Tecnologias sociais de apoio à drenagem urbana: aplicação de telhados verdes e cisternas em Caruaru - PE

Social technologies to support urban drainage: application of green roofs and cisterns in Caruaru - PE

Alexandre Carlos Araújo de Santana
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
alexandre.sustentat@hotmail.com

Maria das Graças Monteiro Almeida de Melo
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
mariadasgracasmonteiro@hotmail.com

Fernanda Gabriella Liberato Santos
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
fliberatto@gmail.com

Thaísa Mayane Tabosa da Silva
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
thaisatabosaa@gmail.com

Timóteo Herculino da Silva Barros
Universidade de São Paulo, Brasil
timoteo@alumni.usp.br

Jocimar Coutinho Rodrigues Junior
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
jocimar_junior@hotmail.com

José Almir Cirilo
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
jose.cirilo@ufpe.br

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
anderson.paiva@ufpe.br

Revista Presença Geográfica
vol. 13, núm. 1, 2026
Fundação Universidade Federal de Rondônia, Brasil
ISSN-E: 2446-6646
Periodicidade: Frecuencia continua
rpgeo@unir.br

Recepção: 25 Fevereiro 2025
Aprovação: 11 Março 2026

Resumo: Os processos hidrológicos constituem temática de elevada relevância para o planejamento territorial e urbano, uma vez que a dinâmica hidrossocial encontra-se intrinsecamente relacionada às ações antrópicas e às formas de uso e ocupação do solo. Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de implementação de tecnologias capazes de minimizar a ocorrência e os impactos associados a eventos hidrológicos extremos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade de utilização de telhados verdes e cisternas em habitações localizadas nos bairros do Cedro e em parte do bairro Indianópolis, no município de Caruaru, como estratégia para mitigar os efeitos de eventos hidrológicos extremos. Para tanto, realizou-se um estudo preliminar com o software SPRING, versão 5.5.6. O método empregado para a classificação da imagem foi a classificação supervisionada, considerando-se as seguintes classes: telhado, rio, vegetação, solo exposto e estrada. A análise permitiu identificar que a área de estudo possui 5.564 edificações, com área média disponível para a construção de cisternas estimada em 49,19 m² por lote. Nas projeções realizadas, os telhados equipados com sistemas de captação armazenaram, no cenário mínimo, 2% do volume total precipitado quando simulados em 10% das edificações. No cenário máximo, observou-se armazenamento de até 17% do volume precipitado quando os sistemas estavam presentes em 70% das construções, o que corresponde a 3.894 residências. Diante dos resultados obtidos, constatou-se que as tecnologias analisadas apresentam potencial para atuar como instrumentos de drenagem urbana sustentável, com capacidade de reduzir de forma significativa os impactos ambientais associados a eventos extremos de precipitação.

Palavras-chave: Precipitação, Spring, Drenagem Sustentável, Semiárido, Tecnologia Social.

Abstract: Hydrological processes constitute a subject of considerable relevance for territorial and urban planning, as hydrosocial dynamics are intrinsically linked to anthropogenic activities and to patterns of land use and land cover. In this context, the need to implement technologies capable of minimizing the occurrence and impacts associated with

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

URL: https://portal.amelica.org/ameli/journal/274/2745599002/

extreme hydrological events becomes evident. Accordingly, the present study aims to assess the feasibility of implementing green roofs and rainwater harvesting cisterns in residential buildings located in the Cedro neighborhood and in part of the Indianópolis neighborhood, in the municipality of Caruaru, as a strategy to mitigate the effects of extreme hydrological events. To this end, a preliminary study was conducted using the SPRING software, version 5.5.6. The image classification method adopted was supervised classification, considering the following classes: roof, river, vegetation, exposed soil, and road. The analysis identified 5,564 buildings within the study area, with an average available area for cistern construction estimated at 49.19 m² per lot. In the projected scenarios, roofs equipped with rainwater harvesting systems stored, under the minimum scenario, 2% of the total precipitated volume when simulated in 10% of the buildings. Under the maximum scenario, storage reached up to 17% of the precipitated volume when the systems were present in 70% of the constructions, corresponding to 3,894 residences. In light of the results obtained, it was concluded that the analyzed technologies demonstrate potential to function as instruments of sustainable urban drainage, with the capacity to significantly reduce the environmental impacts associated with extreme precipitation events.

Keywords: Precipitation, Spring, Sustainable Drainage, Semi-arid, Social Technology..

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

INTRODUÇÃO

A intensificação da urbanização nas cidades brasileiras tem produzido transformações significativas no ciclo hidrológico, sobretudo em decorrência da ampliação de superfícies impermeáveis, da supressão da vegetação e da ocupação de áreas ambientalmente frágeis. Tais processos alteram os mecanismos naturais de infiltração, retenção e armazenamento da água da chuva, resultando no aumento do escoamento superficial e na recorrência de alagamentos urbanos (Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019; Zölch et al., 2019).

No contexto do semiárido brasileiro, além das pressões decorrentes da urbanização, persistem condições climáticas marcadas por irregularidade pluviométrica e elevadas taxas de evaporação (Sivapalan, 2018). Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias integradas que articulem abastecimento, manejo das águas pluviais e redução de riscos hidrológicos, considerando a água não apenas como recurso físico, mas como elemento estruturante das relações socioespaciais (Linton; Budds, 2014; Wesselink; Kooy; Warner, 2017).

A adoção de tecnologias sociais voltadas à captação e ao manejo da água da chuva, como cisternas e telhados verdes, apresenta potencial para contribuir simultaneamente com a segurança hídrica e com a mitigação de impactos associados à drenagem urbana inadequada. As cisternas, amplamente difundidas no semiárido por meio de políticas públicas como o Programa Água para Todos (Brasil, 2016a), têm demonstrado relevância na ampliação do acesso à água e na redução da vulnerabilidade hídrica (Moura; Marques; Costa, 2019; Vieira *et al*., 2022). Por sua vez, os telhados verdes configuram-se como soluções baseadas na natureza capazes de promover retenção pluvial, melhoria microclimática e redução do escoamento superficial (Bianchini; Hewage, 2012; Uhmann; Tavares, 2017).

Entretanto, ainda são incipientes as análises integradas que examinam o desempenho conjunto dessas tecnologias em contextos urbanos do semiárido, especialmente sob a perspectiva da drenagem sustentável e da mitigação de alagamentos associados a eventos pluviométricos extremos. Observa-se lacuna científica quanto à mensuração sistemática dos efeitos combinados de cisternas e telhados verdes na redução do escoamento superficial e na atenuação dos picos de vazão em áreas urbanizadas.

Nesse sentido, o presente estudo estrutura-se a partir da problemática relacionada à efetividade da aplicação integrada dessas tecnologias sociais como estratégia complementar aos sistemas convencionais de drenagem urbana. Parte-se do pressuposto de que a adoção combinada de cisternas e telhados verdes, quando implementada em escala urbana, promove redução significativa dos volumes escoados, ampliação da retenção hídrica na fonte e amortecimento dos picos de cheia, contribuindo para a diminuição da recorrência e da magnitude de alagamentos.

Assim, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar cenários de aplicação de cisternas e telhados verdes em habitações urbanas no município de Caruaru, Pernambuco, analisando seu potencial de redução do escoamento superficial e sua contribuição para a consolidação de estratégias de drenagem urbana sustentável em contexto semiárido.

Planejamento urbano, ciclo hidrossocial e drenagem sustentável

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

A compreensão contemporânea da gestão das águas urbanas demanda a superação da visão estritamente hidráulica e tecnicista da drenagem. A abordagem hidrossocial reconhece que água e sociedade são dimensões inter-relacionadas, cujas dinâmicas resultam de processos simultaneamente físicos, políticos e socioeconômicos (Wesselink; Kooy; Warner, 2017; Linton; Budds, 2014). Nesse sentido, o ciclo hidrossocial expressa a coprodução entre natureza e sociedade, evidenciando que a circulação da água nos territórios é também condicionada por estruturas de poder, formas de ocupação do solo e desigualdades socioespaciais (Empinotti *et al*., 2021).

No âmbito do planejamento urbano e ambiental, a drenagem sustentável emerge como resposta às limitações dos sistemas convencionais, historicamente orientados pela rápida condução das águas pluviais a jusante. Esse modelo contribuiu para o aumento dos picos de vazão e para a transferência de riscos hidrológicos entre áreas urbanas. Em contraposição, as abordagens contemporâneas, como os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável, as Best Management Practices e o Water Sensitive Urban Design, propõem o controle das águas na fonte, a indução à infiltração e a retenção temporária dos volumes precipitados (Cárdenas; Fhaisuly, 2017; Gimenez-Maranges; Breuste; Hof, 2021; Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019).

Essas estratégias visam recompor, ainda que parcialmente, as funções naturais do ciclo hidrológico nas cidades, reduzindo o volume de escoamento superficial, promovendo recarga de aquíferos e melhorando a qualidade da água ao minimizar o carreamento de poluentes (Woods-Ballard *et al.*, 2007). Tal perspectiva alinha-se à concepção de planejamento urbano ambientalmente orientado, no qual infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza assumem papel estruturante na organização do espaço urbano.

Tecnologias sociais e captação de água da chuva

A captação e o armazenamento de água da chuva constituem práticas historicamente consolidadas, reinterpretadas à luz de novas exigências sanitárias, construtivas e ambientais (Andrade Neto, 2004; Amos; Rahman; Gathenya, 2016). No semiárido brasileiro, as cisternas consolidaram-se como tecnologia social de ampla difusão, especialmente no meio rural, contribuindo para o abastecimento domiciliar e para a redução da vulnerabilidade hídrica (Brasil, 2016a; Moura; Marques; Costa, 2019).

O desempenho dessas estruturas depende não apenas de sua capacidade volumétrica, mas também da compreensão técnica por parte dos usuários quanto à gestão do recurso armazenado (Santana *et al.*, 2015). Estudos indicam que a expansão dessas tecnologias para áreas urbanas pode representar alternativa complementar ao abastecimento público, além de reduzir a pressão sobre os sistemas de drenagem ao reter parte do volume precipitado nas coberturas das edificações (Santos; Farias, 2017).

A superfície de captação exerce influência direta sobre o potencial de aproveitamento hídrico e sobre a qualidade da água coletada, sendo os telhados os elementos mais utilizados em função de sua eficiência e menor exposição a contaminantes (Thomas, 2001). Quando associadas a estratégias de drenagem sustentável, as cisternas deixam de ser apenas dispositivos de abastecimento e passam a integrar um sistema urbano de gestão pluvial.

Nesse contexto, os telhados verdes emergem como tecnologia capaz de reconverter superfícies impermeáveis em estruturas vegetadas multifuncionais (Bianchini; Hewage, 2012). Além de contribuírem para a retenção temporária da água da chuva, tais sistemas promovem retardamento do escoamento superficial, reduzindo a sobrecarga sobre redes convencionais de drenagem (Uhmann; Tavares, 2017). Sua atuação incide diretamente sobre o amortecimento dos picos de vazão e sobre a redistribuição temporal do volume precipitado.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

Em regiões de clima quente, sua aplicação pode proporcionar melhoria das condições térmicas internas das edificações, incremento do conforto ambiental e qualificação microclimática do entorno urbano (Minke, 2005). Sob a ótica do planejamento urbano ambientalmente orientado, os telhados verdes integram o conjunto de soluções baseadas na natureza que articulam desempenho hidrológico, eficiência energética, qualificação paisagística e ampliação de serviços ecossistêmicos no espaço urbano.

METODOLOGIA

Área de estudo

Pernambuco é o Estado com maior déficit hídrico do Brasil com 1.270 $m^3.hab^{-1}.ano^{-1}$. Além de haver uma má distribuição hídrica, grande parte do Estado encontra-se sobre rochas que dificultam o armazenamento e acesso às águas subterrâneas (Rebouças, Braga; Tundisi, 1999). Caruaru é a principal cidade do Agreste pernambucano, distante 130 km da capital do Estado (Recife), possui população de 314.951 habitantes, com taxa de urbanização superior a 88% distribuída numa área de 921 km^2 (IBGE, 2020). Situa-se numa altitude média de 555 m, clima semiárido, e precipitação média anual de 634 mm, obtida no intervalo de tempo entre 1980 e 2010 (30 anos), tendo sua estação chuvosa entre abril e junho (Souza *et al.*, 2006).

Ademais, o município em estudo apresenta frequentes problemas de alagamentos e inundações, geralmente ocasionados por eventos de alta intensidade pluviométrica, nos meses chuvosos. A cidade convive com uma ocupação desordenada do solo com considerável impermeabilização, fruto de um desenvolvimento econômico e populacional bastante elevado nas últimas décadas (Paiva; Silva; Santos, 2017).

Neste sentido, em eventos de precipitação intensa, com a impermeabilização do solo, em decorrência do desenvolvimento urbano, a quantidade de água que chega simultaneamente ao leito do rio passa a ser superior à sua capacidade de drenagem, resultando na inundação das áreas ribeirinhas, também denominadas de planícies de inundação ou leito maior do rio. Com isso, os problemas derivados da inundação são consequências do grau de ocupação das planícies (leito maior do rio) pela população urbana, além da frequência da precipitação e magnitude dos picos de cheia (Tucci, 2007). Como resultado, em diversas cidades com essas problemáticas, como Caruaru, os impactos ambientais gerados podem ter severidades distintas, desde perdas restritamente econômicas, até incorrerem na perda de vidas humanas.

Em Caruaru, foi selecionada uma área de aproximadamente 1,73 km^2 para o estudo de uso e ocupação do solo, abrangendo o bairro do Cedro e uma parcela do bairro Indianópolis. Uma importante característica do local escolhido é a presença de trecho do Rio Ipojuca. As imagens utilizadas para a classificação são produtos do programa Estadual Pernambuco Tridimensional, realizado pelo Governo do Estado de Pernambuco e Secretaria de Desenvolvimento Econômico, que fornecem imagens de alta qualidade em escala de 1: 1000 e 1:5000, a depender da região (Pernambuco, 2016). Neste estudo são utilizadas imagens do tipo ortofoto, em escala 1:1000 com resolução espacial de 12 cm.

As ortofotos foram inicialmente processadas com o uso do *software* QGis na versão 2.18.20. Com isso, realizou-se procedimentos de união das ortofotos pertencentes a área de estudo através da criação de mosaico. A geometria própria da área escolhida também foi extraída com a ferramenta de recorte do *software*, resultando na área apresentada na Figura 1. A partir da imagem foi possível identificar as principais classes de uso da terra, para posterior classificação, como sendo: telhado, rio, vegetação, solo exposto e estrada.

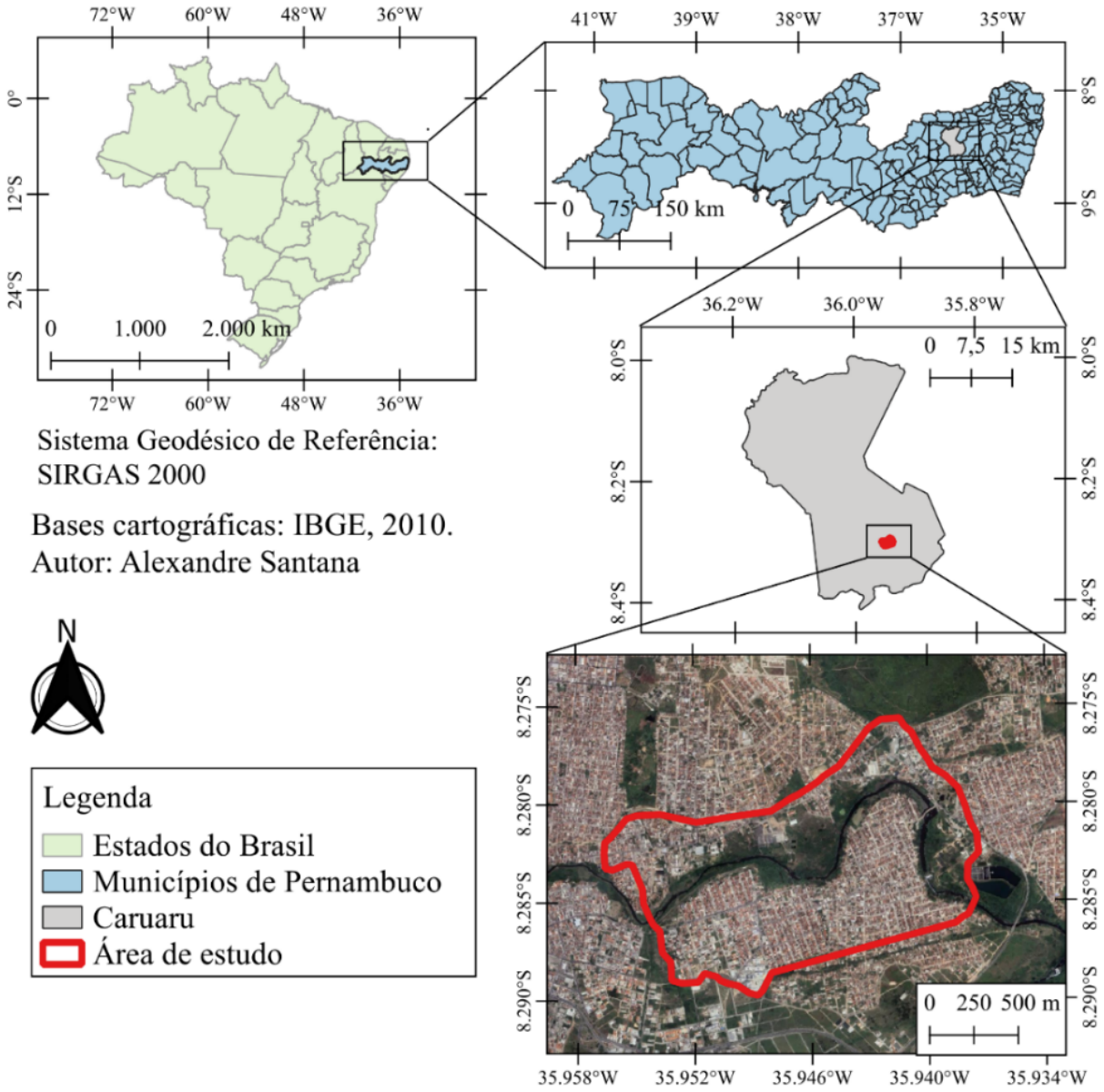


Figura 1

Localização do município de Caruaru no Estado de Pernambuco, com destaque para o Bairro do Cedro e parcela do Bairro Indianópolis

Fonte: Os Autores (2023)

Para a realização da classificação da imagem, fez-se inicialmente um mapa de uso e ocupação do terreno utilizando o *software* SPRING na versão 5.5.6. O SPRING consiste em um projeto desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através da Divisão de Processamento de Imagens (DPI) em parceria com outras instituições (INPE, 2022). O método empregado na classificação da imagem foi a classificação supervisionada, que depende que o operador execute uma etapa de treino em que amostras são manualmente selecionadas para cada classe temática. O tipo de classificador automático utilizado foi o

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

MaxVer (Método da Máxima Verossimilhança) que, de acordo com Coelho *et al.* (2014), avalia a variância e a covariância das categorias de padrões de resposta espectral quando classifica um pixel desconhecido, assumindo que a distribuição dos dados de treinamento é gaussiana. Através desta suposição a distribuição de um padrão de resposta espectral da categoria pode ser descrita por um valor de média e matriz de covariância. A partir desses parâmetros é possível calcular a probabilidade estatística de um valor de pixel pertencer a uma classe particular. As classes utilizadas na classificação foram as já mencionadas: Telhado, Rio, Vegetação, Solo Exposto e Estrada.

O *software* QGis 2.18.20 foi utilizado posteriormente para quantificar as áreas obtidas para cada classe, usando a ferramenta "r.report". Com a imagem classificada obteve-se a área média dos telhados, através de operação matemática da área total de telhados dividido pela quantidade de unidades edificadas. A área disponível no lote para a construção de cisterna também foi calculada. Para essa última estimativa foram quantificadas as áreas dos lotes para posterior subtração das áreas de telhado e, por fim, a divisão pela quantidade de unidades edificadas.

Os dados meteorológicos, variável de precipitação diária pluviométrica, foram obtidos a partir da base de dados das estações meteorológicas convencionais e/ou automáticas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Estação Caruaru - 835106. Em caso de correção de dados de precipitação das séries do INMET, foram utilizados dados da rede pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) referente às estações mais próximas, assim como para o preenchimento de falhas nos dados meteorológicos foi utilizada a base de dados em grade conforme trabalho de Xavier, King e Scanlon (2015). As análises foram realizadas por meio do *software* R, com utilização do pacote ggplo2 (Wilkinson, 2011).

Eventos hidrológicos no Município

Realizou-se a análise de dois eventos ocorridos em Caruaru - PE e cidades vizinhas que ocasionaram danos materiais e humanos. Um evento extremo no ano de 2017 e um evento de menores proporções, mas que também demonstrou falhas no sistema de drenagem, provocando problemas para a locomoção das pessoas, bem como perdas materiais, no ano de 2020. Os dados de precipitação foram obtidos no site Hidroweb (ANA, 2023). A estação que forneceu os dados foi a estação telemétrica "CARUARU", de código 835106.

O evento do ano de 2017 ocorreu entre os dias 25 e 29 de maio, já o evento de 2020 ocorreu entre os dias 23 e 26 de março. Mesmo o evento de 2020 não apresentando uma magnitude tão alta como o de 2017, este foi estudado, em razão de ser um tipo de evento mais recorrente no município e que acarreta alagamentos e seus consequentes dados.

Integração de Tecnologias Sociais na microdrenagem: Cisterna de 16 mil L e Telhados Verdes

A partir de um experimento, Santos et al. (2019) propuseram a implantação consorciada das tecnologias sociais, Cisterna e Telhado Verde em residências de municípios do semiárido brasileiro, como objetivo de ampliar a capacidade de armazenamento de água e propiciar maior conforto térmico para as famílias residentes. No estudo, Santos *et al.* (2019) consideraram as seguintes variáveis: área de cobertura de 85 m² para cada casa, onde 16 m² foram ocupados por um telhado verde e os 69 m² restantes foram usados para captação de água da chuva. A proposta de integração de tecnologias foi bastante exitosa quanto aos objetivos inicialmente propostos. Ao concluir as análises os autores propuseram a realização de pesquisas adicionais com o intuito de avaliar outros benefícios da combinação de telhados verdes e tradicionais.

Neste estudo, criou-se um cenário e foram realizadas simulações a partir do mesmo princípio de integração de tecnologias, contudo, à luz de uma análise distinta, mas potencialmente preponderante: O potencial da integração da cisterna e telhado verde, na microdrenagem de áreas urbanas de municípios do semiárido, para mitigar os alagamentos resultantes de precipitações extremas. Para apresentar as simulações propostas neste artigo, manteve-se a mesma área de telhado verde proposta por Santos *et al.* (2019), ou seja, 16 m², contudo, a área destinada para captação de água para a cisterna foi de 73,26 m² (área total de telhado encontrada neste estudo foi de 89,26 m²), maior, portanto, quando comparada aos 69 m² do estudo referência.

Os telhados verdes são basicamente estruturas que se caracterizam por coberturas com vegetação em meio de crescimento (Vijayaraghavan, 2016). O uso desta tecnologia surge como uma alternativa inovadora para o manejo das águas pluviais, aumentando os fluxos de interceptação, infiltração e evapotranspiração, reduzindo riscos de inundações, possibilitando a captação de águas pluviais e criando espaços verdes em ambientes urbanos (Gwak et al., 2017) Ao passo que as cisternas são amplamente utilizadas nas áreas rurais para o armazenamento de água, e sua sugestão de uso em áreas urbanas, em geral, tem indicação para o mesmo objetivo, ou similar, como redução da dependência dos sistemas de abastecimento público (Santos; Farias, 2017).

Contudo, neste trabalho, a abordagem dada às tecnologias, são suas possíveis contribuições para os sistemas de drenagem urbana. Portanto, propõe-se realizar uma análise do impacto da implantação destas, com vistas ao retardamento do pico de escoamento de água, objetivando impedir ou mitigar possíveis alagamentos, resultantes da saturação momentânea do sistema de drenagem, face à eventos de grande intensidade de chuvas.

Para entender as relações de "Tecnologias Sociais X Microdrenagem", inicialmente é necessário calcular o potencial dessas tecnologias para captação de água e, consequentemente diminuir o escoamento superficial resultante das precipitações. Segundo Palhares (2016), o cálculo do potencial de água de chuva a ser captada pelas áreas de cobertura deve ser representado pela Equação 1:

$$V_{chuva} = A \times P \times C$$

Onde:
V_{chuva} = volume de água da chuva a ser captado (m³);
A = área de cobertura (m²);
P = precipitação (m/dia)*;
C = fator de escoamento da cobertura**;
* dividir milímetro por 1.000 para converter em m/dia;
** Sugere-se utilizar o valor de 0,8 independentemente do tipo de cobertura

(Equação 1)

Com a finalidade de adequar as variáveis para as possíveis situações encontradas (telhados de cerâmica e telhados verdes), será realizado o cálculo de acúmulo de água nas cisternas, a partir do coeficiente médio sugerido na literatura de 0,8, utilizado para telhados de cerâmica (Ghisi, 2006). Além disso, calculou-se o escoamento resultante das áreas que deverão ser preenchidas com telhado verde, segundo Castro *et al.* (2020), para telhados com declividade de 15º, após 6 horas do início do evento pluviométrico, os índices de retenção observados foram de 84,9%. Assim, nas simulações realizadas neste trabalho, considerou-se para fins de cálculo, que apenas 15,1% do volume precipitado sobre os telhados verdes resultarão em volume de água escoado para a calha de coleta, posto que, a mesma será instalada sob todo o beiral do telhado, para que qualquer água resultante do sistema, seja transportada para a cisterna.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Classificação de imagem de cobertura e uso do solo

A imagem classificada com o Spring é apresentada na Figura 2. A classificação obteve um Coeficiente de Concordância Kappa igual a 99,52 %, que aponta um ótimo desempenho da classificação, uma vez que valores acima de 0,85, indica precisões aceitáveis para análises de uso e ocupação do solo (Yu *et al.*, 2011). A ferramenta r.report do QGis forneceu as áreas de cada classe conforme a Tabela 1.



Figura 2
Classificação de imagem da área estudada quanto ao uso e cobertura do solo
Fonte: Os Autores (2023)

Tabela 1
Área por classe, evidenciando a porcentagem ocupada por cada uma delas, em relação a região estudada

Telhado	496.684,00	28,78
Rio	71.500,00	4,14
Vegetação	430.510,00	24,95
Solo Exposto	436.495,00	25,3

Estrada	290.347,00	16,83
Total	1.725.536,00	100,00

Fonte: Os Autores (2023)

As áreas de telhado representam 28,78% da área total, possuindo um grande potencial, tanto para retardar o pico de escoamento no sistema de drenagem quanto para a captação de água da chuva (Tabela 1). Identificou-se que a área de estudo possui 5.564 edificações, representando pouco mais de 5,7% dos domicílios da cidade de Caruaru, o cálculo de área média de telhados resultou em 89,26 m², dados próximos aos utilizados por CONDEPE/FIDEM (2016) e Ghisi (2006), que utilizaram por estimativa, 85 m² para a área do telhado das casas.

A área média identificada como terreno não construído, portanto, possivelmente disponível para a construção de cisternas em cada lote foi de 49,19 m². Destarte, essa área está plenamente adequada à implantação desta tecnologia, uma vez que as cisternas de polietileno entregues pelo Governo Federal, tem um diâmetro de apenas 3,2 m, necessitando apenas de uma área de 8 m² para ser instalada (BRASIL, 2016b). A análise desses dados, revelam-se de grande importância, uma vez que com as rápidas mudanças provocadas pela dinâmica hidrossocial, existe uma crescente dependência de tempo para implantação de novas tecnologias (Wagener *et al.*, 2010).

Os dados estimados pelo IBGE, só reforçam essa afirmativa, ao evidenciarem que no ano de 2000 o município tinha 253.634 habitantes (IBGE, 2000), 314.912 habitantes em 2010 (IBGE, 2010), saltando para 378.052 em 2022 (IBGE, 2022), representando um crescimento populacional de quase 33%, em 20 anos, resultando numa densidade populacional de 409,52 hab/km² portanto, muito superior à média de outras regiões do semiárido. Na Tabela 2, observa-se a relação entre as áreas de captação no telhado (cisterna x telhado verde) e área total classificada.

Tabela 2
Relação entre as áreas de captação no telhado (cisterna x telhado verde) e área total classificada

Telhado Verde	16,00	18%	89.091,30	5,16%
Cisterna	73,20	82%	407.592,70	23,62%
Total	89,20	100%	496.684,00	28,78%

Fonte: Os Autores (2023)

Caso fossem utilizados os telhados de todas as 5.564 edificações construídas na região de estudo, a área de captação das cisternas seria de 407.592,70 m², ao passo que os telhados verdes teriam o potencial de ocupar até 89.091,30 m², valores esses consideráveis, pois atingiram pouco mais de 28% de toda região estudada. Entretando, durante o processo de tratamento da Figura 2, observou-se que, apesar da grande maioria das edificações serem de imóveis residenciais, também foi encontrado edificações que provavelmente poderiam não se enquadrar num programa de adequação das estruturas, desta forma, foram simuladas projeções com área de captação utilizando-se no máximo 70% dos imóveis situados na região do estudo, o que se traduz numa área total de captação de 347.678,80 m², representando pouco mais de 20% da área total estudada.

Eventos hidrológicos

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

Na análise dos eventos hidrológicos do município de Caruaru montou-se o gráfico da Figura 3, com a precipitação média anual do município localizado no Estado de Pernambuco, referente às séries históricas de 1980-2020, onde a linha pontilhada representa média para todo o período.

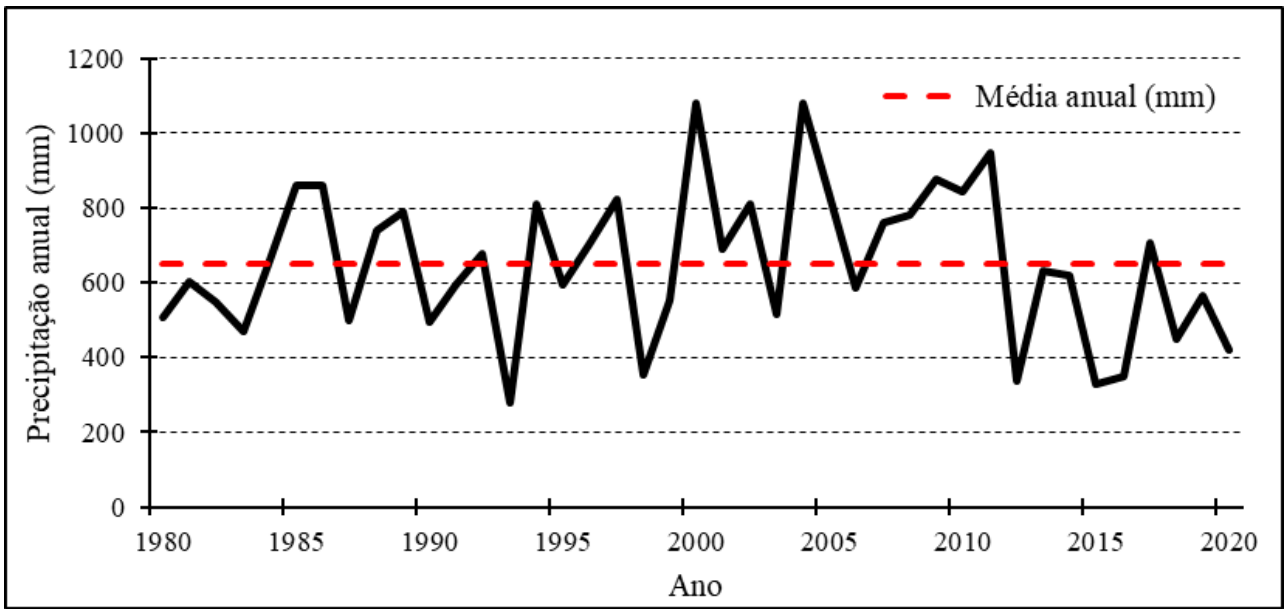


Figura 3
Precipitação anual média do município de Caruaru, Estado de Pernambuco, período de 1980-2020
Fonte: Os Autores (2023)

De acordo com a Figura 3, a distribuição da precipitação média anual no município de Caruaru encontra-se baseada nos últimos 40 anos. As maiores precipitações anuais ocorrem nos anos de 2000 e 2004. No ano de 2017 e 2020 houve a ocorrência dos eventos extremos mais recentes no município, possuindo menor magnitude em relação aos ocorridos nos anos 2000 e 2004, porém causou diversos danos a população e ao município, onde eles poderiam ter sido minimizados com planejamento e adoção de medidas para auxiliar a população durante o período de fortes chuvas na cidade, como por exemplo o uso do telhado verde e cisternas.

Conceitualmente, o telhado verde pode se caracterizar como um dispositivo útil para o controle das inundações, desde que o volume escoado para fora do telhado seja armazenado em reservatórios para posterior uso e/ou para posterior descarte na rede de drenagem. Nestas condições, o volume retido (armazenado no sistema substrato-vegetação + armazenado em reservatórios) não mais contribui para a intensificação do volume escoado, que é o principal elemento hidrológico responsável pelas enchentes.

Sobre isso, Palla *et al.* (2008) afirmam que o telhado verde retém parte da água da chuva para realizar o metabolismo das plantas e vegetação, diminuindo o volume de água que é transformado em escoamento superficial, ou seja, água que escoa nos telhados e segue para o sistema de drenagem, além disso, também retarda o tempo de pico do escoamento superficial. Na Figura 4 tem-se a precipitação mensal média do município de Caruaru, referente à série histórica de 1980-2020, onde a linha pontilhada representa média mensal para todo o período, já os círculos vermelhos representam a média de cada mês.

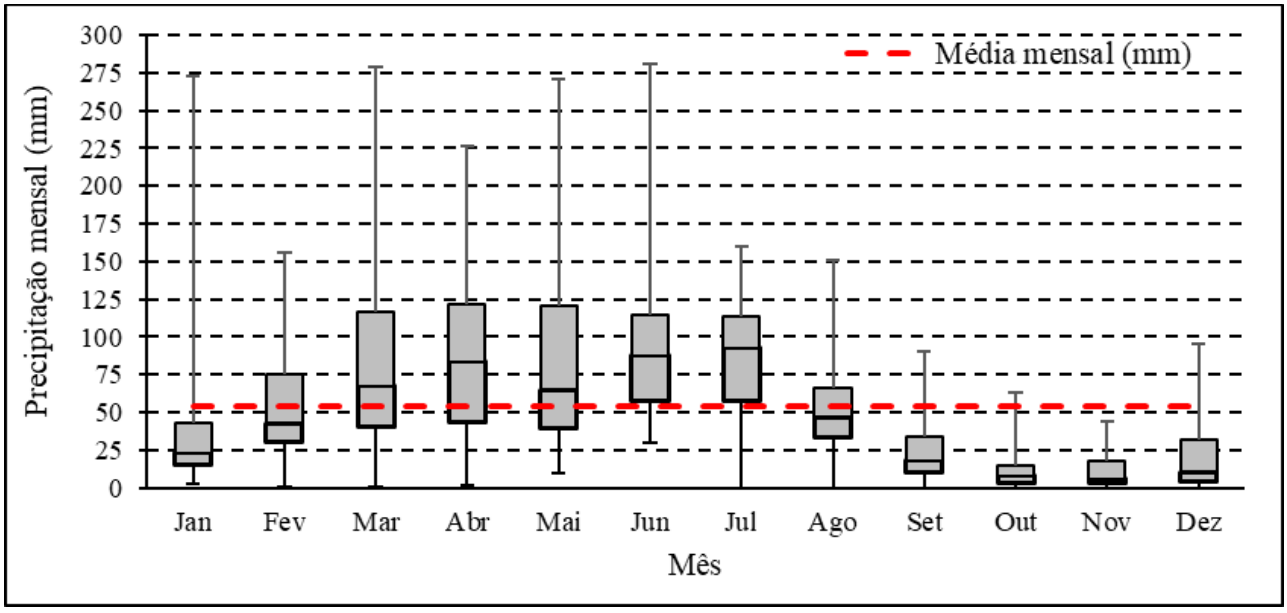


Figura 4
Precipitação mensal média do município de Caruaru, Estado de Pernambuco, período de 1980-2020
Fonte: Os Autores (2023)

De acordo com a Figura 4, observa-se a variação de 10 mm a 250 mm da precipitação mensal. A climatologia da precipitação em Caruaru apresenta comportamento pluviométrico que evidencia ciclo anual marcado por estação chuvosa, que se inicia em março e se prolonga até julho, estação seca nos meses de setembro a dezembro. O mês de agosto é tido como de transição, e apresenta valores compatíveis com as estações chuvosa e seca. Neste contexto, a Figura 5 revela a série histórica de chuva na escala diária de 1980-2020, bem como a frequência de ocorrência dos eventos de precipitação de até 30 mm, na mesma série histórica, no município de Caruaru.

Diante da recorrência dos problemas resultantes de precipitações intensas e ineficiência do sistema de drenagem, observa-se que se faz necessário um melhor planejamento urbano para se preparar para esses eventos, visto que os alagamentos são processos naturais que ocorrem em regiões próximas a cursos de água, e que a ausência de planejamento contribui para estas situações. A impermeabilização do solo causado pela urbanização desorganizada, tem provocado redução do volume de água infiltrado no solo, aumentando o escoamento superficial causando enchentes, aumento da temperatura e escassez de água.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

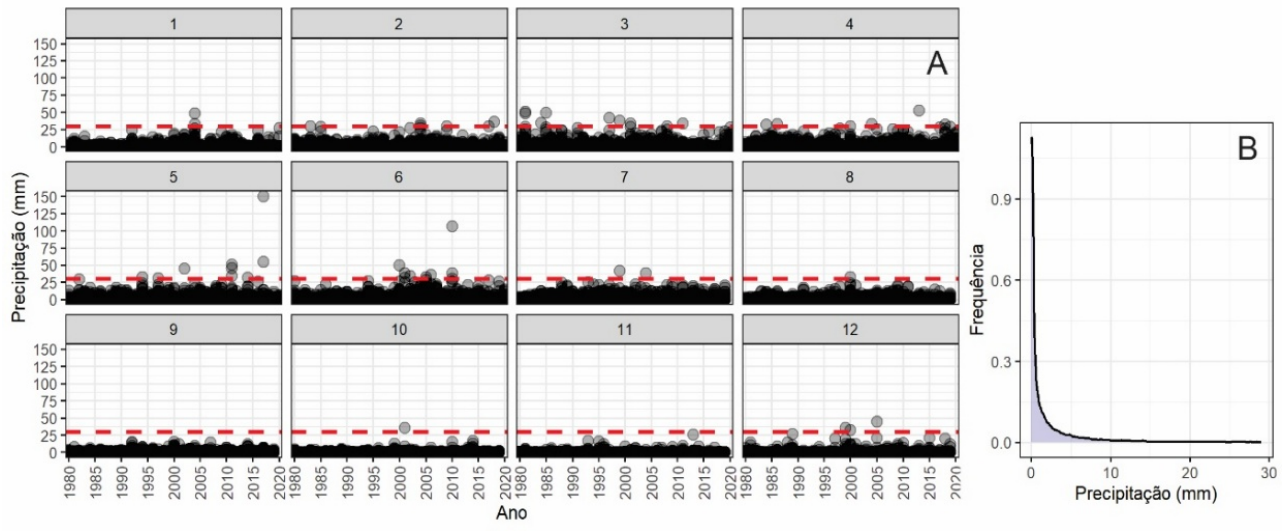


Figura 5

Série histórica da precipitação diária de 1980-2020 do município de Caruaru, Estado de Pernambuco (A). Frequência de ocorrência dos eventos de até 30 mm para a mesma série histórica (B)

Fonte: Os Autores (2023)

Para representar o cenário mais recente, levantou-se dados dos valores mensais dos últimos 40 anos. Esses dados indicaram o positivo potencial de economia de água da chuva para o município de Caruaru, portanto, tornando-se uma boa alternativa para atender ao controle do fluxo de água. Observa-se que no ano de 2017 no mês de março e no mês de junho de 2010 obteve-se aumento na precipitação, devido a fortes chuvas das quais o município não possui estruturas para recebê-las de forma eficaz e sem causar prejuízos.

Os alagamentos se tornam um problema bastante recorrente no cotidiano das famílias. Segundo o Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios (Brasil, 2007), os alagamentos causam a acumulação de águas no leito das ruas e nos perímetros urbanos devido às fortes precipitações pluviométricas. Dessa forma, se ocasiona problemas em cidades com sistemas de drenagem deficientes, com destaque para as cidades mal planejadas ou aquelas que crescem de forma desordenada, o que dificulta a realização de obras de drenagem e esgotamento sanitário, resultando em perdas materiais e humanas. Na Figura 6, tem-se a ocorrência de precipitações com mais de 30 mm na série histórica de 1980-2020 do município de Caruaru. Na serie histórica estudada, o ocorreram 44 eventos com estas características.

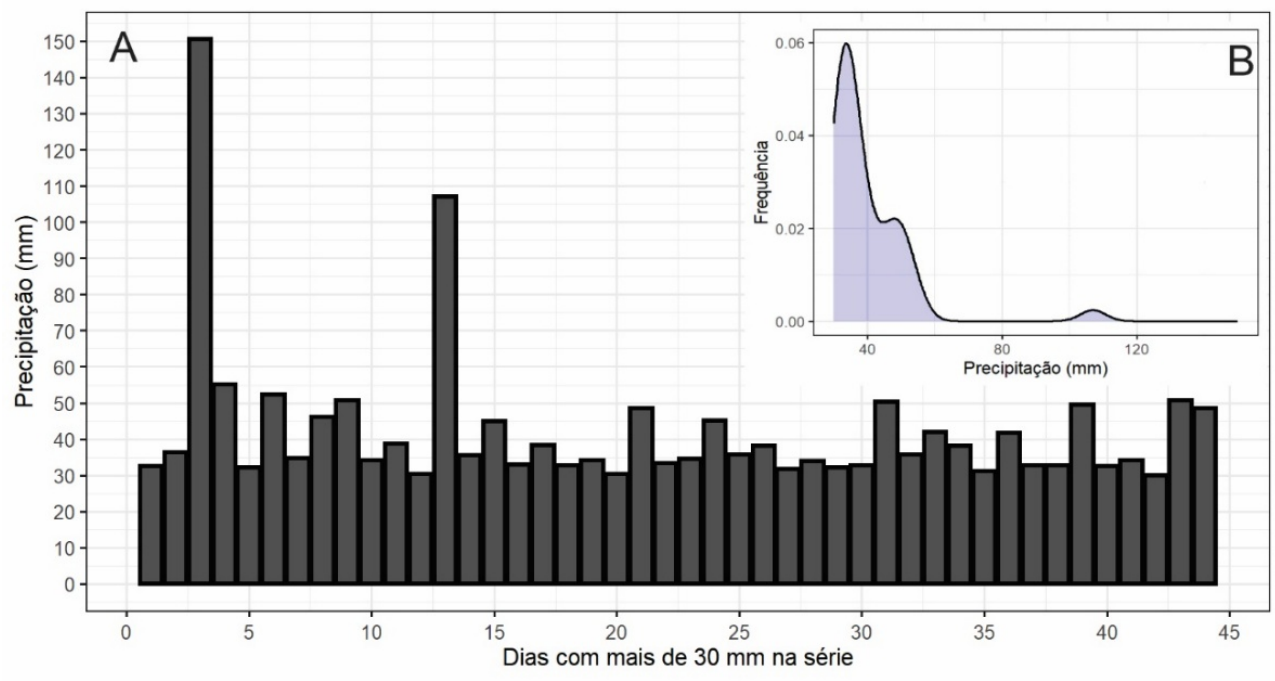


Figura 6

Ocorrência de precipitações diárias com mais de 30 mm, período de 1980-2020, do município de Caruaru, Estado de Pernambuco (A). Frequência de ocorrência dos eventos ≥ 30 mm para a mesma série histórica (B)

Fonte: Os Autores (2023)

A partir da análise dos eventogramas para o município de Caruaru, bem como de informações pesquisadas nos veículos de imprensa que resultaram em resposta de datas em que houve alagamentos mais recentes nos bairros estudados, chegou-se a dois eventos significativos. Sendo eles ocorridos em maio de 2017 e março de 2020. A precipitação no mês de maio de 2017 ocorreu conforme se apresenta na Figura 7. O evento ocorrido nos dias 25 a 29 somou um volume precipitado de 230 mm. Ademais, a precipitação no mês de março de 2020, deu-se conforme visualizado na Figura 8, onde entre os dias 23 e 26, choveu 65,5 mm. A precipitação acumulada refere-se ao volume total de chuva durante este evento.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

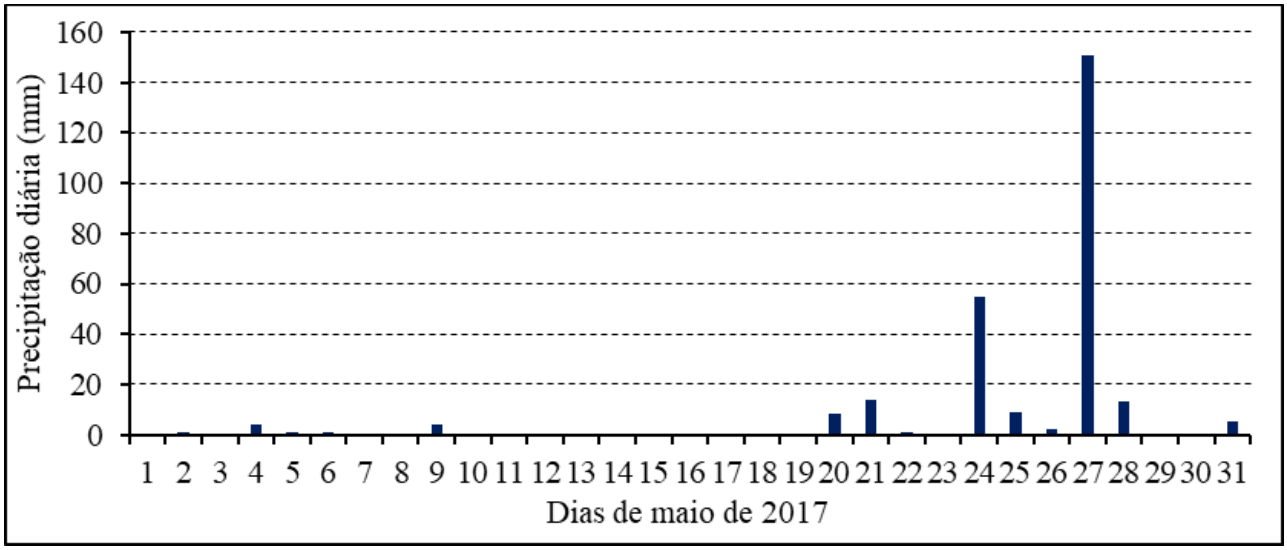


Figura 7
Evento detalhado 1: Precipitação ocorrida no mês de maio de 2017, Caruaru – PE, Brasil
Fonte: Os Autores (2023)

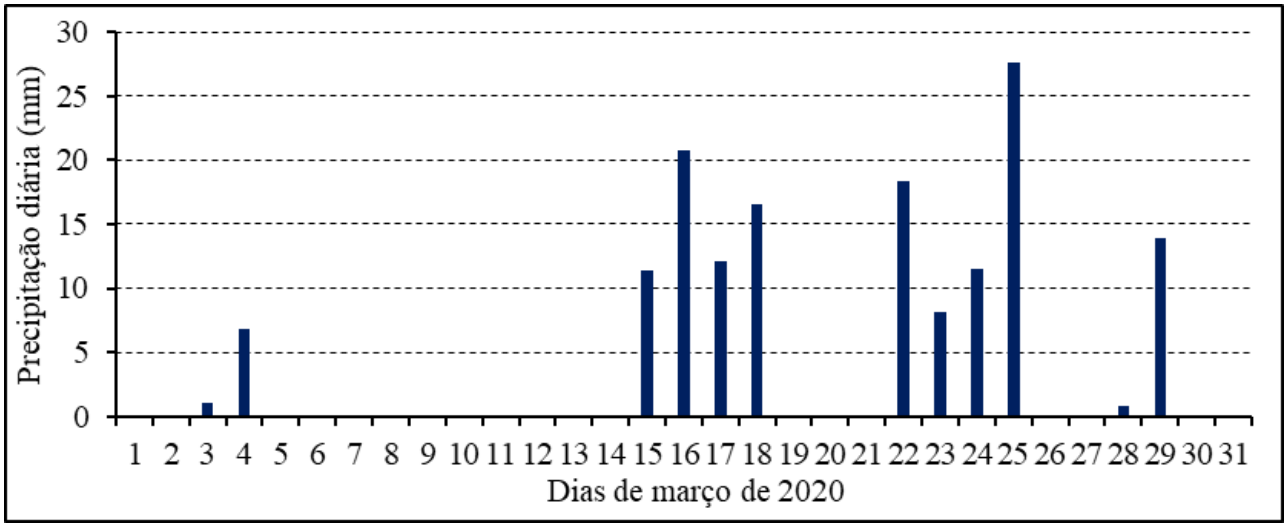


Figura 8
Evento detalhado 2: Precipitação ocorrida no mês de em março de 2020, Caruaru – PE, Brasil
Fonte: Os Autores (2023)

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

Os eventos de chuva de longa duração não são muito comuns considerando o padrão climático da área, porém chuvas intensas em pequeno espaço de tempo são capazes de causar danos irreversíveis a população. Variáveis como inclinação da cobertura, umidade do substrato no início da precipitação e intensidade da chuva podem interferir nos volumes drenados da superfície. Em trabalho de Versini *et al.* (2015), realizaram um estudo comparando as respostas hidrológicas de telhados verdes de diferentes profundidades. Os referidos autores constataram que as condições de saturação do substrato no início do evento são importantes para os substratos mais espessos, enquanto os menos espessos, apesar de apresentarem menor capacidade de retenção de água, geralmente apresentam tempo de secagem entre dois eventos e saturam rapidamente nos eventos mais severos.

As fortes chuvas que acometeram o município de Caruaru nos anos de 2017 e 2020 trouxeram além de prejuízos para a população a busca por tecnologias capazes de amenizar os danos causados pelo evento extremo. Por se tratar de um bairro com características expansivas, o Cedro tornou-se foco nesse trabalho, além de um trecho do bairro Indianópolis. Além dos eventos 1 e 2, que representaram respectivamente um volume total de chuvas de 230 e 65,5 mm, foram feitas simulações levando-se em consideração volumes chuvosos de 30, 50, e 100 mm, como indicado na Tabela 3.

Na Tabela 3, considerou-se que o telhado é totalmente rodeado por calhas de captação, não somente nas áreas que escorrem direto para a cisterna, mas também nas partes onde deverá ser implantado o telhado verde, pois, estes apesar de apresentarem uma excelente capacidade de retenção de água (84,9%) existe uma resultante de escoamento de 16,1%, que embora possa ser detectado apenas após 6h de chuvas, pode ser ampliado em casos de eventos excepcionais (Castro et al., 2020), fato este indesejado, quando o foco do estudo é impedir ao máximo, qualquer possibilidade de escoamento de água do sistema para as galerias públicas pluviais. Portanto o sistema de calhas em todo telhado, destina também os volumes escoados do telhado verde, para a cisterna.

Tabela 3

Simulação do comportamento do sistema de captação de água, ao ser submetidos à diversos eventos pluviométricos

Telhado Verde (água retida no sistema)	3,12	0,88	0,41	0,68	1,36
Telhado Verde (água escoada do sistema)	0,59248	0,16744	0,07728	0,1288	0,2576
Água captada pelo telhado exclusivo da cisterna	13,469	3,806	1,757	2,928	5,856
Total de água acumulada na Cisterna (água escoada do telhado verde + água captada pelo telhado da cisterna)	14,061	3,974	1,834	3,057	6,114

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

Total de Água captada/acumulada por 1 sistema (Cisterna + Telhado verde) m^3	17,19 m^3	4,86 m^3	2,24 m^3	3,74 m^3	7,47 m^3

Fonte: Os Autores (2023)

Ainda ao observar a Tabela 3, percebe-se que em todas as simulações de precipitação o sistema foi 100% eficaz, não permitindo nenhum escape de água para o sistema de macrodrenagem, inclusive para o evento de maior volume de água precipitado (evento 1), o qual resultou em um acúmulo / retenção de 17,19 m^3, distribuídos na cisterna pouco mais de 14 m^3, e retidos no telhado verde em torno de 3 m^3. Nota-se ainda, que existe uma sobra de capacidade na cisterna para eventos ainda mais extremos. Em estudo similar, onde foi realizado simulações para armazenamento de água no município de Caruaru, levando-se em consideração telhados com área de 81,25 m^2 utilizado exclusivamente como área de captação para cisterna, concluiu-se que o uso de cisternas poderia reduzir a demanda residencial de água pelo sistema público em até 58% na estação chuvosa (Santos; Farias, 2017).

Em simulações não representadas na tabela, foi identificado que o sistema de captação proposto, consegue reter toda água de eventos de até 260 mm, acima disso, detecta-se perda de água para o sistema de macrodrenagem. Contudo, como foi evidenciado na Figura 6, eventos com essas características, não ocorreram no município de Caruaru desde pelo menos 1980.

Ressalta-se, que os benefícios da instalação do sistema de consorciado destas tecnologias, supera as questões de drenagem, uma vez que ao armazenar toda chuva precipitada sobre os telhados, contribui para mitigar os índices de perda física e de faturamento dos sistemas de abastecimento de água, que em alguns casos superam 50%, somado ao fato que a população ainda não tem consciência suficiente para evitar desperdícios, portanto, água bruta armazenada, pode ser amplamente utilizada nas residências para usos que não requeiram água tratada: atividades como rega de jardins e mesmo descargas sanitárias (Cirilo, 2015).

Ao considerar os benefícios do sistema conjugado de tecnologias sociais para compor as edificações já existentes, deve-se levar em consideração que nem todas estão aptas para recebê-las, destarte, foram realizadas simulações com diferentes percentuais de residências com uso das tecnologias, com dados demonstrados para 10%, 50% e 70% dos imóveis encontrados na região de estudo (Tabela 4).

Tabela 4

Simulações do comportamento dos sistemas, em relação a quantidade de residências implantadas X volume total capturado/armazenado X volume total precipitado por evento na área estudada e o % de captação em relação ao evento

10% (556) das residências da área estudada.	Volume (m^3) total captado pelo sistema	9.562,07	2.702,32	1.247,23	2.078,71	4.157,42	2%
	Volume (m^3) total, de toda área estudada, escoado para sistema de macrodrenagem	387.311,21	109.457,52	50.518,85	84.198,09	168.396,18	98%
50% (2.782) das residências da área estudada	Volume (m^3) total captado pelo sistema	47.810,34	13.511,62	6.236,13	10.393,55	20.787,10	12%

	Volume (m^3) total, de toda área estudada, escoado para sistema de macrodrenagem	349.062,94	98.648,22	45.529,95	75.883,25	151.766,50	88%
70% (3.894) das residências da área estudada	Volume (m^3) total captado pelo sistema	66.934,47	18.916,26	8.730,58	14.550,97	29.101,95	17%
	Volume (m^3) total, de toda área estudada, escoado para sistema de macrodrenagem	329.938,81	93.243,58	43.035,50	71.725,83	143.451,65	83%

Fonte: Os Autores (2023)
Arm. – armazenamento; Prec. – precipitação.

No conjunto das projeções realizadas, verificou-se que os telhados dotados de sistemas de captação e retenção hídrica armazenaram, no cenário mínimo, 2% do volume total precipitado quando simulados em apenas 10% das edificações, alcançando, no cenário máximo, a retenção de 17% do volume precipitado quando presentes em 70% das construções, o que corresponde a 3.894 residências. Esses resultados evidenciam a expressiva capacidade de mitigação hidrológica do sistema proposto, sobretudo quando adotado em escala ampliada. Nesse sentido, a implementação de instrumentos de política pública voltados à promoção de soluções baseadas na sustentabilidade urbana, como o IPTU Verde, revela-se estratégica. Tal mecanismo, já adotado em municípios como São Paulo, Sorocaba e Recife (Lima, 2013; Paiva; Silva; Santos, 2017), pode funcionar como indutor de transformação do padrão construtivo urbano, estimulando a incorporação de práticas ambientalmente responsáveis por meio de incentivos fiscais.

Ao analisar o evento de maior precipitação registrado (evento 1), considerando o cenário máximo de adesão ao sistema (70% das edificações com cisterna e telhado verde), estimou-se um volume total precipitado de 396.873,28 m^3 incidente sobre a área de estudo de 1,73 km^2. Com a implantação do sistema proposto, seria possível captar aproximadamente 66.934 m^3 desse montante, promovendo redução substancial do volume direcionado à rede pública de macrodrenagem. Essa retenção implica não apenas diminuição do pico de vazão, mas também maior retardamento do escoamento superficial, favorecendo a atenuação de processos de alagamento. Conforme destacado por Shafique *et al.* (2018), fatores como intensidade pluviométrica, espessura do substrato e tipologia vegetal influenciam diretamente o desempenho hidrológico dos telhados verdes, os quais apresentam reconhecida eficácia na mitigação de inundações em áreas urbanas.

Estudos desenvolvidos em outras realidades urbanas corroboram os achados obtidos. Sousa e Meneses Filho (2023), ao investigarem o município de Fortaleza, demonstraram que a substituição de 20% dos telhados convencionais por telhados verdes com inclinação superior a 15° apresenta potencial significativo de armazenamento hídrico, variando conforme a intensidade das chuvas. De modo complementar, Silveira, Oliveira e Silva (2023), em análise realizada no município de Avaré–SP, indicaram que a adoção de sistemas de captação pluvial com cisternas em 60% das edificações possibilita a redução da vazão de pico entre 18% e 31%. Tais evidências reforçam a consistência técnica dos resultados aqui obtidos, situando o município de Caruaru em consonância com tendências observadas em diferentes contextos climáticos e urbanos.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

No próprio município de Caruaru, Santos *et al.* (2018) já haviam identificado que telhados verdes apresentam elevada capacidade de retenção hídrica, contribuindo para o retardamento do escoamento superficial e para a mitigação de alagamentos. Assim, além de reduzirem o volume escoado, tais estruturas favorecem o escalonamento temporal das vazões, proporcionando melhor desempenho aos sistemas de drenagem existentes. Ademais, conforme evidenciado por Liz *et al.* (2018), experimentos conduzidos em Florianópolis demonstraram que telhados verdes também promovem significativa redução do ganho térmico interno das edificações, mantendo temperaturas superficiais mais amenas quando comparadas a coberturas convencionais. Desse modo, para além de sua função hidrológica, tais sistemas configuram-se como solução construtiva multifuncional, com implicações positivas para o conforto térmico e a eficiência energética.

A viabilidade de implementação dessas tecnologias, contudo, demanda análise criteriosa dos custos de implantação, operação e manutenção, bem como da relação entre investimento e benefícios socioambientais gerados. A adoção dessas soluções torna-se efetivamente sustentável quando os ganhos associados à redução de danos por inundações, à economia de água potável e ao incremento do conforto ambiental superam os custos envolvidos. Por outro lado, sua disseminação permanece condicionada à existência de políticas públicas estruturantes e marcos regulatórios favoráveis, uma vez que a ausência de instrumentos normativos e incentivos econômicos tende a limitar sua adoção em larga escala (Silva; Silva; Pastich, 2022).

Conforme argumenta Campos (2021), embora experiências em cidades como São Paulo e Cidade do México evidenciem avanços na incorporação de técnicas sustentáveis de drenagem urbana, persistem desafios relacionados à regulamentação, padronização técnica e integração institucional. Mendes e Santos (2023) ressaltam, nesse contexto, a necessidade de superação de uma abordagem estritamente mecanicista na gestão da drenagem urbana, defendendo a incorporação de soluções estruturais e não estruturais com ênfase no controle na fonte. Essa reorientação implica transformações nas estruturas administrativas e legislativas, bem como fortalecimento de uma governança participativa voltada à gestão integrada das águas pluviais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para todos os cenários avaliados, o sistema de captação simulado (Cisterna + Telhado Verde) foi 100% eficaz, resultando em escoamento 0 (zero) de água, nos telhados utilizados, para o sistema público de macrodrenagem, diminuindo os picos de escoamento, retardando e mitigando possíveis processos de alagamento. O uso consorciado das tecnologias sociais, cisterna e telhado verde, com a finalidade de mitigar os efeitos de eventos pluviométricos extremos em áreas urbanas é uma opção viável para Caruaru-PE, ou outros municípios da região semiárida com alto adensamento populacional, uma vez que, sua instalação em apenas 70% das edificações reduz até 17% do volume de água que seria enviado aos sistemas de drenagem, reduzindo o risco de alagamento e inundações.

A cisterna de polietileno de 16 mil L consorciada à um telhado verde, mostrou-se eficiente para contribuir com a drenagem urbana em municípios do semiárido, uma vez que nenhum evento pluviométrico estudado extrapolou sua capacidade máxima de armazenamento (16 m^3). No tocante às dimensões (diâmetro de 3,2 m), essa tecnologia também é viável para instalação nas edificações da região estudada, uma vez que ocuparia apenas 7 m^2 (considerando folgas) e segundo os dados calculados, a área média livre não construída das residências é de 49,19 m^2.

A partir dos resultados promissores da implantação deste novo sistema de consórcio de tecnologias (telhado verde + cisterna), e diante das consequências da atividade humana no ciclo hidrológico, (dinâmica hidrossocial), característica aos grandes centros urbanos, causando geralmente, problemas no tocante a intermitência da distribuição de água (nos períodos secos), enchentes e alagamentos (meses chuvosos), recomenda-se que outras pesquisas aprofundem as análises sobre esse novo tipo de sistema. Neste sentido, essa indicação ocorre em razão do sistema não apenas apresentar vantagens sob o aspecto da drenagem urbana, mas por também envolver temas da segurança hídrica, economia monetária com distribuição de água, conforto térmico, aspectos paisagísticos a partir do esverdeamento urbano, além de necessidade de maior regulamentação para implementação de técnicas de drenagem urbana sustentável.

Portanto, o sistema proposto revela-se promissor para melhorar a qualidade de vida nos centros urbanos de municípios do semiárido, embora seja importante ressaltar a necessidade de uma maior atuação político-governamental para o tema, envolvendo uma governança participativa na gestão e manejo de água pluviais. Deste modo, pode-se haver uma mudança de paradigma, com a priorização de investimentos em tecnologias sociais, com viés de sustentabilidade e controle na fonte.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

REFERÊNCIAS BLIOGRÁFICAS

AMOS, C. C.; RAHMAN, A.; GATHENYA, J. M. Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: a review of the global situation with a special focus on Australia and Kenya. Water, v. 8, n. 4, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/w8040149.

ANA - Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas. Brasil, 2023. Disponível em http://hidroweb.ana.gov.br. Acesso em: jun. 2023.

ANDRADE NETO, C. O. Proteção Sanitária das Cisternas Rurais. IX SILUSA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Natal: ABES/APESB/APRH, 2004.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. Building and Environment, v. 48, p. 57-65, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.019.

BRASIL. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. CARVALHO, C.S.; MACEDO, E.S.; OGURA, A.T. (orgs.). Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Brasília, 176 p., 2007.

BRASIL. Programa Água para Todos, Cisternas, Barreiros e Sistemas Coletivos. Ministério da Integração Nacional, Governo Federal. Disponível em: http://www.mi.gov.br/cisternasbarreiros-e-sistemas-collectivos. Acesso em: dez. 2020, 2016a.

BRASIL. Manual de Instalação de Cisternas Programa Água Para Todos Orientações Metodológicas de Marcação e Medição Final. Volume IV, Ministério da Integração Nacional, Brasília, DF, Brasil, 2016b.

CAMPOS, V. N. O. Soluções baseadas na natureza (SbN) e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluídas em ambientes rígidos. Revista LABVERDE, v. 11, n. 1, p. 73-94, 2021. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189314.

CÁRDENAS, S.; FHAISULY, E. Avaliação dos sistemas urbanos de drenagem sustentável mediante o modelo Urban Water Use (UWU) em área urbana da cidade de Curitiba. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L.; DALLAGNOL, A. L. B.; LOEBENS, L.; DEMARCO, C. F.; LEANDRO, D.; NADALETI, W. C.; QUADRO, M. S. The analysis of green roof's runoff volumes and its water quality in an experimental study in Porto Alegre, Southern Brazil. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 9, p. 9520-9534, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-019-06777-5.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. Saúde em Debate, v. 43, n. spe3, p. 94–108, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-11042019S307.

CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. Revista USP, n. 106, p. 45-58, 2015. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p45-58.

COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALMEIDA, C. N.; LIMA, E. R. V.; RIBEIRO NETO, A.; MOURA, G. S. S. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 1, p. 64–72, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100009.

CONDEPE/FIDEM. Agência de Planejamento e Pesquisa do Estado de Pernambuco - Perfil Municipal. Governo de Pernambuco. Disponível em: http://www.condepefidem.pe.gov.br/web/condepe-fidem. Acesso em: dez. 2020, 2016.

EMPINOTTI, V. L.; TADEU, N. D.; FRAGKOU, M. C.; SINISGALLI, P. A. A. Desafios de governança da água: conceito de territórios hidrossociais e arranjos institucionais. Estudos Avançados, v. 35, n. 102, p. 177–192, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.011.

GHISI, E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. Building and Environment, v. 41, n. 11, p. 1544-1550, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.018.

GIMENEZ-MARANGES, M.; BREUSTE, J.; HOF, A. A new analytical tool for a more deliberate implementation of Sustainable Drainage Systems. Sustainable Cities and Society, v. 71, 102955, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102955.

GWAK, Y. S.; HULSEBOSCH, C. E.; LEEM, J. W. Neuronal-glial interactions maintain chronic neuropathic pain after spinal cord injury. Neural Plast, p. 2480689, 2017. DOI: https://doi.org/10.1155/2017/2480689.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico de 2000. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/9663-censo-demografico-2000.html. Acesso em: ago. 2020, 2000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico de 2010. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/cultura-recreacao-e-esporte/9662-censo-demografico-2010.html. Acesso em: ago. 2020, 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico de 2020. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html. Acesso em: mai. 2022, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades: Caruaru, Pernambuco. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama. Acesso em: ago. 2020, 2020.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas - SPRING. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html. Acesso em: dez. 2022, 2022.

LIMA, G. C. O. Avaliação do desempenho de telhados verdes: capacidade de retenção hídrica e qualidade da água escoada. 67f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, Caruaru – PE, 2013.

LINTON, J.; BUDDS, J. The hydrosocial cycle: defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. Geoforum, v. 57, p. 170-180, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008.

LIZ, D. S.; ORDENES, M.; GUTHS, S. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. Oculum Ensaios, v. 15, n. 2, p. 315–333, 2018. DOI: https://doi.org/10.24220/2318-0919v15n2a4053.

MEDAU, I. Análise dos dispositivos de drenagem urbana na Avenida São Francisco, Anápolis/GO. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Anápolis, Goiás, Brasil, 2018.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. Planejamento e gestão de drenagem e manejo sustentável de águas de chuva no Brasil: lacunas e situação dos municipios. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, n. 29, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2023.

MINKE, G. Trechos verdes – Planificação, ejecución, consejos prácticos. Uruguai: Editorial Fin de Siglo, 2005.

MOURA, D. C.; MARQUES, A. D. L.; COSTA, R. G. Representações geográficas do Semiárido brasileiro. Instituto Nacional do Semiárido, INSA, 2019.

NGUYEN, T. T.; NGO, H. H.; GUO, W.; WANG, X. C.; REN, N.; LI, G.; DING, J.; LIANG, H. Implementation of a specific urban water management - Sponge City. Science of the Total Environment, v. 652, p. 147–162, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168.

PAIVA, A. L. R.; SILVA, T. F.; SANTOS, S. M. Capacidade de retenção de água em um telhado verde: Estudo de caso em Caruaru. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais... Florianópolis: ABRHidro, 2017.

PALLA, A.; BERRETTA, C.; LANZA, L. G.; BARBERA, P. Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale. In: 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.

PAULA, J. S.; SILVA, J. S.; OLIVEIRA, M. A. F.; RANGEL, M. P. Execução de obras de drenagem pluvial: princípios empregados na construção de redes de drenagem urbana. Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico, v. 3, n. 2, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.20951/2446-6778/v3n2a15.

PALHARES, J.C.P. Captação de água de chuva e armazenamento em cisterna para uso na produção animal. Dados eletrônicos - São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2016.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional. Governo de Pernambuco. Disponível em: http://www.pe3d.pe.gov.br/. Acesso em: dez. 2020, 2016.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras, 1999.

SANTANA, A. C. A.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M. A gestão da cisterna calçadão realizada por agricultores familiares: uma abordagem qualitativa. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais... Brasília: ABRHidro, 2015.

SANTOS, S. M.; FARIAS, M. M. M. W. E. C. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 164, p. 1007–1015, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.251.

SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA, T. F.; SANTOS, G. C. Telhados Verdes Aplicados no Semiárido Pernambucano. *In*: MONTENEGRO, A. A. A.; SOUZA, W. M. Pesquisa e tecnologias hídricas para o desenvolvimento do Semiárido de Pernambuco. Editora Universitária, UFRPE, Recife, 224 p., 2018.

SANTOS, S. M.; SILVA, J. F. F.; SANTOS, G. C.; MACEDO, P. M. T.; GAVAZZA, S. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. Journal of Cleaner Production, v. 219, p. 639-648, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.068.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 757-773, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006.

SIVAPALAN, M. From engineering hydrology to Earth system science: Milestones in the transformation of hydrologic science. Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 3, p. 1665-1693, 2018. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-22-1665-2018.

SILVA, J. S.; SILVA, T. T. S.; PASTICH, E. A. Benefícios e limitações do uso de telhados verdes: uma revisão sistemática. Revista Geama, v. 8, n. 3, p. 15–28, 2022.

SILVEIRA, G. R. P.; OLIVEIRA, D. D. L.; SILVA, M. R. Impacto da adoção de cisternas sobre a vazão de pico em pontos críticos na cidade de Avaré (SP). Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia, v. 21, n. 1, 2023. DOI: https://doi.org/10.5016/estgeo.v21i1.17571.

SOUZA, I. A.; AZEVEDO, J. R. G.; MACIEL NETTO, A.; ANTONINO, A. C. D. Implicações de aquecimento global no balanço hídrico climático do Agreste de Pernambuco. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais... CBMET: Edição XIV, 2006.

SOUSA, N. L.; MENESES FILHO, A. S. Telhado verde como técnica compensatória para mitigação do escoamento superficial em drenagem urbana. Revista Tecnologia, v. 43, 2023. DOI: https://doi.org/10.5020/23180730.2022.11687.

THOMAS, T. Escolha de cisternas para captação de água de chuva no sertão. III Simpósio Brasileiro de Captação de água de Chuva no Semi-árido. Anais... Petrolina: ABCMAC, 2001.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora UFRGS, 943p., 2007.

UHMANN, I. M. S.; TAVARES, S. F. Avaliação do desempenho ambiental na utilização de telhados verdes extensivos em escolas públicas do Paraná. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, 2017. DOI: https://doi.org/10.5216/reec.v13i1.41372.

VERSINI, P.; RAMIER, D.; BERTHIER, E.; GOUVELLO, B. Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale. Journal of Hydrology, v. 524, p. 562-575, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020.

VIEIRA, N. S.; LOPES, D. P. T.; HONORATO DA SILVA, F. A. G.; SOARES, N. S. F.; HIGUCHI, A. K. O Programa Cisternas nas Escolas nos Vales do Jequitinhonha e do Mucuri, Minas Gerais, Brasil. Administração Pública e Gestão Social, v. 14, n. 2, 2022. DOI: https://doi.org/10.21118/apgs.v14i2.11849.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 57, p. 740-752, 2016.

WAGENER, T.; SIVAPALAN, M.; TROCH, P. A.; MCGLYNN, B. L.; HARMAN, C. J.; GUPTA, H. V.; KUMAR, P.; RAO, P. S. C.; BASU, N. B.; WILSON, J. S. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. Water Resources Research, v. 46, W05301, 2010. DOI: https://doi.org/10.1029/2009WR008906.

WESSELINK, A.; KOOY, M.; WARNER, J. Socio-hydrology and hydrosocial analysis: toward dialogues across disciplines. WIREs Water, v. 4, e1196, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/wat2.1196.

WILKINSON, L. Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis by Wickham, H. Biometrics, v. 67, n. 2, p. 678–679, 2011. DOI: http://doi.wiley.com/10.1111/j.1541-0420.2011.01616.x.

WOODS-BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R.; SHAFFER, P. The SUDS manual, vol. 697, London: Ciria, 2007.

AmeliCA Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no âmbito da iniciativa acesso abertoPDF gerado a partir de XML JATS4R

XAVIER, A.C.; KING, W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980 – 2013). International Journal of Climatology, v. 36, p. 2644–2659, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4518.

YU, W.; ZANG, S.; WU, C.; LIU, W.; NA, X. Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China. Applied Geography, v. 31, n. 2, p. 600–608, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.019.

ZÖLCH, T.; HENZE, L.; KEILHOLZ, P.; PAULEIT, S. Regulating Urban surface runoff through nature-based solutions - an assessment at the micro-scale. Environmental Research, v. 157, p. 135–144, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.023.

AmeliCA

Disponível em:
https://portal.amelica.org/ameli/ameli/journal/274/2745599002/2745599002.pdf

Como citar este artigo

Número completo

Mais informações do artigo

Site da revista em portal.amelica.org

AmeliCA
Ciência Aberta para o Bem Comum

Alexandre Carlos Araújo de Santana,
Maria das Graças Monteiro Almeida de Melo,
Fernanda Gabriella Liberato Santos,
Thaísa Mayane Tabosa da Silva,
Timóteo Herculino da Silva Barros,
Jocimar Coutinho Rodrigues Junior, José Almir Cirilo,
Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Tecnologias sociais de apoio à drenagem urbana: aplicação de telhados verdes e cisternas em Caruaru - PE

Social technologies to support urban drainage: application of green roofs and cisterns in Caruaru - PE

Revista Presença Geográfica
vol. 13, núm. 1, 2026
Fundação Universidade Federal de Rondônia, Brasil
rpgeo@unir.br

ISSN-E: 2446-6646