

**IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI**

**IMPACT OF GREEN ROOFS ON THE MITIGATION OF SURFACE RUNOFF
IN RESIDENTIAL SUBDIVISIONS IN TERESINA, PIAUÍ**

**Igor Samuel da Silva Barbosa¹, Girleiane Santos de Sá², Reurysson Chagas de
Sousa Moraes³, Mauro César de Brito Sousa⁴**

¹ Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí;
eng.igorsamuel@gmail.com; ORCID 0009-0004-2961-8522

² Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí;
catce.2025111pape0006@aluno.ifpi.edu.br; ORCID: 0000-0001-5433-2594

³ Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal
do Piauí reurysson@ifpi.edu.br; ORCID: 0000-0002-1334-4182

⁴ Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí
mauro.sousa@ifpi.edu.br; ORCID: 0000-0002-0650-6577

Recebido: 25/02/2026

Publicado: 24/05/2026

DOI: [10.29327/261865.6.1-2](https://doi.org/10.29327/261865.6.1-2)

RESUMO

Teresina, capital do estado do Piauí, apresenta elevada vulnerabilidade socioambiental em função da intensificação de eventos climáticos extremos, da elevada impermeabilização do solo urbano e de deficiências na infraestrutura de drenagem. Nesse contexto, abordagens sustentáveis, como o Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development – LID), têm sido empregadas para mitigar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico. Entre as técnicas LID, os telhados verdes destacam-se pela capacidade de reduzir o escoamento superficial e os picos de vazão, além de contribuírem para o conforto térmico das edificações em regiões de clima quente. O presente estudo avaliou o desempenho hidrológico e a viabilidade econômica da implantação de telhados verdes em um loteamento residencial de Teresina–PI, por meio de modelagem computacional no Storm Water Management Model (SWMM). Foram simulados cenários com 25% e 100% de conversão das áreas de cobertura, cujos resultados indicaram reduções proporcionais ao aumento da área tratada, alcançando até 35,94% no pico de vazão e 31,40% no volume de escoamento superficial em relação ao cenário sem LID. Por outro lado, a análise econômica evidenciou custos de implantação superiores aos sistemas convencionais de cobertura, indicando a necessidade de incentivos e políticas públicas para viabilizar sua adoção em larga escala.

Palavras–chave: pavimentos permeáveis, escoamento superficial, SWMM, gestão de águas pluviais urbanas.

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

ABSTRACT

The rapid urbanization of cities has generated challenges for the efficient management of stormwater runoff. Conventional pavements, by making the soil impermeable, contribute to flooding, inundations, and damage to urban infrastructure. These events result in economic losses and compromise the population's quality of life, while also affecting the regular functioning of cities. This study analyzes the effectiveness of permeable pavements as a sustainable alternative to mitigate such problems, focusing on the city of Teresina, Piauí, Brazil. The research used the Storm Water Management Model (SWMM) software to simulate the hydrological behavior of a residential subdivision, comparing scenarios with and without permeable pavements. The results show that adopting this technology can reduce the total runoff volume by about 24.00%, decrease peak flow by approximately 57.00%, and increase the system's response time by up to 7 minutes. In addition, permeable pavements enhance water infiltration into the soil, contributing to groundwater recharge. The study highlights the relevance of permeable pavements as a sustainable solution, promoting more efficient urban drainage and helping to reduce flooding in Teresina.

Keywords: Permeable pavements, Surface runoff, SWMM (Storm Water Management Model), Urban stormwater management.

1 Introdução

O crescimento urbano acelerado e desordenado tem provocado alterações significativas no ciclo hidrológico natural, especialmente em cidades brasileiras de clima tropical. Em Teresina-PI, esse processo intensificou-se a partir da década de 1950, resultando na supressão da vegetação natural e no aumento da impermeabilização do solo, o que contribuiu para a intensificação de alagamentos, inundações e outros impactos ambientais e socioeconômicos associados às precipitações intensas (Lima, 2019).

Diante das limitações do modelo tradicional de drenagem urbana, baseado na rápida condução das águas pluviais para jusante, novas abordagens voltadas à sustentabilidade passaram a ser adotadas. Entre elas, destacam-se o Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development – LID*), os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (*Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS*), o Desenho Urbano Sensível à Água (*Water Sensitive Urban Design – WSUD*) e as Melhores Práticas de Gerenciamento (*Best Management Practices – BMPs*), que compartilham o objetivo de restabelecer, ainda que parcialmente, o comportamento natural do ciclo hidrológico em áreas urbanas (Martins, 2017; Paithankar e Taji, 2020).

No âmbito dessas abordagens, o conceito LID propõe o controle do escoamento superficial preferencialmente na fonte, por meio da aplicação de técnicas compensatórias que promovem a retenção, a infiltração e a evapotranspiração da água precipitada,

reduzindo os picos de vazão e os volumes escoados (Martins, 2017; Canholi, 2005). Dentre essas técnicas, os telhados verdes se destacam por sua aplicação direta sobre as edificações, funcionando como microreservatórios capazes de armazenar temporariamente a água das chuvas e retardar seu escoamento para o sistema público de drenagem (Köhler et al., 2001; Paithankar e Taji, 2020).

Apesar da ampla disseminação dos telhados verdes em países de clima temperado, ainda são necessários estudos que avaliem o desempenho hidrológico e a viabilidade de sua aplicação em regiões de clima tropical quente e semiárido, como o Nordeste brasileiro, considerando as particularidades climáticas, construtivas e econômicas locais (Köhler et al., 2001; Tucci, 2003). Nesse contexto, a modelagem hidrológica se apresenta como uma ferramenta fundamental para a avaliação do comportamento chuva–vazão em áreas urbanas e para a análise do desempenho dessas técnicas compensatórias.

O *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency – EPA*), é amplamente utilizado para simulações hidrológicas em bacias urbanas, permitindo a representação integrada de processos como escoamento superficial, infiltração, evaporação e o funcionamento de dispositivos de controle LID (Palla e Gnecco, 2015; Rossman, 2015). Assim, por meio da modelagem computacional no EPA SWMM, o presente trabalho avaliou o impacto da implantação de telhados verdes em um loteamento residencial projetado na cidade de Teresina–PI, analisando seu desempenho hidrológico e sua viabilidade econômica, à luz das diretrizes do conceito LID.

2 Fundamentação teórica

2.1 Drenagem urbana sustentável e técnicas compensatórias

O modelo tradicional de drenagem urbana, fundamentado na rápida condução das águas pluviais por meio de canalizações e galerias, mostrou-se insuficiente para lidar com os impactos decorrentes do crescimento urbano acelerado, transferindo os problemas de inundação para áreas a jusante e gerando elevados custos ambientais, sociais e econômicos (Tucci, 2005; Canholi, 2005). A partir dessas limitações, consolidou-se o conceito de drenagem urbana sustentável, que busca compensar os efeitos da impermeabilização do solo por meio de estratégias que promovem a retenção, a infiltração

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

e o retardamento do escoamento superficial (Tucci, 1993).

Nesse contexto, surgiram diferentes abordagens internacionais voltadas ao manejo sustentável das águas pluviais, como o *Low Impact Development* (LID), os *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), o *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e as *Best Management Practices* (BMPs). Embora apresentem diferenças conceituais e institucionais, essas abordagens compartilham o objetivo de restabelecer, de forma descentralizada, o comportamento hidrológico próximo às condições naturais nas áreas urbanizadas (Martins, 2017; Paithankar e Taji, 2020).

O conceito LID, em particular, enfatiza o controle do escoamento superficial na fonte, por meio da aplicação de técnicas compensatórias distribuídas no espaço urbano, reduzindo os volumes excedentes lançados no sistema público de drenagem e os picos de vazão associados aos eventos de chuva (Martins, 2017; Pedrosa, 2021). Essas técnicas podem atuar tanto por meio da infiltração da água no solo quanto pela retenção temporária do escoamento, sendo sua escolha condicionada às características físicas, climáticas e urbanísticas de cada local (Pedrosa, 2021).

2.2 Telhados verdes como técnica LID

Entre as técnicas compensatórias associadas ao conceito LID, os telhados verdes se destacam por sua aplicação direta sobre as edificações, funcionando como sistemas capazes de armazenar temporariamente a água precipitada e retardar sua liberação para o sistema de drenagem urbana (Köhler et al., 2001). Do ponto de vista hidrológico, esses dispositivos atuam por meio da retenção da água no substrato e do aumento da evapotranspiração, contribuindo para a redução do volume escoado e do pico de vazão gerado pelos eventos pluviométricos (Paithankar e Taji, 2020).

Os telhados verdes podem ser classificados, de forma geral, em sistemas extensivos e intensivos, conforme a espessura do substrato e o tipo de vegetação utilizada. Os sistemas extensivos apresentam menor espessura de substrato, vegetação de pequeno porte e reduzida necessidade de manutenção, sendo amplamente indicados para aplicações em larga escala em áreas urbanas (Pedrosa, 2021). Em razão dessas características, esse tipo de sistema é frequentemente adotado em estudos de modelagem hidrológica, especialmente quando se busca avaliar sua viabilidade em empreendimentos residenciais (Martins, 2017).

Além dos benefícios hidrológicos, os telhados verdes podem proporcionar

vantagens térmicas e ambientais, como a mitigação das ilhas de calor urbano e a melhoria do microclima local. No entanto, apesar da consolidação dessa técnica em países de clima temperado, ainda há necessidade de investigações que avaliem seu desempenho em regiões de clima tropical quente e semiárido, onde fatores como elevada evapotranspiração, regimes pluviométricos concentrados e limitações econômicas podem influenciar sua eficiência e adoção (Köhler et al., 2001; Tucci, 2003).

2.3 Modelagem hidrológica

A avaliação do desempenho hidrológico de técnicas compensatórias pode ser realizada por meio de ensaios experimentais ou por modelagem computacional aplicada a bacias hidrográficas urbanas. Considerando a complexidade dos processos envolvidos e a influência de fatores como intensidade e duração da precipitação, umidade antecedente do solo e grau de impermeabilização, a modelagem computacional tem sido amplamente utilizada para a análise integrada do comportamento chuva–vazão em ambientes urbanos (Versini et al., 2015; Palla e Gnecco, 2015).

O *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), destaca-se como uma das ferramentas mais empregadas para simulações hidrológicas em áreas urbanas. O modelo permite a representação de processos como infiltração, escoamento superficial, evaporação, armazenamento em depressões e propagação hidráulica, além de possibilitar a simulação de dispositivos de controle LID por meio de módulos específicos (Rossman, 2015; Martins, 2017).

Diversos estudos têm demonstrado a confiabilidade do SWMM na avaliação do desempenho hidrológico de telhados verdes em escala urbana. Palla e Gnecco (2015) observaram reduções significativas nos picos de vazão e atrasos no hidrograma com o aumento da área de cobertura verde, enquanto Paithankar e Taji (2020) destacaram a sensibilidade do modelo a parâmetros físicos da bacia. Sousa et al. (2021) ressaltam que, embora não exista um padrão único de modelagem, a definição criteriosa dos parâmetros de entrada é fundamental para a obtenção de resultados hidrológicamente representativos.

2.4 Viabilidade econômica dos telhados verdes

Além do amortecimento dos picos de vazão e da redução do volume escoado, o

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) também pressupõe a racionalização dos custos de implantação das técnicas de drenagem urbana, visando à sustentabilidade das intervenções. No entanto, segundo Canholi (2005), um dos principais entraves à adoção dessas soluções está no fato de que a geração do escoamento superficial ocorre em âmbito privado, enquanto os benefícios decorrentes de sua mitigação são predominantemente públicos.

Embora os ganhos diretos das técnicas compensatórias, como a valorização imobiliária, sejam inicialmente secundários, sua aplicação em larga escala possibilita a redução dos gastos públicos com implantação, operação e manutenção dos sistemas convencionais de drenagem. Nesse sentido, a adoção de incentivos fiscais mostra-se uma estratégia justificável para estimular a disseminação dessas práticas e reduzir os custos assumidos pelo empreendedor privado (Canholi, 2005; Liberalesso, Silva e Cruz, 2024).

Ainda assim, os custos associados à implantação dos dispositivos LID devem ser analisados de forma criteriosa, uma vez que falhas no projeto ou na execução podem gerar gastos adicionais e comprometer a aceitação dessas tecnologias. Hekrle et al. (2023) destacam que a escassez de informações técnicas consolidadas e de dados econômicos confiáveis dificulta a tomada de decisão por parte dos investidores, reforçando a necessidade de avaliações econômicas baseadas em estudos de caso reais.

Nesse contexto, a análise de custo-benefício surge como uma ferramenta relevante para a avaliação econômica de projetos com telhados verdes, permitindo a comparação entre diferentes alternativas de cobertura em edificações (Hekrle et al., 2023). Estudos como o de Borges et al. (2022), realizados em Teresina-PI, indicam que os telhados verdes apresentam elevado custo inicial de implantação, além de demandarem atenção quanto à sobrecarga estrutural, irrigação e manutenção, fatores que podem limitar sua adoção como solução sustentável.

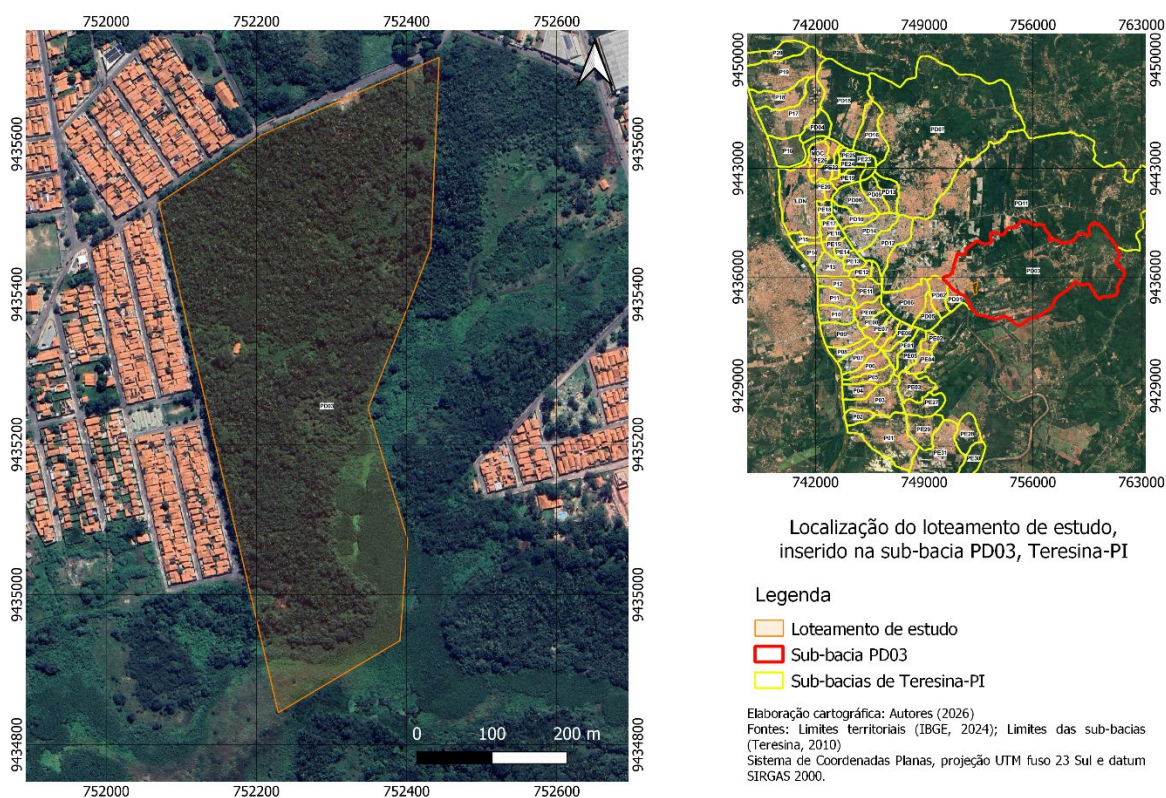
Entretanto, ressalta-se que as análises econômicas disponíveis ainda se baseiam, em sua maioria, em estudos pontuais e abordagens individuais, o que restringe a generalização dos resultados e sua aplicação no processo decisório (Hekrle et al., 2023). Dessa forma, a elaboração de orçamentos confiáveis requer o uso de bases de dados oficiais, como o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI), a Secretaria de Infraestrutura do Ceará (Seinfra) e o Sistema de Orçamento de Obras de Sergipe (Orse), garantindo maior precisão e consistência na composição dos custos (Borges et al., 2022).

3 Metodologia

3.1 Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi desenvolvido a partir de um loteamento residencial e comercial projetado, localizado no bairro São Sebastião, zona Sudeste da cidade de Teresina-PI. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo, evidenciando a inserção do empreendimento no contexto urbano do município. O loteamento possui área total aproximada de 14,6 ha, caracterizando-se por elevado grau de impermeabilização, condição típica de novos parcelamentos urbanos.

Figura 1. Área total do terreno a ser loteado em Teresina-PI.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024); Teresina (2010); IBGE (2024).

O empreendimento está inserido na sub-bacia PD03, conforme o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (Teresina, 2010), em região composta predominantemente por solos classificados no grupo hidrológico B. Aproximadamente 70,9% da área total é impermeável, sendo que cerca de 21.700 m² correspondem às áreas de cobertura das edificações, originalmente previstas com telhamento em fibrocimento e

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

consideradas como áreas passíveis de conversão para telhados verdes nos cenários simulados. A Figura 2 apresenta a planta de implantação do loteamento, destacando de forma esquemática a localização e a distribuição das áreas de cobertura consideradas para a aplicação dos telhados verdes.

Figura 2. Planta de locação do projeto urbanístico do loteamento.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

3.2 Dados de precipitação

Os eventos de precipitação utilizados na modelagem hidrológica foram definidos a partir das diretrizes do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (PDDrU), que recomenda a determinação do tempo de concentração das sub-bacias urbanas por meio do método de Schaake (Teresina, 2010). Aplicando-se os parâmetros físicos do loteamento em estudo, obteve-se um tempo de concentração de 10,27 minutos, conforme a Equação (1):

$$tc = \frac{4,968 * L^{0,24}}{S^{0,16} * Aimp^{0,26}} \quad (1)$$

Em que tc é o tempo de concentração em minutos, L o comprimento médio do talvegue em km, S a declividade média da sub-bacia em m/m e $Aimp$ a fração de área impermeável.

De acordo com o PDDrU (Teresina, 2010), a duração da chuva de projeto deve ser, no mínimo, 1,5 vezes superior ao tempo de concentração da bacia analisada, especialmente em estudos que envolvem dispositivos de controle na fonte. Assim, adotou-se duração de chuva de 60 minutos, garantindo adequada representação dos volumes escoados.

As intensidades de precipitação foram obtidas a partir da equação geral das curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) para o município de Teresina, expressa pela Equação (2), conforme estabelecido no PDDrU (Teresina, 2010):

$$i = \frac{1194,237 * T^{0,1738}}{(t + 10)^{0,7457}} \quad (2)$$

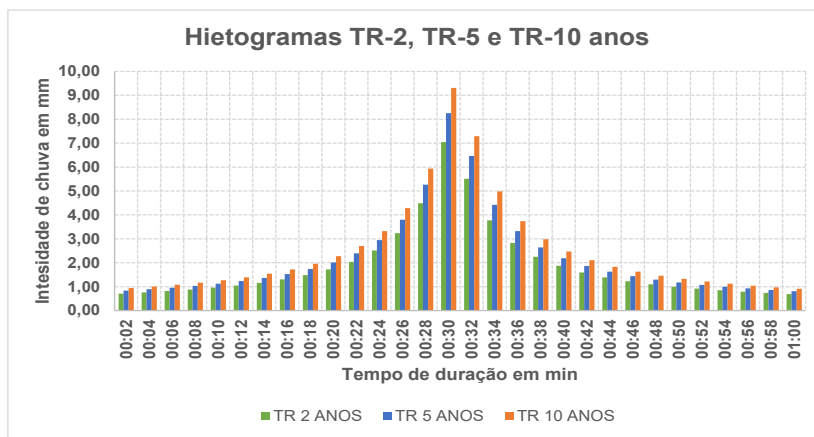
Sendo (i) a intensidade da chuva em mm/h, (T) o período de retorno em anos e (t) o tempo de concentração da bacia em min.

Foram considerados tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos, representativos de eventos frequentes e críticos para a drenagem urbana. A discretização temporal da chuva de projeto foi realizada com intervalo de 2 minutos, aproximadamente igual a um quinto do tempo de concentração da microbacia. A distribuição das intensidades ao longo do evento seguiu o método dos blocos alternados, amplamente empregado em estudos de escoamento urbano.

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

A Figura 3 apresenta os hietogramas de precipitação utilizados como entrada no modelo SWMM para os diferentes tempos de retorno analisados, evidenciando a concentração das maiores intensidades no período central do evento, conforme recomendado pelo PDDrU (Teresina, 2010).

Figura 3. Hietogramas gerados pela IDF de Teresina-PI.



Fonte: Autor (2024).

3.3 Simulação hidrológica no EPA SWMM

A simulação hidrológica foi realizada por meio do software Storm Water Management Model (SWMM), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), amplamente utilizado para a análise do comportamento hidrológico de bacias urbanas e para a avaliação de dispositivos de controle associados ao conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (Rossman, 2015).

O modelo foi estruturado de forma a representar a microbacia do empreendimento, considerando áreas permeáveis, impermeáveis e áreas tratadas por dispositivos LID. O processo de infiltração foi representado pelo método do Número de Curva (CN–NRCS), adotando-se valores compatíveis com o tipo de solo e o grau de impermeabilização da área, conforme recomendações da literatura (Martins, 2017). A propagação hidráulica foi simulada pelo método da Onda Dinâmica, por se tratar da abordagem mais completa disponível no SWMM (Rossman, 2015).

Os parâmetros hidrológicos da microbacia, como declividade média, largura de escoamento superficial, coeficientes de rugosidade de Manning e armazenamento em depressões, foram definidos a partir das características físicas da área de estudo e de valores consolidados na literatura técnica (Rossman, 2015; Martins, 2017). O processo de

infiltração foi modelado pelo método do Número de Curva (CN-NRCS), considerando o tipo de solo e o grau de impermeabilização da área, resultando em um CN médio ponderado de 90 para o cenário diagnóstico, conforme indicado por Martins (2017).

3.4 Implementação dos telhados verdes

Após a simulação do cenário diagnóstico, sem a aplicação de técnicas compensatórias, foram definidos cenários prognósticos com a implantação de telhados verdes em 25% e 100% da área total de cobertura das edificações. Esses percentuais foram adotados com o objetivo de avaliar a sensibilidade hidrológica do sistema em função do aumento da área tratada, conforme procedimentos empregados em estudos similares (Palla e Gnecco, 2015; Martins, 2017; Pedrosa, 2021).

Os telhados verdes foram representados no SWMM por meio do módulo de controles LID, adotando-se parâmetros compatíveis com sistemas do tipo extensivo, em razão da menor exigência de manutenção e das menores cargas estruturais associadas. A implantação dos dispositivos implicou o reajuste dos parâmetros hidrológicos da microbacia, especialmente da porcentagem de área impermeável e do valor do Número de Curva, de modo a refletir o efeito de retenção e retardamento do escoamento superficial promovido pelos telhados verdes (Rossman, 2015; Martins, 2017).

3.5 Avaliação do escoamento superficial

O desempenho hidrológico dos cenários simulados foi avaliado a partir da análise dos hidrogramas de vazão no exutório da microbacia. Foram considerados como indicadores o pico de vazão, o volume total escoado e o comportamento temporal do escoamento superficial, permitindo a comparação entre o cenário convencional e os cenários com implantação de telhados verdes, para os diferentes tempos de retorno analisados.

3.6 Análise simplificada de viabilidade econômica

No que se refere à viabilidade econômica dos telhados verdes, os custos diretos com materiais e mão de obra necessários para a construção dos dispositivos foram levantados de acordo com a metodologia apontada por Martins (2017) e Borges et al.

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

(2022). Desse modo, a base de cálculo teve como fontes as composições de custo do relatório de preços de serviços e insumos do SINAPI/PI e Seinfra/CE com referência de junho/2024, sendo o primeiro priorizado devido a regionalidade.

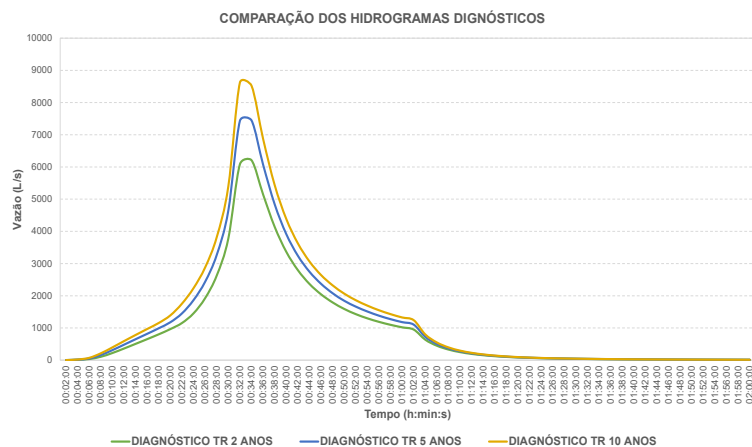
A avaliação teve caráter comparativo e simplificado, não contemplando custos de manutenção, irrigação ou análises de ciclo de vida, reconhecendo-se que tais aspectos podem influenciar a viabilidade econômica em avaliações de longo prazo.

4 Resultados e discussões

4.1 Simulação hidrológica no EPA SWMM

A simulação hidrológica permitiu avaliar o comportamento do escoamento superficial da microbacia para o cenário diagnóstico e para os cenários com implantação de telhados verdes em 25% e 100% da área de cobertura, considerando tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos. No cenário diagnóstico, os hidrogramas obtidos no exutório da microbacia indicaram picos de vazão aos 34 minutos, atingindo 6.209,78 L/s, 7.447,07 L/s e 8.620,57 L/s para os respectivos tempos de retorno, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4. Hidrogramas dos cenários diagnósticos resultantes do SWMM.

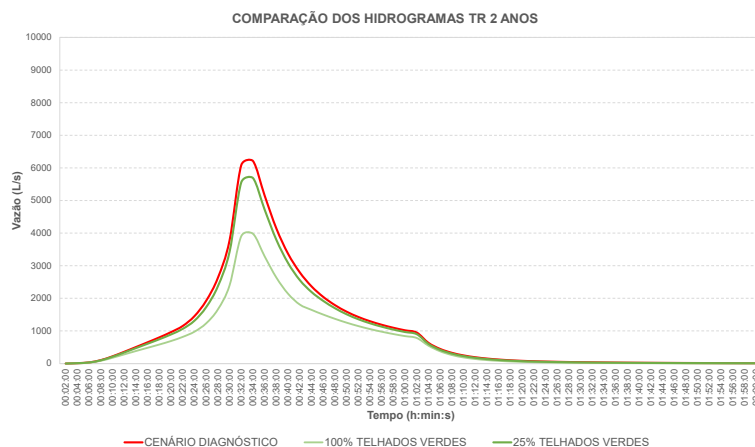


Fonte: Autor (2024).

No que se refere aos resultados após a inserção dos controles LID, a comparação entre os cenários de conversão parcial (25%) e total (100%) permitiu avaliar a influência direta da área de cobertura dos telhados verdes sobre a resposta hidrológica da microbacia. Para o tempo de retorno de 2 anos, a Figura 5 evidencia que a conversão total das

coberturas promoveu redução de 35,94% no pico de vazão em relação ao cenário diagnóstico, enquanto a conversão parcial resultou em redução de 8,39%. De forma semelhante, o volume de escoamento superficial foi reduzido em 31,40% no cenário com 100% de cobertura e em 7,78% no cenário com 25% de telhados verdes, confirmando a maior eficiência hidrológica associada ao aumento da área tratada.

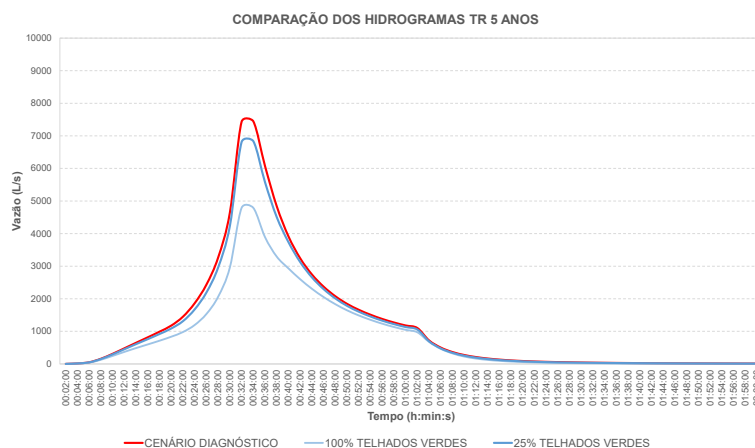
Figura 5. Hidrogramas resultantes com TR de 2 anos retirados do SWMM.



Fonte: Autor (2024).

Para o tempo de retorno de 5 anos, a Figura 6 indica que a conversão total das coberturas em telhados verdes resultou em redução de 35,64% do pico de vazão em relação ao cenário diagnóstico, enquanto a conversão parcial (25%) promoveu redução de 8,19%. No que se refere ao volume de escoamento superficial, observaram-se reduções de 27,25% e 6,72% para as coberturas de 100% e 25%, respectivamente.

Figura 6. Hidrogramas resultantes com TR de 5 anos retirados do SWMM.

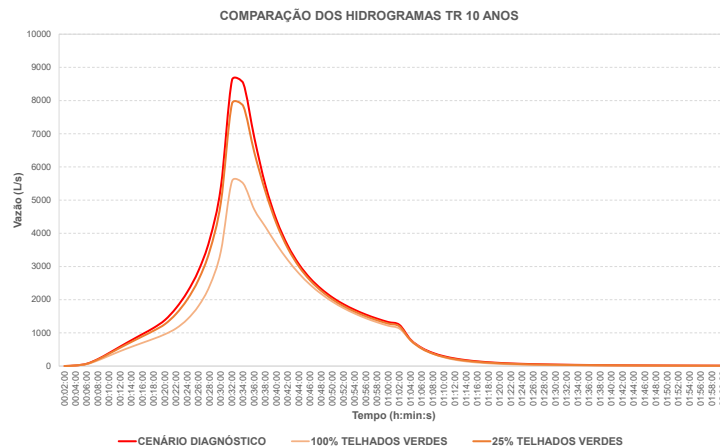


Fonte: Autor (2024).

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

De modo semelhante, para o tempo de retorno de 10 anos, os resultados apresentados na Figura 7 evidenciam reduções do pico de vazão de 35,33% no cenário com conversão total e de 8,24% no cenário com conversão parcial. O volume escoado também apresentou diminuições de 24,41% e 6,01%, respectivamente, confirmando a maior eficiência hidrológica associada ao aumento da área de cobertura por telhados verdes.

Figura 7. Hidrogramas resultantes com TR de 10 anos retirados do SWMM.



Fonte: Autor (2024).

De modo geral, os resultados obtidos neste estudo mostram-se coerentes com aqueles reportados na literatura, corroborando pesquisas de referência que utilizaram o SWMM para avaliação do desempenho hidrológico de telhados verdes. Martins (2017) observou reduções de até 16,37% no pico de vazão e 10,51% no volume escoado superficial com a conversão de 25% das coberturas, em uma bacia relativamente urbanizada. O autor também não identificou atrasos significativos no tempo até o pico de vazão, comportamento semelhante ao verificado no presente estudo para cenários de menor percentual de conversão.

Por outro lado, Pedrosa (2021) identificou, em parte de seus resultados, incrementos no pico de vazão e no volume escoado em uma sub-bacia urbana de Teresina-PI, atribuídos às limitações do balanço hídrico simplificado do módulo de telhados verdes no SWMM. Segundo o autor, o retardamento do escoamento e a liberação tardia da água armazenada podem ser mal representados no modelo, resultando em maiores vazões simuladas.

Entretanto, Martins (2017) ressalta que o balanço hídrico dos telhados verdes no

SWMM não é representado apenas no módulo de controle LID, mas também no comportamento hidrológico global da bacia. Nesse sentido, destaca-se a importância da recalibração criteriosa dos parâmetros da microbacia, especialmente a largura de escoamento superficial e o percentual de áreas permeáveis, uma vez que o modelo considera os telhados verdes como superfícies permeáveis no cálculo das variáveis de rugosidade e escoamento. No presente estudo, essa recalibração foi realizada para cada cenário de intervenção, o que contribuiu para a obtenção de resultados hidrológicamente consistentes, sem comportamentos inesperados.

Ainda assim, deve-se considerar que a capacidade de retenção dos telhados verdes é relativamente limitada. Após o início da precipitação, o incremento da percolação e da evaporação promovido pelo dispositivo é rapidamente superado, levando o sistema à saturação e ao extravasamento do excedente para o escoamento superficial da microbacia, conforme discutido por Pedrosa (2021).

Com base nesses aspectos, observa-se que o impacto hidrológico dos telhados verdes é mais sensível à proporção da área impermeabilizada tratada do que propriamente ao aumento da intensidade das chuvas. Embora a intensidade do evento pluviométrico influencie diretamente o desempenho dos dispositivos, especialmente na mitigação do escoamento na saída da bacia, não foram observadas diferenças expressivas no comportamento relativo entre os tempos de retorno analisados.

Um dos fatores que contribuem para esse comportamento está relacionado ao dimensionamento do volume de armazenamento dos dispositivos LID, uma vez que camadas de armazenamento mais espessas apresentam maior capacidade de suportar aumentos na intensidade da precipitação em eventos menos frequentes, conforme destacado por Pedrosa (2021).

4.2 Viabilidade econômica dos telhados verdes

Considerando que o projeto do loteamento contempla exclusivamente edificações novas, executadas em alvenaria estrutural com laje de cobertura já prevista como suporte para telhas de fibrocimento, a implantação de telhados verdes pode ser realizada sem obstáculos significativos do ponto de vista construtivo. Ainda assim, a adoção dessa técnica compensatória requer a realização de estudo de viabilidade econômica, especialmente quando considerada a necessidade de eventuais reforços estruturais em edificações já concluídas.

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

Para fins de simplificação, a presente análise concentrou-se exclusivamente nos custos diretos de implantação, desconsiderando custos indiretos associados a reforço estrutural, manutenção, irrigação e capacitação de mão de obra. As Figuras 8 e 9 apresentam as composições orçamentárias unitárias para 1 m² de telhado verde e 1 m² de telhamento em fibrocimento, respectivamente.

Figura 8. Orçamento para 1 m² de telhado verde.

Planilha Orçamentária Sintética Com Valor do Material, Mão de Obra e Equipamento						
Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit. (R\$)	Total (R\$)
103946	SINAPI	PLANTIO DE GRAMA ESMERALDA OU SÃO CARLOS OU CURITIBANA, EM PLACAS. AF_05/2022	m ²	1,00	20,06	20,06
102712	SINAPI	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO 100% POLIÉSTER, RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE 9 KN/M (RT - 9), INSTALADO EM DRENO - FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO. AF_07/2021	m ²	1,00	14,21	14,21
98546	SINAPI	IMPERMEABILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE COM MANTA ASFÁLTICA, UMA CAMADA, INCLUSIVE APLICAÇÃO DE PRIMER ASFÁLTICO, E=4MM. AF_09/2023	m ²	1,00	165,89	165,89
7253	SINAPI	TERRA VEGETAL (GRANEL)	m ³	0,10	267,85	26,79
C2862	SEINFRA	LASTRO DE BRITA	m ³	0,05	156,09	7,80
Custo Total						234,75

Fonte: Autor (2024).

Figura 9. Orçamento para 1 m² de telhamento em fibrocimento.

Planilha Orçamentária Sintética Com Valor do Material, Mão de Obra e Equipamento						
Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit. (R\$)	Total (R\$)
92543	SINAPI	TRAMA DE MADEIRA COMPOSTA POR TERÇAS PARA TELHADOS DE ATÉ 2 ÁGUAS PARA TELHA ONDULADA DE FIBROCIMENTO, METÁLICA, PLÁSTICA OU TERMOACÚSTICA, INCLUSO TRANSPORTE VERTICAL. AF_07/2019	m ²	1,00	16,05	16,05
94231	SINAPI	RUFO EM CHAPA DE AÇO GALVANIZADO NÚMERO 24, CORTE DE 25 CM, INCLUSO TRANSPORTE VERTICAL. AF_07/2019	m	0,30	51,75	15,53
94228	SINAPI	CALHA EM CHAPA DE AÇO GALVANIZADO NÚMERO 24, DESENVOLVIMENTO DE 50 CM, INCLUSO TRANSPORTE VERTICAL. AF_07/2019	m	0,10	80,96	8,10
94210	SINAPI	TELHAMENTO COM TELHA ONDULADA DE FIBROCIMENTO E = 6 MM, COM RECOBRIMENTO LATERAL DE 1 1/4 DE ONDA PARA TELHADO COM INCLINAÇÃO MÁXIMA DE 10°, COM ATÉ 2 ÁGUAS, INCLUSO IÇAMENTO. AF_07/2019	m ²	1,00	58,99	58,99
Custo Total						98,66

Fonte: Autor (2024).

A partir das composições de custos adotadas, verificou-se que o valor unitário de implantação do telhado verde é de R\$ 234,75/m², resultando em um custo total estimado de R\$ 5.101.501,81 para a conversão integral das coberturas do loteamento. Em contrapartida, o sistema convencional de telhamento em fibrocimento apresentou custo unitário de R\$ 98,66/m², totalizando R\$ 2.144.110,72, de modo que o custo inicial dos telhados verdes supera em mais que o dobro o valor previsto no projeto original. Resultados semelhantes foram observados por Borges et al. (2022), que identificaram custos de implantação de telhados verdes superiores aos de coberturas convencionais em

Teresina–PI, ainda que com diferenças nas composições orçamentárias adotadas.

A literatura aponta que a diversidade de metodologias e pressupostos utilizados nas análises de custo-benefício compromete a padronização das avaliações econômicas, dificultando comparações diretas e a tomada de decisão (Hekrlé et al., 2023), além de que muitos custos e benefícios associados aos telhados verdes dependem de fatores como clima, tipo de vegetação, manutenção e vida útil, podendo ser compensados ao longo do tempo (Manso et al., 2021). Estratégias como a escolha adequada de materiais, espécies vegetais e o gerenciamento eficiente da irrigação podem contribuir para a redução dos custos operacionais desses sistemas (Santos et al., 2024).

Apesar dos benefícios ambientais e urbanos associados aos telhados verdes, sua adoção em larga escala ainda é limitada por fatores econômicos e institucionais, o que reforça a necessidade de intervenção do poder público. Instrumentos como incentivos fiscais, financiamento e certificações ambientais têm sido apontados como fundamentais para viabilizar essas técnicas (Liberalesso et al., 2020; Canholi, 2005). Embora o Plano Diretor de Ordenamento Territorial de Teresina reconheça os telhados verdes como estratégia de sustentabilidade urbana, a abrangência dos incentivos ainda é restrita (Teresina, 2019). Assim, conclui-se que, apesar do elevado desempenho como técnica LID, a viabilidade econômica dos telhados verdes permanece condicionada à ampliação de políticas públicas integradas.

5.0 Considerações finais

Por meio da modelagem hidrológica no SWMM, o presente trabalho avaliou o impacto da implantação de telhados verdes em um loteamento residencial localizado em Teresina–PI, considerando diferentes intensidades de precipitação. Os resultados indicaram que a variação do tempo de retorno dos eventos de chuva não promoveu alterações significativas no comportamento relativo dos dispositivos LID, enquanto a proporção da área impermeável tratada e a duração da precipitação exerceram influência direta sobre a resposta hidrológica da microbacia.

No cenário com conversão total das áreas de cobertura, observaram-se reduções de até 35,94% no pico de vazão e 31,40% no volume de escoamento superficial. Já no cenário com conversão parcial (25%), as reduções atingiram 8,39% no pico de vazão e 7,78% no volume escoado. Sob a ótica hidrológica, esses resultados demonstram que os telhados verdes apresentam bom desempenho como técnica de controle na fonte,

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

contribuindo para a mitigação do escoamento superficial e para a redução da sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana.

Em contrapartida, a análise econômica evidenciou que os custos diretos de implantação dos telhados verdes ainda representam um entrave à sua adoção em larga escala. A partir das composições de serviços e insumos do SINAPI/PI e da Seinfra/CE, o custo unitário estimado para os telhados verdes foi de R\$ 234,75/m², valor superior a duas vezes o custo da cobertura convencional em telhas de fibrocimento (R\$ 98,66/m²). Esses resultados indicam que, quando analisada exclusivamente sob a ótica do investimento inicial, a viabilidade econômica dos telhados verdes permanece limitada no contexto regional.

Entretanto, os benefícios associados a essa técnica vão além do controle hidrológico, incluindo a mitigação das ilhas de calor urbanas, a promoção da biodiversidade, a valorização estética das edificações e o aumento da resiliência urbana, configurando-se como um diferencial em empreendimentos privados e uma estratégia relevante para o planejamento urbano sustentável.

Nesse contexto, a ampliação da viabilidade econômica dos telhados verdes depende da implementação de políticas públicas de incentivo, tais como benefícios fiscais, regulamentações urbanísticas específicas, certificações ambientais e mecanismos de compensação financeira, especialmente em cidades com elevada vulnerabilidade socioambiental, como Teresina. Embora o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do município reconheça a importância dessas soluções, a abrangência dos incentivos ainda é limitada, indicando a necessidade de avanços institucionais.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos foram plenamente alcançados, uma vez que o estudo forneceu evidências quantitativas consistentes sobre o desempenho hidrológico dos telhados verdes e permitiu discutir de forma crítica sua viabilidade econômica no contexto local. O trabalho contribuiu para o avanço do conhecimento aplicado à drenagem urbana sustentável em Teresina-PI, oferecendo subsídios técnicos para a incorporação de técnicas LID no planejamento urbano.

Como recomendações para pesquisas futuras, sugere-se a ampliação das análises em escala regional, contemplando diferentes tipologias de bacias urbanas, variações na duração das chuvas, avaliação do papel da evapotranspiração de distintas espécies vegetais e do substrato em períodos de estiagem, bem como a integração de múltiplas técnicas LID em nível de micro e macrodrenagem, visando avaliar de forma integrada os impactos hidrológicos e econômicos dessas soluções.

Referências

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems**. Water Environment Federation; American Society of Civil Engineers – ASCE, Reston, Virginia, USA, 1992.

<https://doi.org/10.1061/9780872628557>

BARBOSA, I. S. S.; DE SÁ, G. S.; SANTOS, L. P. R.; FREIRE, A. S.; SOUSA, M. C. B. **Avaliação do uso de telhados verdes através de modelagem computacional na sub-bacia P13 em Teresina-PI**. In: Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, 7., Porto Alegre, 2023. Anais [...]. Porto Alegre: UFRGS, 2023, p. 647–653.

BORGES, L. R. L.; MACEDO, F. R. C.; SOUSA, R. R. M.; COSTA, T. H. C. **Telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis: análise comparativa de benefícios e custos em comparação com telhados convencionais**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 4, p. 81–92, 2022.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPCÃO, 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. esp. 3, p. 94–108, 2019. <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S307>

HEKRLE, M.; LIBERALESSO, T.; MACHÁČ, J.; SILVA, C. M. **The economic value of green roofs: A case study using different cost–benefit analysis approaches**. Journal of Cleaner Production, v. 413, e137531, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137531>

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F. W.; LAAR, M.; GUSMÃO, F. **Water retention by greened roofs in temperate and tropical climate**. In: 38th IFLA World Congress. Singapore, 2001.

LIBERALESSO, T.; CRUZ, C. O.; SILVA, C. M.; MANSO, M. **Green infrastructure and public policies: an international review of green roofs and green walls incentives**. Land Use Policy, v. 96, e104693, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>

LIBERALESSO, T.; SILVA, C. M.; CRUZ, C. O. **Combined strategies for green roof incentive policies in Lisbon: evaluating the potentiality of concession grants and identifying priority intervention areas**. Urban Forestry & Urban Greening, v. 99, e128451, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128451>

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; FAÇANHA, A. C. **Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre planos e realidade**. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, e20190037, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180037>

IMPACTO DOS TELHADOS VERDES NA MITIGAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM LOTEAMENTOS RESIDENCIAIS DE TERESINA-PI

MANSO, M.; TEOTÓNIO, I.; SILVA, C. M.; CRUZ, C. O. **Green roof and green wall benefits and costs: a review of the quantitative evidence.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, e110111, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>

MARTINS, L. G. B. **Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas.** 2017. 197 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

PAITHANKAR, D. N.; TAJI, S. G. **Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model.** *Materials Today: Proceedings*, v. 32, part 4, p. 943–950, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.085>

PALLA, A.; GNECCO, I. **Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale.** *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 361–368, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>

PEDROSA, R. A. **Urbanização de baixo impacto: alternativa à drenagem urbana de Teresina, PI.** 2021. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal do Piauí, Teresina, 2021.

ROSSMAN, L. A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.* Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2015.

SANTOS, T. D. O.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S. **A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs.** *Science of the Total Environment*, n. 932, e173107, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173107>

SOUSA, M. C. B.; PEDROSA, R. A.; IWATA, B. F.; CHAVES, S. V. V. **Uso de telhados verdes para controle de águas pluviais urbanas em Teresina – Piauí.** *Revista de Geografia (Recife)*, v. 38, n. 2, 2021. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2021.246116>

TERESINA. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral.** Teresina, 2010.

TERESINA. **Plano Diretor de Ordenamento Territorial de Teresina.** Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. Teresina, 2019.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana.** *Ciência e Cultura*, v. 55, n. 4, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas.** Ministério das Cidades; Global Water Partnership; World Bank; UNESCO, 2005.

VERSINI, P. A.; RAMIER, D.; BERTHIER, E.; DE GOUVELLO, B. **Assessment of the hydrological impacts of green roof: from roof scale to basin scale.** *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 562–575, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020>