anteriormente. Em melhores condições de solo, essas árvores poderiam realizar serviços ambientais mais expressivos e ter o risco de queda reduzido, deixando de

prestar esse desserviço ambiental. Embora adotada isoladamente não solucione as questões relacionadas ao adequado desenvolvimento da arborização plantada ao longo do sistema viário, a implantação de pavimentação permeável (PP) e jardins de chuva (JC) nos passeios públicos em substituição ao pavimento convencional (PC) impermeável tem a capacidade de impactar positivamente a disponibilidade hídrica no solo, ao aumentar a retenção e a infiltração de água e aproximar esse processo no meio urbano ao observado nos solos cobertos com vegetação.

## 1.4 Objetivo

Neste estudo, avalia-se para diferentes configurações o impacto da adoção de SBN para a melhoria da qualidade ambiental da arborização urbana implantada nos passeios públicos, auxiliando na construção de cidades sensíveis às águas e resilientes às mudanças climáticas. A potencialidade dessas soluções para melhorar a arborização urbana devido à falta de disponibilidade hídrica é avaliada através de simulação hidráulica e hidrológica obtendo e comparando a umidade do solo para diversas tipologias de passeios públicos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram simulados os processos hidrológicos para seis configurações de passeio público, sendo duas configurações tradicionais e quatro soluções utilizando SMSAP, simulando um evento único de chuva e uma serie temporal continua com dados do Município de São Paulo com o objetivo de comparar o desempenho desses sistemas quanto à disponibilidade hídrica no solo, conforme será melhor detalhado a seguir.

### 2.1 Projetos de Calçadas

Foram analisadas seis configurações de passeios públicos, considerando três tipos tradicionais e amplamente utilizados no Município de São Paulo (TP1 e TP2) e quatro tipos (TP3-TP4) com soluções em SMSAP (Tabela 1). Foram consideradas as dimensões mínimas mencionadas nos Decretos nº 52.903/12 e nº 49.904/05, com faixa de serviço de 0,7 m e faixa livre de 1,2 m. O TP1 consiste em PC com um canteiro com dimensões mínimas, enquanto no TP2 toda a faixa de serviço consiste em área livre de pavimentação, considerando solo natural compactado com grama. Nas soluções propostas do tipo TP3, o canteiro de solo natural é substituído por um JC sem reservatório granular. Nas soluções TP4, TP5 e TP6 a faixa livre utiliza PP en-

quanto a faixa de acesso mantém em TP4 a área mínima de canteiro, em TP5 canteiro com solo natural e o TP6 utiliza JC.

| ID  | Faixa Serviço   | Área canteiro (m <sup>2</sup> ) | PERM <sup>1</sup> | IMP <sup>2</sup> | Faixa livre | JC  | PP  |
|-----|-----------------|---------------------------------|-------------------|------------------|-------------|-----|-----|
| TP1 | canteiro mínimo | 0,36                            | 2%                | 98%              | PC          | 0   | 0   |
| TP2 | canteiro        | 4,90                            | 26%               | 74%              | PC          | 0   | 0   |
| TP3 | jardim de chuva | 4,90                            | 26%               | 74%              | PC          | 26% | 0   |
| TP4 | canteiro mínimo | 0,36                            | 2%                | 98%              | PP          | 0   | 63% |
| TP5 | canteiro        | 4,90                            | 26%               | 74%              | PP          | 0   | 63% |
| TP6 | jardim de chuva | 4,90                            | 26%               | 74%              | PP          | 26% | 63% |

<sup>1</sup> Percentual de área considerada permeável (canteiro).  
<sup>2</sup> Percentual de área considerada impermeável, incluindo área do PP.

**TABELA 1.** Configurações de passeio público utilizadas nas simulações.

## 2.1 Dimensionamento da Pavimentação Permeável (PP)

A base porosa de um pavimento permeável deve ser dimensionada para resistir aos esforços oriundos das solicitações de tráfego e a função hidráulica do reservatório (Marchioni e Becciu, 2015; Swan e Smith, 2009).

O dimensionamento mecânico foi feito pelo método proposto pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) adaptado para PP (Swan e Smith, 2009).

O dimensionamento hidráulico foi realizado pelo método da curva envelope, onde a altura hídrica de entrada é obtida com a equação de altura-duração-frequência (A-D-F), reduzida pela multiplicação do coeficiente de escoamento superficial, e a altura hídrica de saída do sistema obtida a partir da condutividade hidráulica do solo (Silveira e Goldenfum, 2007; Becciu e Paoletti, 2010). Esse método considera um ietograma retangular e apenas as perdas hidrológicas em relação à altura de chuva total. Desconsidera, portanto, o abatimento das vazões pelo efeito da propagação da onda de cheia, hipótese razoável para um sistema que recebe prevalentemente a precipitação que incide sobre ele mesmo.

Para definir o volume armazenado no sistema, foi feito um balanço hidráulico com a utilização da Equação 1:

$$(Q_e - Q_u) \cdot dt = dW$$

Sendo:

$Q_e$ : vazão de entrada no sistema de infiltração;

$Q_u$ : vazão de saída no sistema de infiltração;

$dW$ : variação de volume armazenado no sistema;

$dt$ : intervalo de tempo.

A vazão de entrada no sistema, que é função do tempo, pode ser descrita com a fórmula racional utilizando uma equação de intensidade-duração-frequência (I-D-F) do tipo binomial, com dois parâmetros característicos da estação pluviométrica.

$$Q_e = \varphi \cdot A \cdot a \cdot t^{n-1} \quad (2)$$

Sendo:

$a, n$ : parâmetros da I-D-F do tipo binomial

$A$ : área do PP somada às eventuais áreas de contribuição adicionais

$\varphi$ : área do PP somada às eventuais áreas de contribuição adicionais

$t$ : duração do evento de precipitação

A Tabela 2 apresenta os parâmetros  $a$  e  $n$  para alguns municípios do estado de São Paulo obtidos por meio de regressão e minimizando o erro quadrático a partir da I-D-F do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) para um Tempo de Retorno ( $T = 10$  anos).

| Município             | a [mm/h <sup>n</sup> ] | n (10 ≤ t' ≤ 60) | n (60 ≤ t' ≤ 1440) |
|-----------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| São Paulo             | 61                     | 0,49             | 0,21               |
| São Bernardo do Campo | 63                     | 0,50             | 0,22               |
| Taubaté               | 62                     | 0,53             | 0,21               |
| Bertioga              | 93                     | 0,71             | 0,44               |
| São Jose do Rio Preto | 68                     | 0,59             | 0,23               |
| Ubatuba               | 82                     | 0,73             | 0,41               |
| Araraquara            | 66                     | 0,51             | 0,23               |
| Campinas              | 56                     | 0,47             | 0,18               |
| Santos                | 64                     | 0,60             | 0,34               |
| São Jose dos Campos   | 57                     | 0,50             | 0,26               |

<sup>1</sup> duração do evento de chuva, t, em minutos

**TABELA 2.** Parâmetros da I-D-F bi-nomial para T = 10 anos.

A vazão de saída do sistema de infiltração, não considerando um tubo de drenagem, é caracterizado pela Lei de Darcy considerando a área de infiltração do sistema ( $A_I$ ), condutividade hidráulica característica do solo local e gradiente hidráulico igual a 1, resultando na Equação 3.

$$Q_u = f_c \cdot A_I \quad (3)$$

Sendo:

$Q_u$ : vazão de saída do sistema

$f_c$ : condutividade hidráulica do solo saturado

$A_I$ : área da PP

Substituindo as Equações 2 e 3 na Equação 1 se obtém a altura hídrica  $d(t)$  do sistema de infiltração em função do tempo:

$$d(t) = \frac{\theta}{p} \cdot (\varphi \cdot a \cdot t^{n-1} \cdot R - f_c) \quad (4)$$

Sendo:

$R = A/A_I$ ,

$p$  = porosidade do material de enchimento do sistema.



A altura hídrica para o sistema de infiltração, ou seja, a espessura da base da PP, é obtida substituindo na Equação 4 o evento de duração crítica para o sistema onde  $t=t_w$ . Este é obtido derivando a Equação 4, em função de  $t$  e igualando a zero.

$$\frac{dd}{dt} = \varphi \cdot a \cdot n \cdot R \cdot \frac{t^{n-1}}{p} - \frac{f_c}{p} = 0 \rightarrow t_w = \left( \frac{f_c}{\varphi \cdot a \cdot n \cdot R} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (5)$$

Dessa forma, substituindo na Equação 6 o evento crítico de duração  $t_w$  obtido com a Equação 6 se obtém a espessura da base da PP,  $d_{pp}$ .

$$d_{pp} = d(t_w) = \frac{t_w}{p} \cdot (\varphi \cdot a \cdot t_w^{n-1} \cdot R - f_c) \quad (6)$$

O tempo de esvaziamento da base permeável,  $t_{(sv,2D)}$  pode ser obtido com a Equação 7.

$$t_{sv,2D} = \frac{p \cdot d_{pp}}{f_c} \quad (7)$$

Sendo:

$d_{pp}$ : espessura da base do PP

A NBR ABNT 16416:20015 recomenda um tempo de esvaziamento máximo de 72 horas, caso o tempo de esvaziamento seja superior é necessário adicionar um tubo de drenagem para escoar parte do volume acumulado na base do pavimento evitando danificar o pavimento e reduzindo a probabilidade de ocorrer de sobreposição de eventos de precipitação.

Para o município de São Paulo, com parâmetros da I-D-F binomial de  $a = 61$  mm/hn e parâmetro de escala  $n$  0,49 para durações de 10 a 60 minutos; 0,21 para duração superior a 60 minutos e  $n = 0,21$  (Tabela 2); considerando um solo do tipo argiloso arenoso com coeficiente de permeabilidade variando de  $10^{-6}$  m/s a  $10^{-9}$  m/s obtém-se, utilizando a Equação 6, uma altura de base variando de 150 mm a 941 mm com tempo de esvaziamento de 19 horas a 81 dias.

| $f_c$ (m/s)           | h <sub>pp</sub> [mm] | t <sub>esv</sub> [horas] |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| 1,00x10 <sup>-6</sup> | 150                  | 19                       |
| 1,00x10 <sup>-7</sup> | 277                  | 346                      |
| 1,00x10 <sup>-8</sup> | 510                  | 6380                     |
| 1,00x10 <sup>-9</sup> | 941                  | 117668                   |

**TABELA 3** Exemplos de espessura de PP variando a condutividade hidráulica para o Município de São Paulo.

Para os casos em que o tempo de esvaziamento supera o limite de 72 horas se recomenda inserir um tubo de drenagem que deve ser dimensionado considerando a densidade de furos e o fluxo de água no interno do sistema.

### 2.3 Simulação dos Processos Hidrológicos

Para simular os processos hidrológicos das soluções propostas foi utilizado o modelo desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency - Stormwater Management Model (Gironás et al, 2010; Rossman e Huber, 2015;) para modelar a transformação chuva-vazão, a infiltração de água no solo e o andamento temporal do conteúdo de umidade disponível.

SWMM é um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão que pode ser utilizado para eventos independentes ou simulações temporais contínuas de quantidade e carga de poluentes no escoamento superficial. O componente escoamento superficial considera as áreas das sub-bacias que recebem a precipitação e geram escoamento e carga de poluentes, enquanto o componente de direcionamento (routing) direciona essa vazão para uma rede de coletores, canais e dispositivos de armazenamento (Rossman e Huber, 2015).

A partir da descrição conceitual da rede existente o processo de simulação inicia com a precipitação, onde as perdas hidrológicas iniciais vão contribuir com a evapotranspiração e infiltração, sendo essa direcionada para o aquífero. O excesso de escoamento após a depuração das perdas iniciais gera o escoamento superficial, que em parte pode ser gerenciado pelos SMSAP e o excedente é então direcionando para as redes de coletores, canais e reservatórios, se presentes. A altura hídrica que se acumula no tempo na superfície de cada sub-bacia é descrita pela Equação de conservação de massa (Equação 8):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q$$

Sendo:

d: altura hídrica [mm]

t: tempo [h]

i: precipitação [mm/h];

e: taxa de evaporação de superfície [mm/h];

f: capacidade de infiltração [mm/h];

q: escoamento superficial [mm/h]

Note que  $i$ ,  $e$ ,  $f$  e  $q$  representam vazão por unidade de área. A taxa de evaporação depende de uma série de fatores relacionados à temperatura e à velocidade dos ventos, variando com a estação do ano. Valores obtidos experimentalmente para São Paulo vão de 4 mm/dia no verão a cerca de 1 mm/dia durante o inverno (Camargo e Sentelhas, 1997). A USEPA-SWMM permite utilizar os seguintes modelos de infiltração: Horton, Green-ampt e Curve Number. Nesse trabalho foi utilizado o modelo de Horton, descrito pela Equação 9, que utiliza um modelo empírico exponencial para estimar a variação de capacidade de infiltração do solo no tempo (Horton, 1940):

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-k_d t}$$

Sendo:

$f_p$  = taxa de infiltração no tempo;

$f_\infty$  = taxa de infiltração mínima;

$f_0$  = taxa de infiltração inicial

$k_d$  = coeficiente de decaimento de infiltração;

t = tempo.

Neste estudo foi considerado um  $f_i$  de 76 mm/h,  $f_\infty$  de 2,5 mm/h e  $k_d$  de 2. O componente aquífero da USEPA-SWMM foi utilizado para simular o movimento de água no solo permitindo obter uma estimativa do teor umidade no solo. O componente aquífero representa a camada não saturada acima da camada saturada para cada sub-bacia, onde a altura do lençol freático representa o limite entre as duas camadas. A posição do lençol freático varia de acordo com os fluxos de entrada e saída da camada saturada, que por sua vez são definidos por meio de uma equação de percolação. A camada não saturada recebe a infiltração das áreas permeáveis e dos SMSAP e perde umidade devido ao processo de evapotranspiração. Nos casos em que o lençol freático atinge a superfície, a infiltração cessa e inicia a produzir escoamento superficial (Rossman e Huber, 2015).

Para a simulação realizada foi considerado um solo argilo-arenoso

com uma porosidade de 0,398, capacidade de campo 0,244, ponto de murcha permanente (PMP) 0,136 e condutividade hidráulica saturada igual a 5,0 mm/h. Foi ainda considerado uma taxa de evaporação igual a 0,35 mm/h na camada saturada e 14,00 na camada não saturada. A umidade inicial na zona não saturada no início da simulação foi considerada 0,30. O nível do lençol freático foi definido de tal modo que não interferisse nas simulações, considerando que a implantação de PP não é recomendada em locais onde a altura máxima registrada do lençol freático seja inferior a 60 cm de distância em relação ao nível mais baixo da estrutura do pavimento (ABNT NBR 16416:2015).

Para simular o JC e PP foi utilizado o componente de SMSAP do USEPA-SWMM (ANO), identificado no modelo com a nomenclatura utilizada usualmente nos Estados Unidos (LID - Low Impact Developments). Conceitualmente os SMSAP apresentam uma estrutura com uma camada de superfície, solo e armazenamento dependendo do tipo de sistema. Os fluxos de entrada são caracterizados pela precipitação e escoamento superficial das áreas de contribuição, enquanto, os de saída, incluem a evapotranspiração, o fluxo extravasado e o fluxo escoado através do tubo de drenagem. O sistema considera a infiltração em direção à camada não saturada do solo abaixo do sistema (Rossman e Huber, 2016). No caso do JC não foi considerado uma camada de reservatório, sendo esse formado de camada com profundidade de 200 mm e a camada de substrato de 200 mm e outros parâmetros reunidos na Tabela 4. Os parâmetros utilizados para o PP estão reunidos na Tabela 5.

**TABELA 4.** Parâmetros utilizados na simulação do jardim de chuva (JC).

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| Profundidade [mm]               | 200,0 |
| Espessura substrato [mm]        | 200,0 |
| Porosidade                      | 0,5   |
| Capacidade de campo             | 0,2   |
| Ponto de murcha                 | 0,1   |
| Condutividade hidráulica [mm/h] | 0,5   |
| Nível de sucção [mm]            | 3,5   |

Os parâmetros da superfície foram estimados com bases em dados de literatura (Brugin et al., 2020; Andrés-Valeri, 2016; Marchioni e Becciu, 2015). A espessura da base do PP foi dimensionada conforme o método da curva envelope descrito anteriormente e é apresentada nos

resultados. A condutividade hidráulica do solo abaixo do PP é estimada inferior a do aquífero para considerar os efeitos da compactação do subleito durante a execução do pavimento. O valor de condutividade hidráulica de 0,5 mm/h resulta em uma baixa permeabilidade de acordo com a classificação proposta por Terzaghi, Peck (1996).

|   |        |
|---|--------|
| Espessura da superfície [mm]                  | 80,00  |
| Porosidade                                    | 0,15   |
| Condutividade hidráulica da superfície [mm/h] | 100,00 |
| Porosidade do material da base                | 0,45   |
| Condutividade hidráulica do solo [mm/h]       | 0,50   |

**TABELA 5.** Parâmetros utilizados na simulação e no dimensionamento do pavimento permeável (PP).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Seção Tipo do Pavimento Permeável

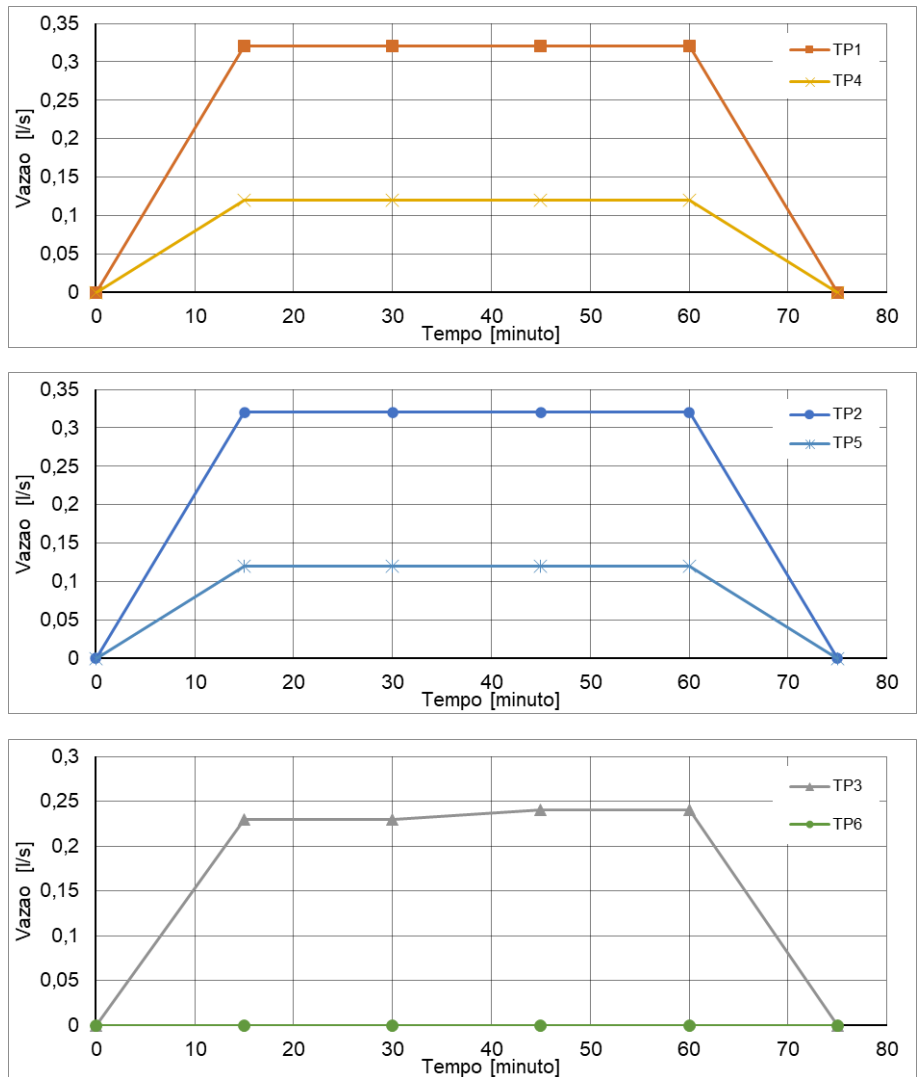
Considerando a I-D-F binomial do Município de São Paulo (Tabela 2), condutividade hidráulica do solo de 0,5 mm/h ( $1,38 \times 10^{-7}$  m/s) e porosidade do material de enchimento da base de 0,45, aplicando o método da curva envelope resulta uma altura de base necessária,  $d_{pp} = 254$  mm com tempo de esvaziamento de 228 horas. Nesse caso seria necessário adicionar um tubo de drenagem com a função de extravasor para garantir um esvaziamento em até 72 horas, porém considerando que a calçada não é submetida a tráfego veicular e esse sistema em particular tem como objetivo manter uma maior umidade no solo, optou-se por não utilizar um tubo de drenagem. Para o dimensionamento mecânico, estabelecendo uso exclusivo para pedestres e sendo vetada a passagem de qualquer veículo automotor resulta uma espessura de base mínima de 150 mm para um CBR (California Bearing Ratio) saturado mínimo de 4. Foi adotada então uma base de 255 mm de espessura para o PP, valor utilizado nas simulações dos processos hidrológicos.

#### 3.2 HIDROGRAMA

A Figura 1 apresenta os hidrogramas para um evento de chuva de tempo de retorno igual a 10 anos ( $T = 10$  anos) e duração de 1 hora ( $t = 1$  hora), obtido por meio da simulação chuva-vazão utilizando USE-PA-SWMM, para as seis soluções propostas na Tabela 1 (TP1 à TP6).

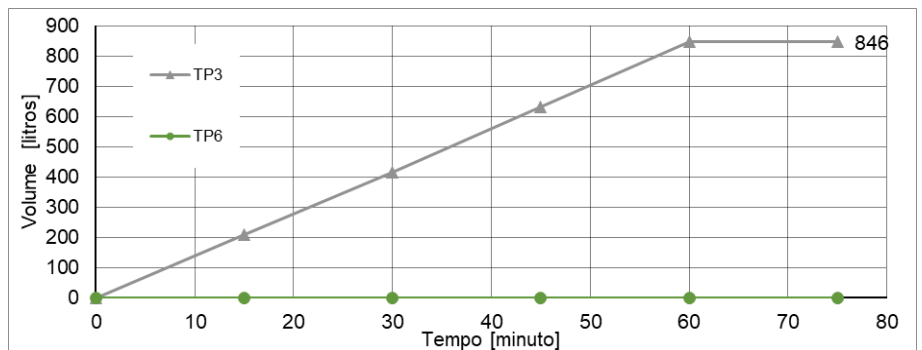
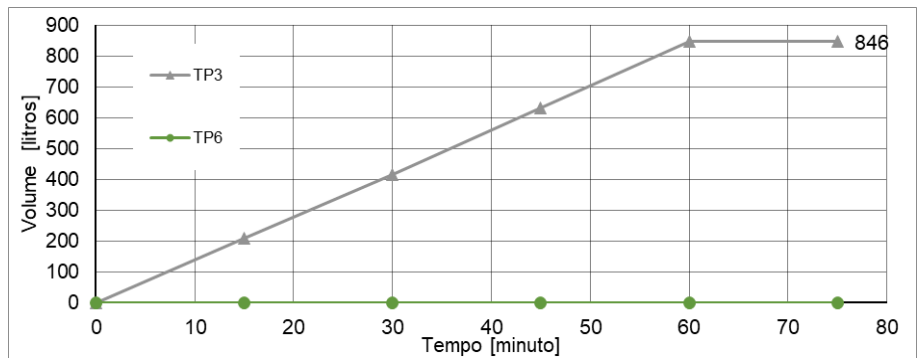
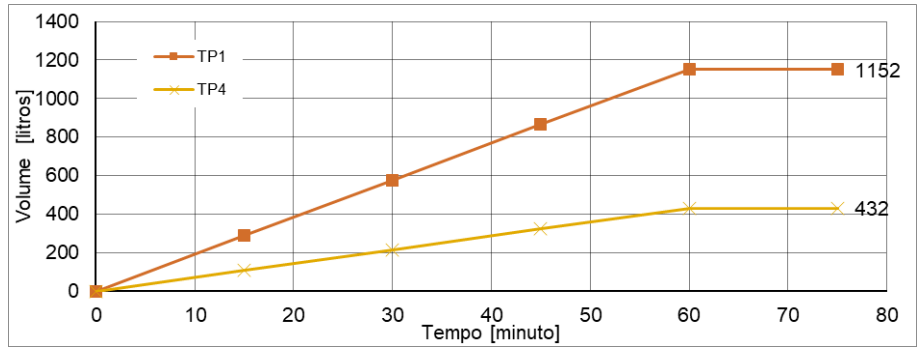
Para a chuva com duração de 1 (uma) hora e intensidade constante igual 60 mm/h ( $i = 60$  mm/h), obtida com a curva I-D-F do Município de São Paulo (Tabela 2), a vazão máxima observada para o passeio público tradicional (TP1) com um canteiro de 60 x 60 cm foi de 0,32 l/s. A vazão máxima se manteve a mesma para o caso TP2, onde a faixa livre é ocupada inteiramente pelo canteiro, atestando que o efeito na redução de escoamento superficial é mínimo. A solução TP3, onde se mantém uma pavimentação tradicional, mas o canteiro é substituído por um JC observou-se uma redução de 25% na vazão de pico, com um valor de 0,24 l/s. Como esperado, as soluções que incluem o PP levaram a reduções significativas de escoamento superficial, com 63% de redução para as soluções TP4 e TP5, com vazão de pico 0,12 l/s em ambos os casos. Na solução TP6 o uso combinado de pavimentação permeável e jardim de chuva resultou, para o evento de precipitação considerado, uma vazão nula, ou seja, não foi observado escoamento superficial.

**FIGURA 1.** Hidrograma obtido por meio de simulação chuva-vazão para um evento de chuva com  $T = 10$  anos,  $t = 1$  hora e  $i = 60$  mm/h.



A Figura 2 traz o volume acumulado ao longo do tempo para o mesmo evento de precipitação onde o volume máximo de 1.152 litros de escoamento superficial foi observado para a TP1 enquanto a TP6 não gerou volume de escoamento superficial.

**FIGURA 2.** Volume acumulado ao longo do tempo obtido por meio de simulação chuva-vazão para um evento de chuva com T = 10 anos, t = 1 hora e i = 60 mm/h.



O uso dos SMSAP e, especificamente o PP, são frequentemente relacionados à redução do risco hidrológico urbano. Mesmo não sendo o objetivo principal dos casos simulados, verifica-se que os sistemas resultaram na redução da vazão e do volume de escoamento superficial. Essa redução é relativamente pequena visto que a área considerada de 19 m<sup>2</sup> para um trecho de 10 m de passeio com largura 1,9 m, é também pequena. Entretanto, considerando um município como o de São Paulo, que possui cerca de 17.800 km de vias, a disseminação do uso de PP deve resultar em um abatimento significativo das vazões de pico e dos volumes de escoamento superficial, contribuindo, assim, para a redução dos riscos de inundação.

### 3.3 Movimentos da Água no Solo

Para verificar a hipótese de que a implantação da pavimentação permeável aumenta a disponibilidade hídrica no solo ao longo do tempo, favorecendo assim a saúde das árvores urbanas, foram analisadas para as soluções propostas na Tabela 1 a infiltração de água total, transpiração e umidade no solo. Foram realizadas simulações chuva-vazão com EPA-SWMM para um evento único de chuva com duração  $t = 1$  hora, tempos de recorrência  $T = 10$  anos e  $T = 2$  anos, este último com objetivo de verificar um evento de chuva com maior frequência. Os resultados são reportados na Tabela 6.

A implantação de SMSAP no passeio resultou em um aumento significativo da infiltração total, com um percentual de cerca 3% de infiltração total em relação ao total de precipitação para o TP3, e valores de 4% a 5% para as soluções com pavimentação permeável TP4, TP5 e TP6. Para as soluções de passeio tradicionalmente adotadas, TP1 e TP2 a infiltração é percentualmente menor que 1% da altura total de chuva.

A utilização dos SMSAP aumenta significativamente também a parcela da chuva que retorna para a atmosfera em forma de evaporação em percentuais de cerca de 20%, quando adotado JC com pavimentação tradicional (TP3), a 95% para JC e PP utilizados em conjunto (TP6). O aumento da evaporação de água é considerado um importante benefício dos SMSAP com impacto no microclima urbano, mas diminui a disponibilidade hídrica remanescente no solo disponível para uso da vegetação. Ainda assim foi observado um aumento significativo na umidade média do solo na camada não saturada, que chega a duplicar no caso de substituir o pavimento tradicional para o PP, comparando TP1 com TP4 e TP2 com TP3. A análise de variância a um fator (teste ANOVA) mostrou uma diferença estatisticamente significativa entre as diferentes soluções com  $F(5, 8.928) = 28.511$ .



| ID  | Tempo de Retorno | Altura da chuva | Infiltração | Evaporação | Umidade no solo  |
|-----|------------------|-----------------|-------------|------------|------------------|
|     |                  | Total           | Total       | Total      | Média            |
|     | T                | H               |             |            | $\theta_{media}$ |
|     | [anos]           | [mm]            | [mm]        | [mm]       | [-]              |
| TP1 | 10               | 60,06           | 0,08        | 0,09       | 0,14             |
| TP2 | 10               | 60,06           | 0,08        | 0,09       | 0,14             |
| TP3 | 10               | 60,06           | 1,78        | 13,87      | 0,22             |
| TP4 | 10               | 60,06           | 2,73        | 35,23      | 0,30             |
| TP5 | 10               | 60,06           | 2,74        | 35,24      | 0,30             |
| TP6 | 10               | 60,06           | 3,04        | 55,12      | 0,32             |
| TP1 | 2                | 39,28           | 0,07        | 0,09       | 0,14             |
| TP2 | 2                | 39,28           | 0,08        | 0,09       | 0,14             |
| TP3 | 2                | 39,28           | 0,96        | 9,32       | 0,18             |
| TP4 | 2                | 39,28           | 1,81        | 23,03      | 0,24             |
| TP5 | 2                | 39,28           | 1,81        | 23,04      | 0,24             |
| TP6 | 2                | 39,28           | 2,07        | 37,22      | 0,26             |

**TABELA 6.** Resultados obtidos para a simulação de evento único de chuva obtendo infiltração e evaporação total após o evento e média de umidade no solo para as tipologias propostas.

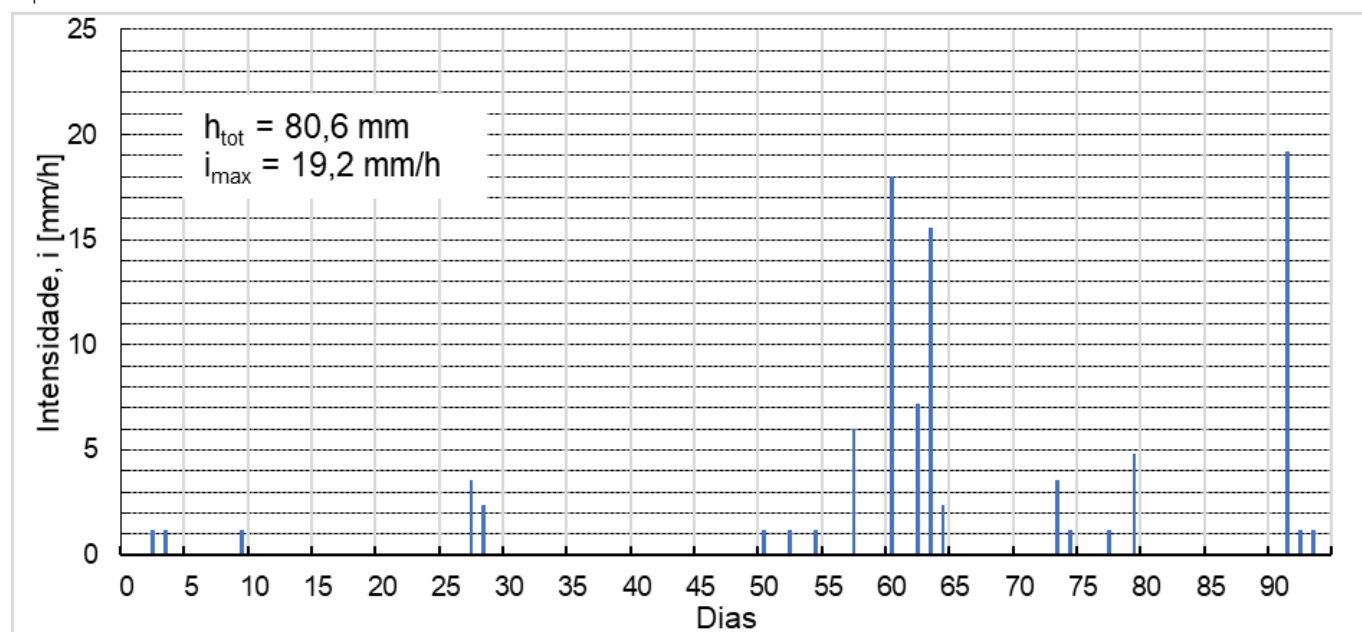
Observando a Tabela 7, que traz a performance dos SMSAP, se verifica que a maior parcela da altura de água total que ingressou no sistema torna à atmosfera como evaporação, com uma importância volumétrica inferior para a infiltração. Vale ressaltar que, nas simulações, foi utilizado um coeficiente de permeabilidade do solo classificado como baixa permeabilidade, com 0,5 mm/h ( $1.4 \times 10^{-7}$  m/s).

**TABELA 7.** Performance dos SMSAP para simulação de evento único de chuva considerando apenas os SMSAP propostos.

| ID  | SMSAP | Entrada de água | Evaporação | Infiltração |
|-----|-------|-----------------|------------|-------------|
|     |       | total           | Total      | Total       |
|     |       | [mm]            | [mm]       | [mm]        |
| ST3 | JC    | 60,06           | 53,52      | 6,54        |
| ST4 | PP    | 60,06           | 55,73      | 4,33        |
| ST5 | PP    | 60,06           | 55,74      | 4,32        |
| ST6 | JC    | 66,73           | 61,95      | 2,37        |
| ST6 | PP    | 67,83           | 61,95      | 3,85        |
| ST3 | JC    | 39,28           | 35,9       | 3,39        |
| ST4 | PP    | 39,28           | 36,42      | 2,86        |
| ST5 | PP    | 39,28           | 36,43      | 2,85        |
| ST6 | JC    | 43,64           | 42,46      | 1,18        |
| ST6 | PP    | 44,36           | 41,58      | 2,78        |

Foi realizada também uma simulação com série temporal contínua durante o inverno, período com menor frequência e intensidade de chuvas. A série temporal utilizada foi cedida pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) e se refere à estação pluviométrica de número 273 localizada na foz do córrego Pirajuçara que fornece alturas pluviométricas em intervalo de tempo  $\Delta t = 10$  minutos. Foram utilizados os dados registrados entre 20/06/2016 a 24/09/2016 com ocorrência de 20 eventos de chuva independentes, uma altura total de  $h = 80,6$  mm e intensidade máxima registrada  $i_{\max} = 19,2$  mm/h (Figura 3).

**FIGURA 3.** Série temporal contínua com dados de chuva com  $\Delta t = 10$  minutos e duração de 96 dias (20/06/2016 – 24/09/2016) durante o período invernal.



A Tabela 8 reúne os principais resultados obtidos para a simulação da série temporal contínua. Os eventos registrados no período considerado são caracterizados por intensidades baixas, variando de cerca 2 mm/h a menos de 20 mm/h, o que pode explicar que nesse caso os valores de infiltração são percentualmente maiores que os da evaporação em relação à altura total de chuva, com 25% para o TP3, e de 55% a 66% para as soluções com PP, TP4-TP6. Esse efeito é verificado observando os dados da Tabela 9 onde a infiltração corresponde a mais de 60% da entrada total da água que é infiltrada no solo para as soluções com PP (TP4, TP5 e TP6). Foi observado um aumento de 6% para a umidade média do solo e de 10% da umidade ao final da simulação, comparando-se a solução TP1 com TP4. A variação foi de 18% de umidade média do solo e 45% de umidade final quando comparando TP3 e TP6. Observa-se, assim, um efeito positivo da implantação do PP no aumento da umidade do solo. Já na comparação entre TP2 e TP4, onde o canteiro ocupa a maior par-

te da faixa livre, a umidade do solo foi reduzida no caso de implantação de PP para 11% de umidade média e 17% de umidade total. A análise de variância a um fator (teste ANOVA) mostrou uma diferença estatisticamente significativa entre as diferentes soluções com  $F(5, 8.927) = 834$ .

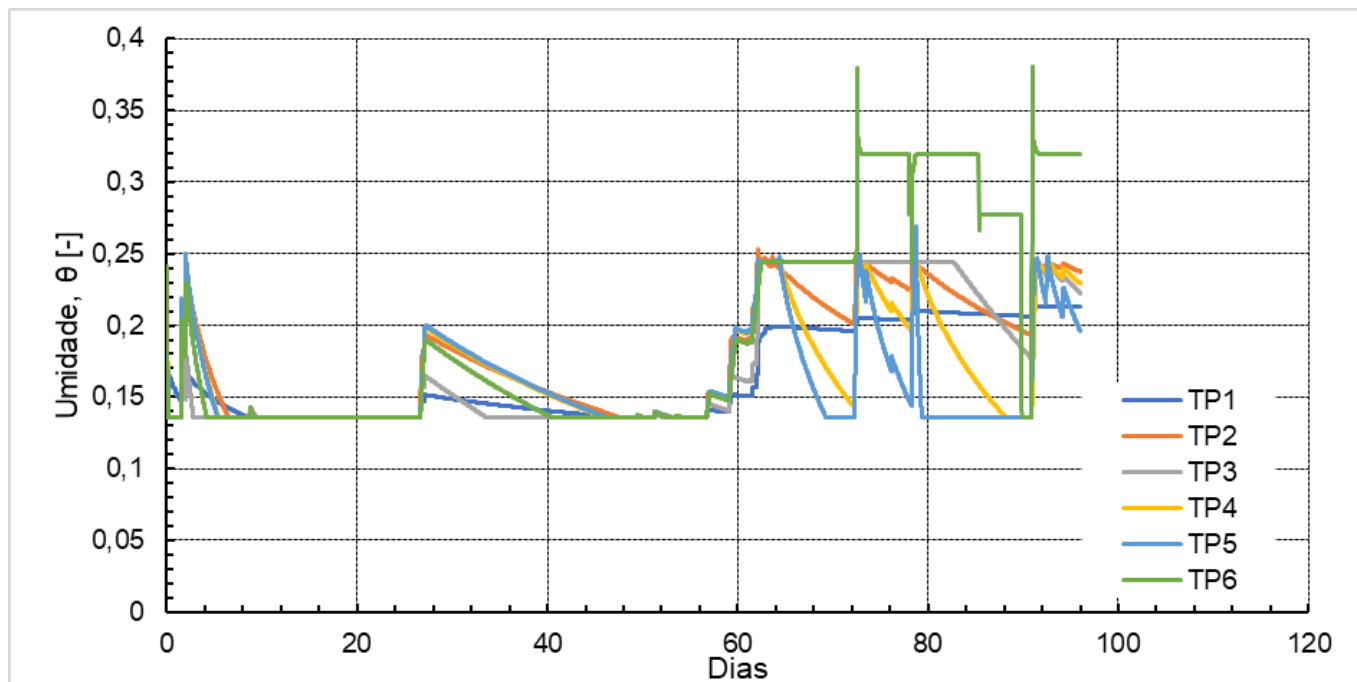
| ID  | Altura da chuva | Infiltração | Evaporação | Umidade do solo  |                  |
|-----|-----------------|-------------|------------|------------------|------------------|
|     | Total           | Total       | Total      | Média            | Final            |
|     | h               | -           | -          | $\theta_{media}$ | $\theta_{final}$ |
|     | [mm]            | [mm]        | [mm]       | [-]              | [-]              |
| TP1 | 80,6            | 1,61        | 3,42       | 0,16             | 0,21             |
| TP2 | 80,6            | 20,96       | 2,54       | 0,18             | 0,24             |
| TP3 | 80,6            | 20,22       | 13,83      | 0,17             | 0,22             |
| TP4 | 80,6            | 47,62       | 5,12       | 0,17             | 0,23             |
| TP5 | 80,6            | 54,74       | 4,81       | 0,16             | 0,20             |
| TP6 | 80,6            | 45,3        | 26,66      | 0,20             | 0,32             |

**TABELA 8.** Resultados obtidos para a simulação de série temporal contínua.

| ID  | SMSAP | Entrada | Evaporação | Infiltração |
|-----|-------|---------|------------|-------------|
|     |       | total   | Total      | Total       |
|     |       | [mm]    | [mm]       | [mm]        |
| ST3 | JC    | 80,60   | 46,37      | 18,10       |
| ST4 | PP    | 80,60   | 6,15       | 74,45       |
| ST5 | PP    | 80,60   | 6,15       | 74,45       |
| ST6 | JC    | 82,07   | 46,38      | 12,18       |
| ST6 | PP    | 90,88   | 22,80      | 63,70       |

**TABELA 9.** Performance dos SMSAP para simulação de série temporal contínua.

A Figura 4 traz a variação de umidade na zona não saturada no solo para a simulação com série temporal contínua.



**FIGURA 4.** Variação da umidade do solo para a simulação com série temporal contínua. Analisando os resultados obtidos com a simulação contínua no inverno se verifica um aumento da umidade final do solo nas soluções que adotam SMSAP, principalmente no caso TP6 onde se utiliza o PP combinado com JC, confirmando dessa forma que a adoção desses sistemas resulta em uma maior disponibilidade hídrica para a arborização urbana.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram propostas configurações de passeio público utilizando sistemas de manejo sustentável de águas pluviais (SMSAP) sendo eles jardim de chuva (JC) e pavimentação permeável (PP), substituindo a pavimentação convencional impermeável (PC), os canteiros tradicionais de solo compactado e grama com o objetivo de aumentar a disponibilidade hídrica da camada não saturada do solo. O desempenho desses sistemas em relação à infiltração, à evaporação de água e umidade do solo foram analisadas utilizando o modelo da *United States Environmental Protection Agency - Storm Water Management Model* (USEPA-SWMM) analisando um evento de chuva único e uma série temporal contínua registrada no inverno de 2016.

Ainda que, em ambos os casos, foi verificada, na maior parte das simulações, um aumento da umidade de solo ao utilizar SMSAP, uma parcela considerável da precipitação volta para a atmosfera através da evaporação, diminuindo assim a disponibilidade hídrica do solo. Ainda que, per se, o aumento da evaporação pode ser considerado como um benefício no ambiente urbano, nesse caso específico diminui a disponibilidade de água para a vegetação, principalmente nos casos de eventos com maior intensidade de chuva.

Concluindo: os resultados obtidos demonstram a potencialidade do uso de jardins de chuva (JC) e, principalmente, de pavimentos permeáveis (PPs) para auxiliar a manutenção da arborização urbana pelo incremento da disponibilidade hídrica no solo, neste caso ve-

rificado através da comparação da umidade do solo para diferentes soluções. É importante ressaltar que o projeto seja planejado para esse fim, evitando, por exemplo, a compactação excessiva do subleito para execução do PP o que pode reduzir a infiltração de água. As simulações foram também, realizadas considerando valores estimados das características do solo e da taxa de evapotranspiração local. Dessa forma, o próximo passo seria obter tais parâmetros a partir de monitoramentos de campo, permitindo a calibração do modelo de simulação obtendo assim resultados mais reais. Destaque-se, por fim, que métodos probabilísticos de dimensionamento do PP podem otimizar projetos que tenham o objetivo de aumentar a disponibilidade hídrica no solo.

## REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_. Projeto da Prodam/SMSM mapeia árvores do sistema viário de São Paulo. São Paulo: Portal da Prefeitura do Município de São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/inovacao/prodam/noticias/index.php?p=183756>. Acesso em: 04 ago. 2021.
- \_\_\_\_\_. Vendaval desta semana é responsável por mais de 20% das quedas de árvore de 2014. São Paulo: Portal da Prefeitura do Município de São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.capital.sp.gov.br/portal/noticias/5194> Acesso em: 20/04/2016.
- Andrés-Valeri, V. C., Marchioni, M., Sañudo-Fontaneda, L. A., Giustozzi, F., & Becciu, G. Laboratory assessment of the infiltration capacity reduction in clogged porous mixture surfaces. *Sustainability*, 8(8), 751, 2016.
- Barone, P. M.; Ferreira, C. A posteriori GPR Evaluation of Tree Stability A Case Study in Rome (Italy). *Remote Sensing*, v. 11, p. 1-17, 2019
- Becciu, G., & Paoletti, A. *Fondamenti di costruzioni idrauliche*. Wolters Kluwer Italia, 2010.
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and urban planning*, 162, 167-177, 2017.
- Brugin, M., Marchioni, M., Becciu, G., Giustozzi, F., Toraldo, E., & Andrés-Valeri, V. C. Clogging potential evaluation of porous mixture surfaces used in permeable pavement systems. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(5), 620-630, 2020.
- Buckeridge, M. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. São Paulo: *Estudos Avançados* 29 (84), 2015.
- Camargo A. P., Sentelhas P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.5. n.1. p 89-87, 1997.
- CCST, Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP) - Relatório sobre mudanças climáticas no Brasil., 2019. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/producao-cientifica-do-ccst/> acessado em 23/09/2021.
- Craul, P. J. Urban soils: an overview and their future. In: Watson, G.W.; Neely, D. *The landscape below ground*. Illinois: Morton Arboretum/International Society of Arboriculture. P. 115-125, 1993.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). *Precipitações intensas no estado de São Paulo*. 2018.
- Fini, A., Frangi, P., Mori, J., Donzelli, D., & Ferrini, F. Nature based solutions to mitigate soil sealing in urban areas: Results from a 4-year study comparing permeable, porous, and impermeable pavements. *Environmental Research*, 156, 443-454, 2017.
- Frota, A. B. Controles térmicos naturais e qualidade ambiental. In: *Seminário Internacional de Conforto Ambiental - NUTAU*. 1996.
- Gironás, J., Roesner, L. A., Rossman, L. A., & Davis, J. A new applications manual for the Storm Water Management Model(SWMM). *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 813-814, 2010.

Göbel, P., Starke, P., Voss, A., & Coldewey, W. (2013). Field measurements of evapotranspiration rates on seven pervious concrete pavement systems. NOVATECH, 2013.

Gorzalak, M. A.; Asay, A. K.; Pickles, B. J.; Simard, S. W. Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities. *AoB PLANTS* 7: plv050; doi:10.1093/aobpla/plv050, 2015.

Horton, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil science society of America journal*, 5(C), 399-417, 1941.

Ishimatsu, K., Ito, K., Mitani, Y., Tanaka, Y., Sugahara, T., & Naka, Y. Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning. *Landscape and Ecological Engineering*, v. 13, n. 1, p. 205-212, 2017.

Konijnendijk, C. C., Ricard, R. M., Kenney, A., & Randrup, T. B. Defining urban forestry—A comparative perspective of North America and Europe. *Urban forestry & urban greening*, 4(3-4), 93-103, 2006.

Kottegoda, N. T., & Rosso, R. *Applied statistics for civil and environmental engineers* (p. 718). Malden, MA: Blackwell, 2008.

Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of environmental quality*, 45(1), 119-124, 2016.

Magalhães, L. M. S. Arborização e florestas urbanas – terminologia adotada para a cobertura arbórea das cidades brasileiras. In: *Floresta e Ambiente*, p. 23-26, Jan/2006.

Marchioni, M., & Becciu, G. Experimental results on permeable pavements in urban areas: A synthetic review. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 10(6), 806-817, 2015.

Mattheck, C.; Breloer, R.C. *The body language of trees: a handbook for failure analysis*. London: the Stationery Office, 1997. 239 p.

Morgenroth, J., & Visser, R. Aboveground growth response of *Platanus orientalis* to porous pavements. *Arboriculture and Urban Forestry*, 37(1), 2011.

Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. The effect of permeable pavements with an underlying base layer on the growth and nutrient status of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(1), 19-29, 2015.

Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental pollution*, 193, 119-129, 2014.

Oliva, G. T. *Relação do conforto humano com métricas de cobertura arbórea*. Dissertação (Mestrado). Piracicaba: USP/ESALQ, 2016.

Rosa, A. S.; Waetge, A. A.N.; Barbosa, E. S.; Biazzo, F. C. M.; Kavamura, H. E. Diagnóstico das árvores caídas nos distritos da Subprefeitura Sé: análise de dados do período de 2016 A 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Especialização. Diadema: Universidade Federal de São Paulo, 2019. 42 p.

Rossmann, Lewis A., and Wayne C. Huber. "Storm water management model reference manual volume I—Hydrology." National Risk Management Laboratory, 2015.

Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Sabatino, S. D., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M.,

... & Lopez-Gunn, E. Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: A state-of-the-art review of the research area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 243-270, 2020.

São Paulo (Cidade). Manual Técnico de Arborização Urbana. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. PMSP. 2015.

Schardong, A; Srivastav, R. K. - Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 19 n.4 -Out/Dez 2014,176-185.

Silveira, A. D., & Goldenfum, J. A. Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12(2), 157-168, 2007.

Soil mechanics in engineering practice / Karl Terzaghi, Ralph B. Peck, Gholamreza Mesri. Terzaghi, Karl (1883-1963); Mesri, Gholamreza (1940-); Peck, Ralph Brazelton 3. ed. New York [etc.] : Wiley, 1996

Swan, D. J., & Smith, D. R. Development of the permeable design pro permeable interlocking concrete pavement design system. In 9th International Conference on Concrete Block Paving, Argentina (pp. 18-21), 2009.

Tangune, B. F., & Escobedo, J. F. (2018). Reference evapotranspiration in So Paulo State: Empirical methods and machine learning techniques. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 10(4), 33-44, 2018.

Volder, A., Watson, T., & Viswanathan, B. (2009). Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(4), 249-256, 2009.

Wang, J., Meng, Q., Zhang, L., Zhang, Y., He, B. J., Zheng, S., & Santamouris, M. Impacts of the water absorption capability on the evaporative cooling effect of pervious paving materials. *Building and Environment*, v. 151, p. 187-197, 2019.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. The SUDS manual (Vol. 697). London: Ciria, 2007.

#### Abreviações

I-D-F - Equação intensidade-duração-frequência

PC - Pavimento convencional

PP - Pavimentação permeável

JC - Jardim de chuva

SMSAP - Sistemas de manejo sustentável de águas pluviais

USEPA-SWMM - United States Environmental Protection Agency - Storm Water Management Model



**Mariana Marchioni**

Politecnico di Milano.

e-mail: mariana.marchioni@polimi.it

ORCID: 0000-0002-6777-8090

**Anita Raimondi**

Politecnico di Milano

e-mail: anita.raimondi@polimi.it

ORCID: 0000-0003-1598-2265

**Juliana Caroline de Alencar da Silva**

Universidade de São Paulo

e-mail: julianaalencar@usp.br

**Luiz Fernando Orsini de Lima Yazaki**

Consultor em Manejo de Águas Pluviais

e-mail: luizfyazaki@uol.com.br

**Giuliana Del Nero Velasco**

Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT)

e-mail: velasco@ipt.br

**Sérgio Brazolin**

Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT)

e-mail: brazolin@ipt.br

**Carlos Alberto da Silva Filho**

Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente de São Paulo (SVMA)

e-mail: carlosasilva@prefeitura.sp.gov.br

**Gianfranco Becciu**

Politecnico di Milano

e-mail: gianfranco.becciu@polimi.it

**Recebido em:** 06/08/2021.

**Aceito em:** 01/02/2022.