



Jardins de chuva para mitigação dos alagamentos urbanos: análise de um projeto piloto

Edenia Nascimento Barros¹, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral², Erwin Ulises Lopez Palechor³, Paulo Roberto Lacerda Tavares⁴, Lucas Amorim Amaral Menezes⁵, Marcos Antonio Barbosa Silva Junior⁶

¹Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Técnica de laboratório na Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, CE. E-mail: enb_pec@poli.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5970-6823> ²Professor da Escola Politécnica da UPE Professor titular da UFPE - Pós-graduação Eng Civil Engenheiro Civil (UFPE), Mestre em Recursos Hídricos (UFRJ), PhD em Métodos Computacionais aplicados à Engenharia, (WIT Inglaterra), Pós doutorado (Universidade do Mississippi, USA) E-mail: jaime.cabral@ufpe.br (autor correspondente) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1348-8004> ³Graduado em Engenharia Civil pela Universidade del Cauca/UNICAUCA -Colômbia (2010), Mestre em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília/UNB (2013) e Doutor em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília/UNB (2018). Professor Adjunto no Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Cariri (UFCA). Tem experiência na área de Engenharia Civil com ênfase em Pontes, Estruturas de Concreto e Estruturas Metálicas. E-mail: erwin.lopez@ufca.edu.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0000-0000-0000> ⁴Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2002), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2005) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2010). Atualmente é Professor Associado III da Universidade Federal do Cariri, no curso de graduação em Engenharia Civil e professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Área de Concentração Recurso Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. E-mail: paulo.tavares@ufca.edu.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6702-7975> ⁵Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Mestre em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco E-mail: lucasamoringa@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7022-2886> ⁶Graduado em Engenharia Civil (2010.2) e mestre em Engenharia Civil (2015) pela Universidade de Pernambuco (UPE). Doutorando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, com ênfase em Recursos Hídricos, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: marcos15barbosa@hotmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2678-9420>

Artigo recebido em 11/04/2023 e aceito em 14/02/2024

RESUMO

Os impactos negativos ao meio ambiente decorrentes da urbanização acelerada são cada vez mais severos, inclusive as inundações urbanas. A busca por alternativas de desenvolvimento sustentável reforça a importância da redução das áreas impermeáveis e os sistemas de biorretenção surgem como dispositivos eficazes na redução dos volumes de escoamento e minimização das inundações. Dentre os dispositivos, os jardins de chuva funcionam com retenção das águas pluviais e infiltração. Eles constituem-se como elementos da paisagem urbana e beneficiam a saúde humana por tornar locais mais agradáveis e melhorar o conforto térmico local. Este estudo objetivou apresentar um projeto piloto e a execução de um jardim de chuva na cidade de Recife-PE, com avaliação da sua eficiência hidráulica. Optou-se também por utilizar um material reciclado de resíduos da construção civil, tornando o dispositivo de drenagem ainda mais sustentável. A metodologia consistiu em caracterização do local de instalação, determinação da chuva de projeto, escolha da geometria do jardim e da cobertura vegetal, determinação do volume útil necessário, execução e simulação dos eventos de chuva. Foi verificado que a camada permeável de solo encontrava-se na profundidade de 1,25 m, a partir dos ensaios de infiltração com anel simples e foi dimensionada a camada núcleo do jardim com 90 cm de espessura. Nas simulações, o dispositivo apresentou-se eficiente para a chuva mais crítica de 156,63 mm/h, sem atingir a máxima capacidade de utilização do jardim. O dispositivo se mostrou eficiente enquanto potencial mitigador de pico de vazão de chuva e redução das inundações urbanas.

Palavras-chave: Biorretenção, Técnica compensatória, Drenagem urbana sustentável.

Rain gardens to mitigate urban flooding: analysis of a pilot project

ABSTRACT

The negative impacts on the environment resulting from accelerated urbanization are increasingly severe, including urban flooding. The search for sustainable development alternatives reinforces the importance of reducing impermeable areas and bioretention systems emerge as effective devices in reducing runoff volumes and minimizing flooding. Among the devices, the rain gardens function with retention of rainwater and infiltration. They constitute elements of the urban landscape and benefit human health by making places more pleasant and improving local thermal comfort. This study

aimed to present a pilot project and the execution of a rain garden in the city of Recife-PE, with an evaluation of its hydraulic efficiency. It was also decided to use recycled material from construction waste, making the drainage device even more sustainable. The methodology consisted of characterizing the installation site, determining the design rainfall, choosing the geometry of the garden and vegetation cover, determining the necessary useful volume, executing and simulating rainfall events. It was verified that the permeable layer of soil was at a depth of 1.25 m, based on the infiltration tests with a simple ring, and the core layer of the garden was 90 cm thick. In the simulations, the device was efficient for the most critical rainfall of 156.63 mm/h, without reaching the garden's maximum capacity. The device proved to be efficient as a potential mitigator of peak rainfall and reduction of urban flooding.

Keywords: Bioretention, Compensatory technique, Sustainable urban drainage.

Introdução

O crescimento da população nos centros urbanos tem gerado impactos negativos significativos ao meio ambiente (Koomen *et al.*, 2023). Um deles são as inundações, que se mostram cada vez mais danosas, em decorrência da impermeabilização do solo e da falta de um plano de manejo das águas pluviais (Pérez-Morales *et al.*, 2021). Há também um emprego excessivo de canalizações no perímetro urbano que aumenta a velocidade de escoamento da água, amplia a vazão de pico e consequentemente provoca as inundações urbanas (Yang *et al.*, 2022). As consequências negativas deste processo afetam a resiliência urbana e colocam em risco a vida dos residentes das áreas afetadas (Mabrouk *et al.*, 2023).

Nas comunidades urbanas, cada vez mais, é necessário buscar novas alternativas para continuar a crescer e se desenvolver de forma mais sustentável, pois sem utilizar as inovações acessíveis a favor da gestão urbana, os impactos da urbanização não poderão ser minimizados ou controlados (Kniess *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2021). Então, a importância de áreas permeáveis é de suma necessidade para o meio urbano, pois retém a água pluvial na fonte e minimiza a ocorrência de inundações (Caprario *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021). A utilização de técnicas compensatórias, enquanto medidas de controle de águas pluviais, pode gradativamente recuperar a capacidade de infiltração do meio urbano (Lopes Bezerra *et al.*, 2022; Glick *et al.*, 2023).

Os sistemas de biorretenção têm um design altamente flexível e podem ser utilizados em várias situações e escalas (Vijayaraghavan *et al.*, 2021). Eles são projetados em formatos de valas, espaços retangulares e estruturas encaixadas no subsolo em calçadas, canteiros, praças, lotes, parques, entre outros (Silva & Moura, 2017). Esses sistemas são reconhecidos como dispositivos eficazes na redução do volume de escoamento, melhoria da qualidade das águas pluviais e recarga das águas subterrâneas (Li *et al.*, 2021). Miao *et al.* (2019) e Taura *et al.* (2021) destacam que uma infraestrutura verde pode ser criada com a combinação de sistemas de biorretenção.

Kasprzyk *et al.* (2022) destacam as soluções baseadas na natureza e o como elas estão se desenvolvendo enquanto ferramentas multifuncionais inovadoras para maximizar os benefícios aos ecossistemas urbanos, tais como a preservação de águas pluviais, a redução do escoamento e a proteção contra inundações, a prevenção da poluição das águas subterrâneas, a melhoria da biodiversidade e o controle do microclima. Os autores citam a cidade polonesa de Gdańsk como pioneira no país a introduzir amplamente os jardins de chuva.

Os jardins de chuva são um exemplo de solução baseada na natureza e com tipologia de sistema de biorretenção com função de reter as águas pluviais e permitir a infiltração da água no solo, minimizando os impactos advindos do escoamento superficial, enquanto elemento mitigador de pico de vazão de chuva (Melo *et al.*, 2014). Além disso, são uma prática eficaz de desenvolvimento de baixo impacto (Zhang *et al.*, 2021), e têm sido amplamente defendidos para serem construídos como elementos do paisagismo urbano associado a redução do escoamento de águas pluviais a partir dos processos de retenção e infiltração (Tang *et al.*, 2016).

Iftekhar *et al.* (2021) abordam que os jardins de chuva são elementos importantes da infraestrutura urbana sensível à água nos Estados Unidos, em Cingapura e na Austrália (em Sydney e em Melbourne, as duas cidades australianas mais populosas). Santos e Enokibara (2022) pontuam que os jardins de chuva são elementos da infraestrutura verde e utilizados para o gerenciamento de águas pluviais.

A cidade de Nova York, nos EUA, lançou um plano de infraestrutura verde que abriria caminho para a cidade gerenciar suas águas pluviais desde 2010. O departamento de proteção ambiental da cidade concluiu vários projetos, entre 2010 e 2018, de infraestrutura verde e 4.585 jardins de chuva foram construídos ou estavam em construção. Dentre eles existem tipologias diferentes (padrão e menores ou maiores que o padrão), sendo o modelo com variação de comprimento entre 3,05 m e 6,1 m, largura entre 1,2 m a 1,5 m e 0,91 m de base de

pedra para acúmulo de água. Cada jardim de chuva padrão tem a capacidade de reter e gerenciar 7,08m³ de águas pluviais (Elborolasy & Cataldo, 2020).

Em relação ao dimensionamento nos projetos dos jardins de chuva, Dussaillant *et al.* (2005) constataram que um jardim de chuva com uma área superficial de 10–20% da área impermeável contribuinte, maximiza a recarga. A depender do clima de onde ele será instalado, a exemplo num clima árido de Santiago, no Chile, a proporção ótima foi de 10-20%, já para o clima árido de Reno, em Nevada, nos EUA, era mais perto de 5%. Então, conforme os autores, o intervalo deve variar de 5% a 20% da área impermeável de coleta de água pluvial.

De acordo com Uncapher e Woelfle-erskine (2012), as dimensões recomendadas para o dimensionamento do jardim de chuva variam de acordo com o tipo de solo e com a área total de captação, os autores destacam que solos mais argilosos necessitam de uma camada de acumulação dimensionada maior que os solos arenosos porque possuem mais finos na sua composição, com menores índice de vazios e coeficiente de permeabilidade em relação aos arenosos. Os seus custos podem ser classificados em: investimento, manutenção e oportunidade do uso da terra (Siwiec *et al.*, 2018). Além de agregarem valores ecológicos às residências, são conhecidos por filtrar cerca de 90% do cobre, chumbo e zinco; 50% de nitrogênio; e 65% do fósforo que de outra forma poderia fluir para os esgotos pluviais e eventualmente para os corpos d'água utilizados no abastecimento local (Morash *et al.*, 2019; Vaculová & Fуска, 2017).

Segundo Trojanowska (2020) os jardins de chuva são elementos dinâmicos da paisagem urbana, pois além das funções ecológicas, eles também beneficiam a saúde humana e a autora apresenta dois exemplos de gestão sustentável da água em Gdynia, na Polônia, e um em Asnières, perto de Paris, na França. Os jardins construídos em Gdynia criaram um lugar convidativo, promoveram uma regeneração urbana e fizeram diferença na qualidade de vida local, pois espaços anteriormente negligenciados tornaram-se convidativos. A Rue Soeur Valerie em Asnières foi um outro exemplo de como criar uma rua amigável e caminhável ao utilizar um sistema de drenagem de água sustentável.

Projetos de infraestrutura verde proporcionam diversas formas de benefícios à população urbana e melhora a qualidade de vida dos habitantes (Zelenáková & Junáková, 2023). Siwiec *et al.* (2018) afirmam que as áreas verdes melhoram o conforto térmico durante os dias quentes e aumenta a umidade do ar, o que ajuda a aliviar os

efeitos do calor intenso durante o verão. Em períodos de onda de calor, a temperatura em áreas vegetadas suburbanas passa a ser significativamente mais baixa quando comparada à temperatura no centro da cidade. Consequentemente, o jardim de chuva não só previne inundações, mas também atenua o microclima e por consequência melhora o conforto térmico dos cidadãos, além de contribuir positivamente para o paisagismo e a qualidade de vida local.

Este estudo visa avaliar se a utilização de um jardim de chuva contribui para a mitigação de alagamentos urbanos. Para isso apresentou-se um projeto piloto de execução de um jardim de chuva na cidade de Recife-PE incorporando a análise da possibilidade de criação de dispositivos práticos e eficientes que melhorem as condições de infiltração de uma cidade altamente impermeabilizada. Também foi inserido o uso de material reciclado, tornando o dispositivo de drenagem mais sustentável ao oferecer destinação para resíduos da construção civil.

Material e métodos

Esta seção apresenta todas as etapas do projeto piloto experimental de execução de um jardim de chuva na escola Politécnica – POLI da Universidade de Pernambuco – UPE em Recife, Brasil. Sendo elas, a caracterização do local de instalação do jardim de chuva; a determinação da chuva de projeto; a escolha da geometria do jardim e da cobertura vegetal; a determinação do volume útil necessário; a execução do projeto experimental; e a simulação dos eventos de chuva.

Área de Estudo

O estudo experimental foi realizado na Escola Politécnica de Pernambuco (POLI/UPE), localizada no bairro da Madalena, na cidade de Recife, em Pernambuco. Mais especificamente na área da instituição, com as coordenadas: Latitude S 8° 03' 31.8" e Longitude W 34° 54' 12.7". A cidade de Recife está situada numa grande planície de baixa altitude sujeita à inundações agravadas, nos momentos de chuvas intensas e marés altas (Cabral & Alencar, 2005). Silva Junior *et al.* (2020) destacam que os impactos significativos que podem ser observados no sistema de drenagem urbana devido aos efeitos das mudanças climáticas são agravados pela urbanização desordenada, índices pluviométricos elevados e o sistema de drenagem local com influência e vulnerabilidade à variabilidade diária das marés na cidade.

O jardim de chuva a partir da sua definição, funcionalidade e aplicação, torna-se objeto componente das cidades resilientes, como medida adequada a ser inserida nos modelos de gestão de água urbanas. Para implantação do jardim de chuva foi escolhido um local que não era usado para estacionamento nem tinha outros usos (local 1 na Figura 1) e para captação da água pluvial experimental foi escolhida uma área retangular (3,35 m x 14,9 m) próxima ao experimento (local 2 na Figura 1).

A área permeável da instituição em relação à sua área impermeável é consideravelmente pequena, pois representa apenas 4,35% da área total do seu terreno. Os 95,65% de área impermeável promovem maiores volumes escoados devido ao baixo percentual de infiltração de água pluviais no solo, agravando a magnitude dos alagamentos nos dias de chuva. A escolha do campo experimental nessa localização se deu também pela disponibilidade de área própria da instituição, e a utilização de um espaço até então ocioso, transformando-o em equipamento de pesquisa, com uma técnica compensatória permanente que

embeleza o espaço interno, contribui com o conforto térmico do entorno.

Para avaliação do local da execução foram verificados: o nível do lençol freático, a partir de um furo de sondagem investigativa até uma profundidade de identificação da presença de água; as condições de infiltrabilidade e de permeabilidade; e a caracterização granulométrica do solo. No laboratório, as amostras foram preparadas e ensaiadas conforme as normas técnicas e métodos de ensaio: ABNT NBR 6457 (2016) – Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização; ABNT NBR 7181 (2016) – Solo - Análise Granulométrica; ABNT NBR 7180 (2016) – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade; e ABNT NBR 6459 (2016) – Solo – Determinação do Limite de Liquidez.

Em campo foi realizado o teste do infiltrômetro com anel simples, que explora a estrutura do solo e suas propriedades hidráulicas através da avaliação do comportamento permeável real do solo com volumes sucessivos de água despejados no interior do anel simples cravado no solo.



Figura 1 – Área do experimento. (1 – local do jardim de chuva, 2- Área de coleta da chuva experimental).
Fonte: Autores. Elaborado a partir do Google Maps.

A caracterização do solo foi realizada em amostras retiradas a cada 0,25 m até a profundidade de 1,25 m na área de implantação do jardim de chuva. Em cada uma das camadas (25 cm, 50 cm, 75 cm, 1 m e 1,25 m) o ensaio de infiltração com anel simples foi realizado com repetição de 3 pontos por profundidade e a partir dos pontos ensaiados foram construídas as curvas de infiltração com realização do ajuste da curva com a utilização do modelo de Horton. Este modelo determina que a

taxa de infiltração de água em solo inicialmente seco, decai exponencialmente até atingir um valor constante, que pode ser considerado igual à condutividade hidráulica do solo saturado (Horton, 1941). Também foi utilizado o software computacional Hydrus 1-D para obtenção da curva de infiltração (Radcliffe & Simunek, 2018).

Determinação da chuva de projeto

Para determinação da chuva de projeto foi utilizada a equação IDF (intensidade, duração e

frequência) referente à Região Metropolitana do Recife, indicada na Equação 1 (Silva Júnior & Silva, 2016). Sabe-se que, conhecer a intensidade das precipitações, para diversas durações de chuva e período de retorno, é fundamental no dimensionamento de sistemas de drenagem urbana, bem como para o estudo da medida compensatória proposta.

$$i = \frac{611,3425 * T_r^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (1)$$

Onde:

i - intensidade da chuva (mm/h);

t - duração da chuva (minutos);

Tr - tempo de retorno (anos).

Escolha da geometria do jardim de chuva e da cobertura vegetal

A área do jardim foi definida como um retângulo de 2,00 m por 3,00 m por critérios de

facilidade de execução. A geometria retangular proporciona melhor domínio da exatidão de medidas e melhor manuseio da escavação. Quanto a profundidade a ser escolhida, esta é definida em função da composição do solo e sua permeabilidade, considerando também a profundidade do lençol subterrâneo local.

Para realizar um experimento controlado, escolheu-se para captação uma área retangular de 49,91 m² disponível nas proximidades do experimento (Figura 2). Portanto a área do jardim com 6m² corresponde a aproximadamente 12% da área de captação, aderente à recomendação de Dussailant *et al.* (2005) que sugerem uma área do jardim entre 5% e 20% da área de captação de chuva.



Figura 2 - Área de coleta com dimensões, totalizando 49,91 m². Fonte: Autores.

Durante a escolha da cobertura vegetal foi levado em consideração a utilização popular das espécies em jardins, espaços públicos e custo relativamente baixo, apresentando como aspecto positivo o custo-benefício, facilidade de poda e manutenção, e ainda que, elas floresçam ou apresentem folhas com cores diferenciadas, que embelezam e diversificam o dispositivo experimental. O Quadro 1 descreve detalhes das espécies utilizadas na cobertura vegetal, como: nome científico, popular, origem, clima e ciclo de vida.

A camada de terra do jardim deve possuir a espessura mínima ideal para as espécies escolhidas e utilizadas. Para o projeto experimental as 3

espécies escolhidas são adaptadas ao clima da cidade de Recife e podem ser expostas ao sol ao mesmo tempo que contribuem com a beleza paisagística do jardim de chuva.

Determinação do volume útil necessário

O volume útil necessário representa o menor valor volumétrico que a camada de material gráudo, responsável pela retenção e armazenamento da água nos seus espaços vazios, deve possuir. Para determiná-lo são considerados a chuva de projeto estimada, a área de contribuição do jardim de chuva (área propriamente dita acrescida da área de coleta) e o coeficiente adimensional que representa a

tipologia de urbanização da área. O limite inferior do coeficiente é 0,05 para área de matas e parques e o superior é 0,95 para locais densamente urbanizados. Foi adotado o valor de 0,85 devido à área estudada estar próxima a característica de elevada urbanização. O método utilizado para o determinação é o racional (Equação 2), que relaciona os 3 fatores.

Ou seja, o volume mínimo (V) para a camada núcleo do jardim de chuva é numericamente igual ao produto da vazão (Q) do método racional pelo tempo (t) de duração utilizado na chuva de projeto, conforme a Equação 3.

$$Q = \frac{C * i * A}{60}$$
 (2)

$$V = Q * t$$
 (3)

No entanto, o resultado do método racional expressa uma unidade de vazão e para encontrar o volume útil necessário, de fato, relaciona-se a partir da conceituação da vazão (determinado volume em um dado intervalo de tempo).

- Onde:
- Q - Vazão de projeto (L/min)
 - C - Coeficiente adimensional
 - i - Intensidade de chuva (mm/h)
 - A - Área de contribuição (m²)
 - V – Volume útil necessário (m³)
 - t - duração da chuva (minutos)

Quadro 1 Cobertura vegetal utilizada no Jardim. Fonte: Adaptado de (Saueressig, 2016)

COBERTURA VEGETAL – JARDIM DE CHUVA			
			
Nome Científico	<i>Ixora coccinea</i>	<i>Dianella tasmanica</i>	<i>Evolvulus glomeratus</i>
Nomes Populares	Ixora, Icsória, Ixora-coral, Ixória	Dianela, Dionela	Evólculo, Azulzinha
Família	Rubiaceae	Xanthorrhoeaceae	Convolvulaceae
Categoria	Arbustos, Arbustos Tropicais, Cercas Vivas, Flores Perenes	Folhagens, Forrações ao Sol Pleno, Gramados e Forrações	Flores Perenes, Forrações à Meia Sombra, Forrações ao Sol Pleno
Clima	Equatorial, Oceânico, Subtropical, Tropical	Equatorial, Mediterrâneo, Oceânico, Subtropical, Temperado, Tropical.	Equatorial, Subtropical, Tropical
Origem	Indonésia, Malásia	Austrália, Oceania, Tasmânia	América do Sul, Brasil, Paraguai
Altura	0.9 a 1.2 metros	0.3 a 0.4 metros	0.1 a 0.3 metros
Luminosidade	Sol Pleno	Meia Sombra, Sol Pleno	Meia Sombra, Sol Pleno
Ciclo de Vida	Perene	Perene	Perene

Simulação dos eventos de chuva

Para analisar a eficiência do jardim de chuva foram realizados eventos de chuva simulados através do aporte de um determinado volume de água sobre a área conhecida do jardim de chuva (6m²) e da área de coleta pluvial (49,91m²) num total de 55,91 m², de modo a representar a distribuição pluviométrica. As simulações

ocorreram de maneira progressiva, de 1m³ até 5m³, sendo a área de contribuição igual para todos os casos (área de coleta somada a área do jardim). Em função desses dados, foram determinadas as precipitações simuladas a partir dos volumes de água colocados na área, conforme o fluxograma da Figura 3.

A partir dos volumes utilizados nas simulações na área de contribuição, calculou-se a altura de chuva simulada. Com o tempo de chuva (relativo ao tempo em que os tanques utilizados e a água esvaziavam) e o tempo de escoamento (referente ao tempo em que toda a água contida na

área de coleta demorava para acessar em sua totalidade o jardim) calcularam-se as intensidades das chuvas simuladas e da chuva produzida, classificadas como: muito forte, extrema ou muito extrema.

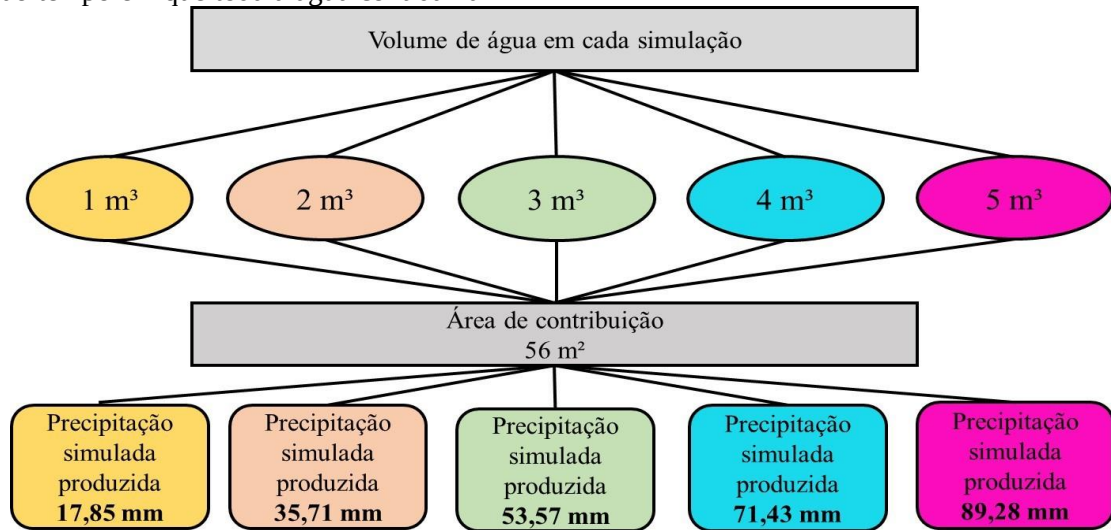


Figura 3 - Fluxograma das simulações. Fonte: Autores.

Para a realização das simulações, foram utilizados tanques plásticos com capacidade de 1m³ cada. Ao total foram realizadas 11 simulações, sendo os volumes de 1 m³ e 2 m³ realizados uma única vez e os volumes de 3 m³, 4m³ e 5 m³

realizadas três vezes, cada, com o objetivo de avaliar um comportamento médio do jardim de chuva para cada situação. A Figura 4 apresenta uma simulação em execução.



Figura 4 – Simulação de chuva em execução. As águas pluviais simuladas são conduzidas da área de captação para o jardim através da tubulação. Fonte: Autores.

Para o monitoramento do nível de água dos piezômetros internos do jardim durante as simulações experimentais, foi utilizado um medidor automático desenvolvido pela empresa AMPEQ. Este equipamento é capaz de captar, armazenar e disponibilizar as informações sobre o

monitoramento do nível de água e é composto por: datalogger, sensor, cabeamento que interliga o sensor e o datalogger. O software específico da AMPEQ permite a transmissão dos dados ao computador, via cabo USB (Figura 5).

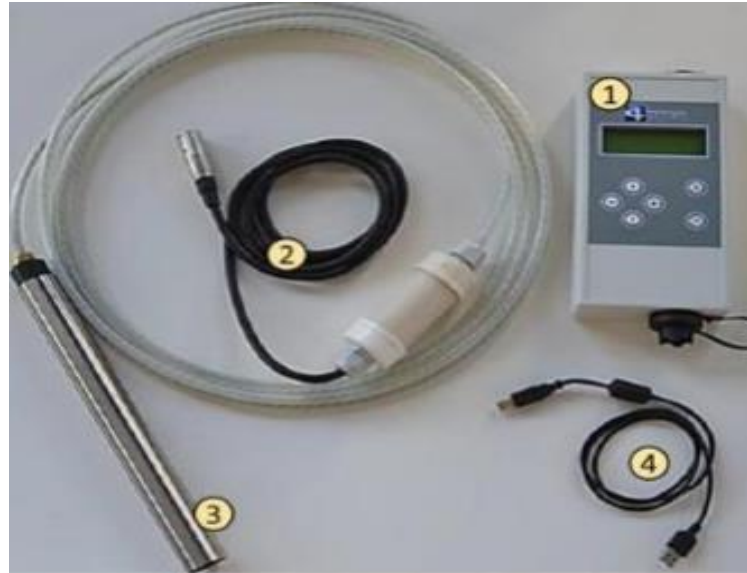


Figura 5 – Medidor automático de nível d'água – AMPEQ. 1 - datalogger, 2 - cabeamento entre sensor e datalogger, 3 – sensor, 4 - cabo USB para baixar dados. Fonte: Autores.

Resultados

Na área experimental foi encontrado a presença do lençol freático a uma profundidade de 1,90 m e com a observação das curvas granulométricas resumidas nas frações percentuais (Quadro 2) é possível identificar que em todas as amostras a faixa granulométrica predominante é a areia e apenas a amostra de areia do jardim não apresentou finos (silte e argila), justificado por ser uma camada escolhida e adquirida como areia pura

para ser a base do jardim de chuva. Para encontrar a profundidade adequada igual a 1,25 m para implantação do fundo do jardim os resultados dos ensaios de infiltração com a utilização do anel simples foram fundamentais pois apresentaram a camada com maior permeabilidade. A Figura 6 apresenta as 3 curvas de infiltração para a camada com profundidade de 1,25 m (experimental, modelo Horton e Hydrus 1-D).

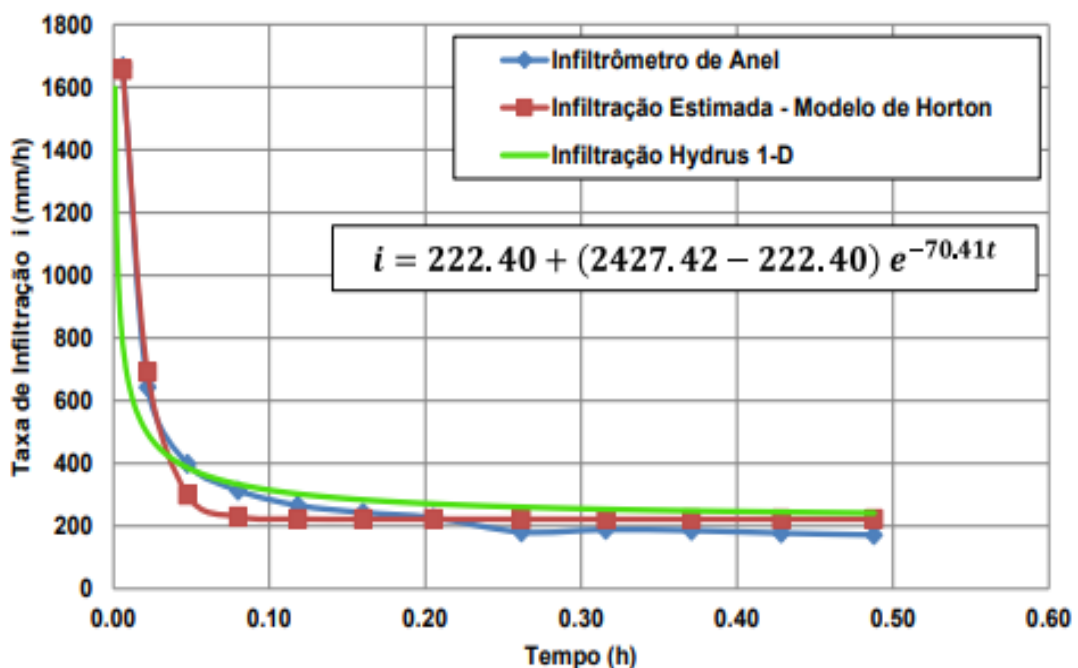


Figura 6 – Curvas de infiltração na profundidade 1,25m. Fonte: Autores.

Quatro 2 Caracterização e classificação do solo da área de estudo.

Perfil Estratigráfico	Fração Granulométrica	Classificação Granulometria	Classificação Triângulo textural
Amostra 1	 Pedregulho 14% Areia 64% Silte 22%	Areia siltosa	Areia franca
Amostra 2	 Pedregulho 2% Areia 71% Silte 11% Argila 16%	Areia silto argilosa	Franco arenoso
Amostra 3	 Areia 68% Silte 32%	Areia siltosa	Franco arenos
Amostra 4	 Areia 79% Silte 21%	Areia siltosa	Areia franca
Amostra 5	 Pedregulho 5% Areia 83% Silte 12%	Areia	Areia
Areia do jardim	 Pedregulho 4% Areia 96%	Areia	Areia

Na determinação da chuva de projeto, por se tratar de uma microdrenagem e de um bairro residencial e comercial, foi considerado um tempo de retorno de 5 anos e uma duração de chuva intensa de 10 minutos. Ao aplicar os valores na Equação 1, encontra-se o valor de intensidade da chuva igual a 130,94 mm/h (Equação 4).

$$i = \frac{611,3425 * 5^{0,1671}}{(10+7,3069)^{0,6348}} \quad (4)$$

$$i = 130,94 \text{ mm/h}$$

A determinação do volume útil necessário para a camada núcleo do jardim de chuva, tem na aplicação da Equação 2 o resultado da vazão pelo método racional (Equação 5) com a utilização do coeficiente adimensional utilizado no método

racional igual a 0,85, que se adequa ao elevado nível de urbanização da área de estudo

A intensidade da chuva de projeto foi definida pela Equação 4 e a área de contribuição é aproximadamente igual a 56 m² (área do jardim somada a área de coleta). Na aplicação da Equação 3 com o tempo de duração utilizado igual a 10 minutos, o valor do volume útil mínimo é indicado na Equação 6.

$$Q = \frac{0,85 * 130,94 * 56}{60} \quad (5)$$

$$Q = 103,87 \text{ L/min}$$

$$V = 103,87 * 10 = 1038,7 \text{ L (1,04 m}^3\text{)} \quad (6)$$

O material graúdo da camada núcleo do jardim de chuva utilizado é um agregado reciclado, resultante do beneficiamento de resíduos da construção civil (RCC). A espessura da camada foi definida com 90 cm e o volume ocupado pelo agregado reciclado foi de 5,4 m³ (ao considerar os 6 m² de área do jardim). Esta espessura foi escolhida considerando que na profundidade de

1,25 m encontra-se a camada mais permeável dentre as analisadas. Dos 125 cm totais, 17cm foram utilizados para colocação da terra do substrato para a camada vegetal superficial além de um desnível necessário para proteção e isolamento do jardim. O modelo do jardim de chuva experimental é indicado na Figura 7.

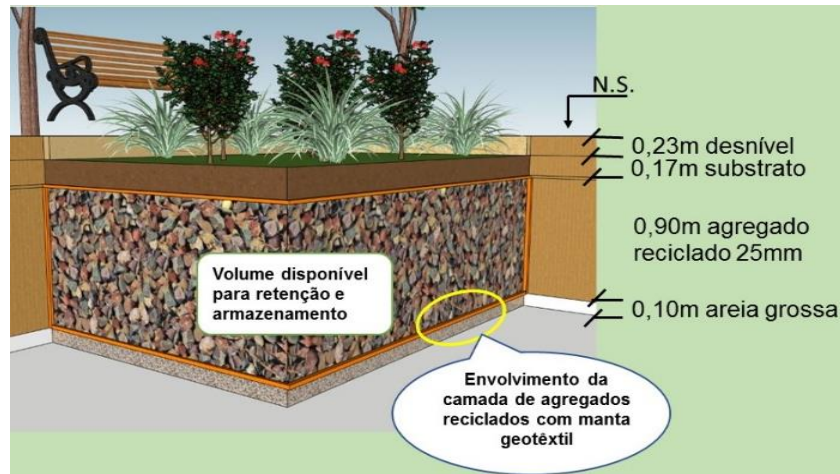


Figura 7 - Modelo do jardim de chuva experimental. Fonte: Autores.

O jardim de chuva experimental foi executado em seu espaço interno pelas camadas, ordenadas de cima para baixo: vegetação, substrato de terra para as plantas, manta geotêxtil, camada de agregado graúdo (núcleo), manta geotêxtil, camada de areia com granulometria permeável na base do jardim. Assim o dispositivo compensatório de drenagem funciona como objeto biorretentor que armazena as águas pluviais e também permite a infiltração da água no solo, como também foi apresentado por Li *et al.* (2021).

A execução do jardim de chuva iniciou-se com uma escavação do espaço interno do jardim com dimensões 2 m x 3 m e 1,35 m de profundidade (Figura 8a), resultando em um volume de 8,1 m³ de solo. Destaca-se que a profundidade total escavada foi pela definição do fundo do jardim ser a 1,25m acrescido de 10cm para a camada mais profunda de areia grossa e as dimensões de 2 m x 3 m são explicadas para o atingimento dos 6m² de área determinados, com formação retangular. Após a escavação, a base foi regularizada com régua de

pedreiro (Figura 8b) e forrada com a camada de areia grossa com granulometria permeável (Figura 8c) com função de filtrar a água recebida e acumulada na camada de agregado reciclado do jardim antes dela se infiltrar diretamente no solo.

Após a camada de areia grossa, a manta geotêxtil não-tecido (RT16) agulhada de filamentos contínuos 100% poliéster (comercialmente conhecida como bidim) foi aplicada por toda área interna (Figura 9a) com duas finalidades principais: criar uma membrana que isole a camada de material graúdo reciclado e não permita que o material fino, tanto do solo natural como a terra de jardim, obstrua os espaços existentes no material graúdo (índice de vazios). Foram instalados dois piezômetros confeccionados com tubos de PVC, diâmetro de 50 mm (Figura 9b), fixados perpendicularmente ao fundo para servir de monitoramento do nível da água no dispositivo de drenagem executado. Os piezômetros também foram protegidos com utilização de manta geotêxtil.

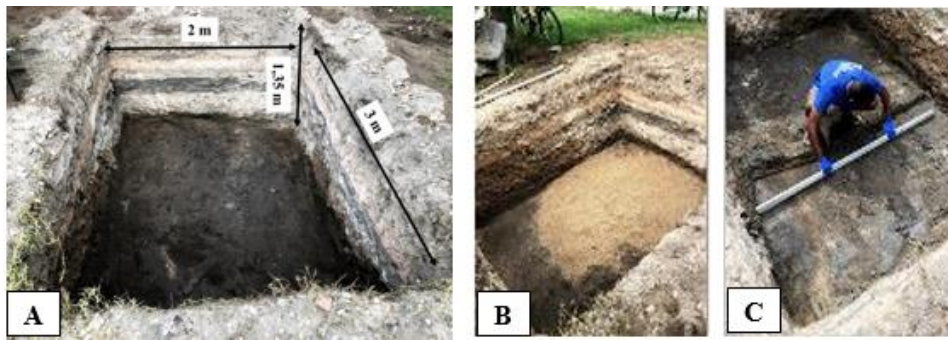


Figura 8 – Escavação e regularização da base. Fonte: Autores.

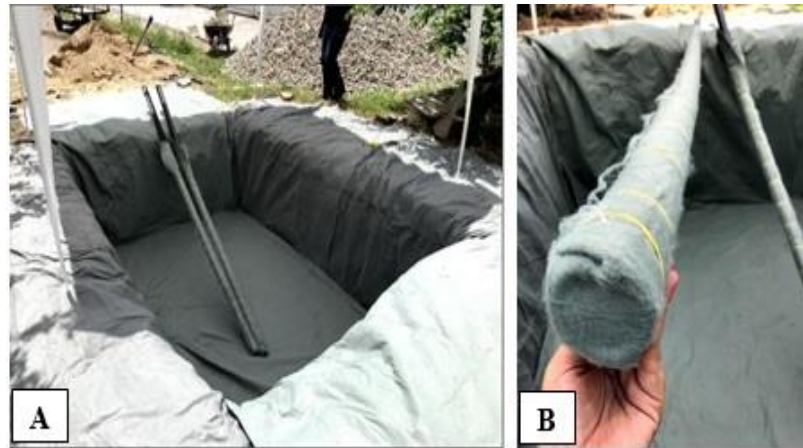


Figura 9 – Manta geotêxtil e piezômetros. Fonte: Autores.

Logo após a fixação dos piezômetros, o agregado graúdo do núcleo do jardim foi introduzido no interior do espaço escavado e protegido pela manta. A colocação do agregado reciclado foi realizada manualmente (Figura 10a), da forma recebida do fornecedor, sem nenhum tratamento, separação de grãos ou extração de finos, e com essas atitudes, o comportamento real do material foi observado, com o direcionamento dos resultados à realidade de campo. As funcionalidade do agregado graúdo reciclado (granulometria 25 mm) são de preencher a diferença de altura entre o nível do solo (descontada a espessura da camada vegetal) e a camada de solo permeável mais próximo à superfície, neste caso, localizada a uma profundidade a partir de 1,25 m; e por apresentar

alta porosidade, reter e armazenar a água nos espaços vazios internos na ocorrência de chuvas.

Após o envelopamento do agregado graúdo com a manta geotêxtil, a camada vegetal foi instalada e utilizou-se 1 m³ de terra preparada para jardim com granulometria permeável (Figura 10b) distribuída na área de 6 m² (3m x 2m). Com 1m³ de terra, distribuído em 6m² de área formou-se uma camada de terra igual a 0,17 m de altura. No plantio do jardim, foram colocadas 90 unidades de mudas de plantas por um profissional da jardinagem utilizando os espaçamentos entre as mudas para permitir crescimento (Figura 10c).

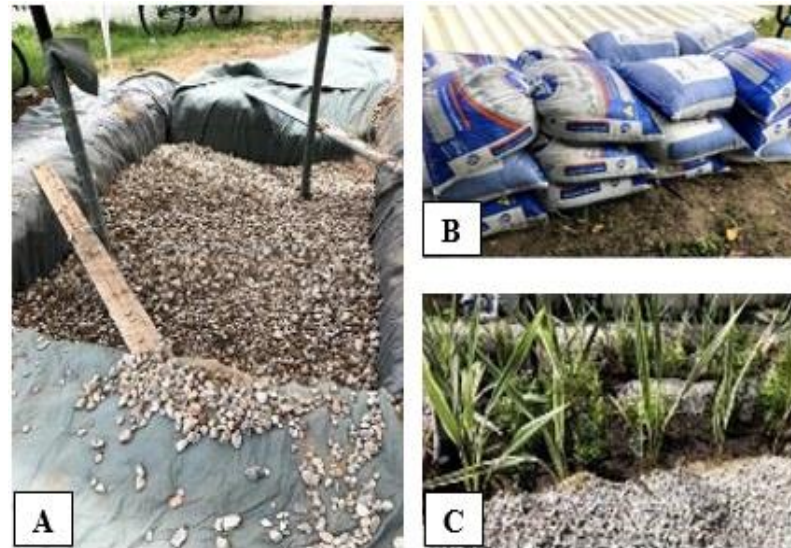


Figura 10 – Colocação do agregado graúdo e camada vegetal. Fonte: Autores.

Em relação a camada núcleo de $5,4 \text{ m}^3$ de volume, após determinação, em laboratório, do índice de vazios para o material utilizado de 25 mm de granulometria, determinou-se o índice igual a 46,11% de vazios. Dessa forma o jardim está preparado para reter e armazenar $2,49 \text{ m}^3$ de água (ao considerar o volume multiplicado pelo índice de vazios), atendendo ao volume útil mínimo necessário ($1,04 \text{ m}^3$). Destaca-se que esse valor de $2,49 \text{ m}^3$ indica um volume que pode entrar rapidamente no jardim e ficar armazenado para se infiltrar no solo gradativamente. Tendo em vista que a água armazenada infiltra-se no solo, é aberto espaço para mais água entrar no jardim, de modo que o volume de retenção de água pela camada porosa é superior aos $2,49 \text{ m}^3$.

Para avaliar o comportamento desse jardim de chuva experimental, as simulações dos eventos chuvosos realizadas resultaram em chuvas intensas

induzidas. O Quadro 3 apresenta um resumo das simulações, a destacar que: a altura de chuva indica o volume utilizado dividido pela área de contribuição; o tempo de escoamento é referente ao intervalo temporal até toda a água contida na área de coleta escoar para o jardim; a chuva produzida é a relação entre a altura de chuva e o tempo de escoamento e o índice de utilização da capacidade do jardim é a razão entre o nível máximo de água atingido na simulação e a espessura total disponível para o armazenamento de água, igual a 90cm.

Em relação a altura máxima de água atingida durante as simulações, ao momento em que estas ocorreram e ao tempo total de infiltração, foram determinados a partir das leituras contínuas do medidor automático AMPEQ. Todas as simulações realizadas, com os seus respectivos níveis máximos atingidos estão representadas na Figura 11.

Quadro 3 - Resumo das simulações realizadas.

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5
Volume (m^3)	1	2	3	4	5
Área de contribuição (m^2)	56	56	56	56	56
Altura de chuva (mm)	17,85	35,71	53,57	71,43	89,28
Tempo de escoamento (min.)	12	23	25	32	34
Chuva produzida (mm/h)	89,30	93,97	127,54	134,77	156,63
Classificação da Chuva	Chuva Muito Forte	Chuva Muito Forte	Chuva Extrema	Chuva Extrema	Chuva Muito Extrema
Nível máximo interno (cm)	20	42,5	52	60,6	67
Tempo para atingir o nível máximo	12 min 21 seg.	15min 41 seg.	21 min 36 seg.	21 min 37 seg.	29 min 11 seg.
Tempo de Infiltração	1 h 12 min.	2 h 24 min	3 h 21 min.	4 h 19 min.	5 h 30 min.
Índice de utilização da capacidade do jardim	0,22	0,47	0,57	0,67	0,74

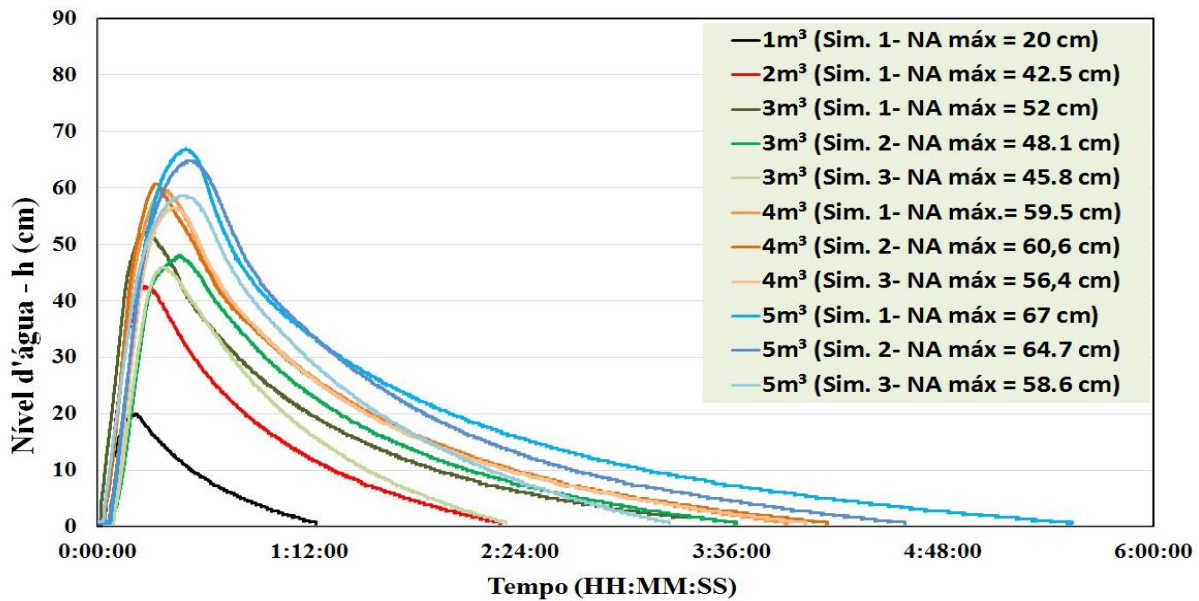


Figura 11 - Simulações de chuvas em campo: Nível d'água atingido X Tempo de Infiltração.

Os resultados apresentaram que, em todas as simulações realizadas, o nível máximo interno não superou 70 cm e o índice de utilização da capacidade do jardim foi inferior a 80%, pois existe 90 cm de espessura disponíveis para o acúmulo de águas pluviais. Ressalta-se ainda que, na condição mais crítica simulada, com a maior intensidade pluviométrica igual a 156,63mm/h, o volume de água colocado no jardim (5m³) foi praticamente 5 vezes maior do que o volume útil mínimo (1,04m³) e o dispositivo mostrou-se eficiente e atendeu satisfatoriamente as simulações de chuva intensa.

O local escolhido para a implantação do jardim de chuva sofreu uma transformação visual, pois se tratava de um espaço ocioso, sem utilização das pessoas e após a instalação do jardim de chuva e revitalização da área (poda de árvores, limpeza e recuperação do espaço), tornou-se um ambiente agradável e de convivência (Figura 12). Destaca-se ainda como contribuição deste estudo, a utilização de resíduo gerado pela indústria da construção civil (RCC) na execução do jardim de chuva apresentando um possibilidade de reaproveitamento do RCC para utilização em um dispositivo sustentável de drenagem urbana.



Figura 12 - Jardim de chuva experimental concluído.

Conclusões

1. O estudo abordou uma temática relevante para as cidades densamente urbanizadas e com uma grande área impermeável na sua extensão ao apresentar conceitos sustentáveis para o manejo de águas pluviais urbanas.
2. A execução do jardim de chuva, enquanto técnica compensatória de controle de águas pluviais na fonte, apresentou altos volumes de retenção de água (até 5m³ simulados) e consequentemente uma redução nos volumes de precipitação escoados.
3. No sistema estudado, a simulação de chuva mais crítica (156,63 mm/h) obteve um índice de utilização da capacidade de retenção do jardim abaixo dos 80% da sua capacidade total e mostra-se eficiente para comportar eventos de chuvas intensas e rápidas.
4. A execução do experimento possibilitou a revitalização de uma área ociosa e transformou-a em um local de convivência e socialização e com a utilização de um material sustentável.
5. O jardim de chuva apresenta-se então como um eficiente dispositivo mitigador de pico de vazão de chuva e potencial para reduzir as inundações urbanas.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR 6457: Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.
- Cabral, J. J. S. P., & Alencar, A. V. (2005). Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas. Recife e a convivência com as águas. Cooperação Brasil-Itália em saneamento ambiental, Ed. Gráfica Brasil: p.111-130.
- Caprario, J., Rech, A. S., Tasca, F. A., & Finotti, A. R. (2019). Influence of drainage network and compensatory techniques on urban flooding susceptibility. *Water Science and Technology*, 79(6), 1152-1163. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.113>.
- Chen, V., Bonilla Brenes, JR, Chapa, F., & Hack, J. (2021). Development and modelling of realistic retrofitted Nature-based Solution scenarios to reduce flood occurrence at the catchment scale. *Ambio*, 50, 1462-1476. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01493-8>.
- Dussaillant, A. R., Cuevas, A., & Potter, K. W. (2005). Raingardens for stormwater infiltration and focused groundwater recharge: simulations for different world climates. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(3-4), 173-179. <https://doi.org/10.2166/ws.2005.0097>.
- Elboroloso, Y., & Cataldo, J. (2020). International Low Impact Development Conference 2020: Setting the Vision for the Next Twenty Years - Proceedings of the International Low Impact Development Conference 2020, pp. 68-73. <https://doi.org/10.1061/9780784483114.006>.
- Glick, R., Jeong, J., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & Her, Y. (2023). Adaptation of SWAT Watershed Model for Stormwater Management in Urban Catchments: Case Study in Austin, Texas. *Water*, 15(9), 1770. <https://doi.org/10.3390/w15091770>
- Horton, R. E. (1941). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity 1. *Soil science society of America journal*, 5(C), 399-417.
- Iftekhar, M. S., Zhang, F., Polyakov, M., Fogarty, J., & Burton, M. (2021). Non-market values of water sensitive urban designs: A case study on rain gardens. *Water Resources and Economics*, 34, 100178. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2021.100178>.
- Kasprzyk, M., Szpakowski, W., Poznańska, E., Boogaard, F. C., Bobkowska, K., & Gajewska, M. (2022). Technical solutions and benefits of introducing rain gardens—Gdańsk case study. *Science of The Total Environment*, 835, 155487. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155487>
- Kniess, C. T., Aguiar, A. D. O., Conti, D. D. M., & Philippi, A. (2019). Inovação urbana e recursos humanos para gestão de cidades sustentáveis. *Estudos Avançados*, 33, 119-136. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3397.007>.
- Koomen, E., Van Bommel, M. S., Van Huijstee, J., André, B. P. J., Ferdinand, P. A., & Van Rijn, F. J. A. (2023). An integrated global model of local urban development and population change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 100, 101935.

- <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101935>.
- Li, G., Xiong, J., Zhu, J., Liu, Y., & Dzakpasu, M. (2021). Design influence and evaluation model of bioretention in rainwater treatment: A review. *Science of the Total Environment*, 787, 147592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147592>.
- Lopes Bezerra, P.H., Coutinho, A.P., Lassabatere, L., Santos Neto, S.M.D., Melo, T.D.A.T.D., Antonino, A.C.D., Jaramillo R. A., & Montenegro, S.M.G.L. (2022). Water Dynamics in an Infiltration Trench in an Urban Centre in Brazil: Monitoring and Modelling. *Water*, 14 (4), 513. <https://doi.org/10.3390/w14040513>.
- Mabrouk, M., Han, H., Fan, C., Abdrabo, K. I., Shen, G., Saber, M., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2023). Assessing the effectiveness of nature-based solutions-strengthened urban planning mechanisms in forming flood-resilient cities. *Journal of Environmental Management*, 344, 118260. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118260>
- Melo, T. D. A. T. D., Coutinho, A. P., Cabral, J. J. D. S. P., Antonino, A. C. D., & Cirilo, J. A. (2014). Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. *Ambiente Construído*, 14, 147-165. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400011>.
- Miao, Z. T., Han, M., & Hashemi, S. (2019). The effect of successive low-impact development rainwater systems on peak flow reduction in residential areas of Shizhuang, China. *Environmental earth sciences*, 78, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8016-z>.
- Morash, J., Wright, A., LeBleu, C., Meder, A., Kessler, R., Brantley, E., & Howe, J. (2019). Increasing sustainability of residential areas using rain gardens to improve pollutant capture, biodiversity and ecosystem resilience. *Sustainability*, 11(12), 3269. <https://doi.org/10.3390/su11123269>.
- Pérez-Morales, A., Romero-Díaz, A., & Illán-Fernandez, E. (2021). Chapter 22 - Rainfall, anthropogenic soil sealing, and floods. An example from southeastern Spain. In: *Rodrigo-Comingo, J. (Ed.), Precipitation* (pp. 499-520). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00022-7>.
- Radcliffe, D. E., & Simunek, J. (2018). Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. CRC press.
- Santos, M. F. N., & Enokibara, M. (2021). Infraestrutura verde: conceitos, tipologias e terminologia no Brasil. *Paisagem e Ambiente*, 32(47), e174804-e174804. <https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.paam.2021.174804>.
- Santos, M. F. N., Barbassa, A. P., & Vasconcelos, A. F. (2021). Low impact development strategies for a low-income settlement: Balancing flood protection and life cycle costs in Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102650. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102650>
- Saueressig, D. (2016). Espécies Ornamentais: para vasos, floreiras e jardins. 1 ed. Editora Plantas do Brasil.
- Silva Junior, M. A. B. Da., Cabral, J. J. D. S. P., Fonseca Neto, G. C., Silva, P. O., Guerra, C. M. F., & da Silva, S. R. (2020). Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(3), 302-318. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318>.
- Silva Junior, M. A. B., & Da Silva, S. R. (2016). Impactos da urbanização e das alterações climáticas no sistema de drenagem do Recife-PE (Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(6), 2034-2053. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.6.p2034-2053>.
- Silva, S. R. Da., & Moura, E. F. DA S. (2017). Drenagem Urbana Sustentável. In: Silva, E. R., Silva, S. R. DA (Eds.). *Sustentabilidade Urbana*. 1. ed. Editora Universidade de Pernambuco – EDUPE: p. 85–98.
- Siwicz, E., Erlandsen, A. M., & Vennemo, H. (2018). City greening by rain gardens-costs and benefits. *Environmental Protection and Natural Resources*, 29(1), 1-5. <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0001>.
- Tang, S., Luo, W., Jia, Z., Liu, W., Li, S., & Wu, Y. (2016). Evaluating retention capacity of infiltration rain gardens and their potential effect on urban stormwater management in the sub-humid loess region of China. *Water resources management*, 30, 983-1000. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1206-5>.
- Taura, F., Ohme, M., & Shimatani, Y. (2021). Collaborative development of green infrastructure: Urban flood control measures on small-scale private lands. *Journal of Disaster Research*, 16(3), 457-468. <https://doi.org/10.20965/jdr.2021.p0457>
- Trojanowska, M. (2020). Health-promoting places: Rain gardens and sustainable water

- management. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 960, No. 2, p. 022025). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/2/022025>.
- Uncapher, A., & Woelfle-Erskine, C. (2012). *Creating Rain Gardens: Capturing the Rain for Your Own Water-Efficient Garden*. Timber Press.
- Vaculová, V., & Fuska, J. (2017). Rain gardens—case study of potential locations identification using GIS. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 16(3), 217. <http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.3.217>.
- Vijayaraghavan, K., Biswal, B. K., Adam, M. G., Soh, S. H., Tsen-Tieng, D. L., Davis, A. P., Chew, S. H., Tan, P. Y., Babovic, V., & Balasubramanian, R. (2021). Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 292, 112766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>.
- Yang, W., Zhang, J., & Krebs, P. (2022). Low impact development practices mitigate urban flooding and non-point pollution under climate change. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131320>.
- Zelenakova, M., & Junakova, N. (2023). Implementation of green infrastructure elements to mitigate climate change and improve recreation in the municipality of drienov, slovakia. 106-110. 10.11118/978-80-7509-904-4-0106.
- Zhang, Y., Xu, H., Liu, H., & Zhou, B. (2021). The Application of Low Impact Development Facility Chain on Storm Rainfall Control: A Case Study in Shenzhen, China. *Water*, 13(23), 3375. <https://doi.org/10.3390/w13233375>.