



Benefícios e limitações do uso de telhados verdes: uma revisão sistemática *Benefits and limitations of using green roofs: a systematic review*

Joyce Soares da Silva¹, Thais Tainan Santos da Silva¹, Elizabeth Amaral Pastich¹

¹Universidade Federal de Pernambuco-Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, Brasil

Contato: bethpastich@yahoo.com.br

Palavras-Chave
benefícios
ecossistema urbano
expansão urbana
infraestrutura Verde
tecnologia sustentável

RESUMO

Os telhados verdes apresentam-se como uma tecnologia de gestão e uma solução sustentável para enfrentar os efeitos adversos à urbanização, porém ainda existem lacunas do conhecimento a serem preenchidas para tornar a sua aplicação viável. Este estudo teve como objetivo realizar um levantamento dos principais artigos desenvolvidos sobre telhado verde, buscando evidenciar os principais benefícios e limitações da aplicação de telhados verdes como tecnologia sustentável. A metodologia utilizada foi a revisão sistemática, na qual foram avaliadas e coletadas publicações nacionais e internacionais para o embasamento da pesquisa. As plataformas usadas para as buscas foram Scielo e Web of Science, sendo aplicadas restrições de modo que o estudo se baseasse em artigos mais qualificados para o tema. Na revisão sistemática realizada neste trabalho, destacaram-se em termos quantitativos, os artigos publicados no continente asiático. Em relação às espécies vegetais utilizadas, as de maior uso foram as incluídas na família Poaceae e as suculentas da família Crassulaceae, no entanto, observou-se a necessidade de um maior aprofundamento sobre a fisiologia das plantas usadas nas pesquisas. Do ponto de vista do benefício ambiental, o sistema de telhados verdes apresenta capacidade de reduzir as necessidades de energia com a climatização de interiores, podendo ainda promover a redução da poluição do ar, muito embora seja uma área de estudo menos aplicada que a supracitada e contribuir para a drenagem urbana. O desempenho da tecnologia é influenciado pelo tipo de clima, vegetação utilizada e tipo de substrato. Assim, a tecnologia se torna mais viável quando atende às necessidades locais, de modo que os custos de implantação e manutenção sejam superados pelos seus benefícios. Do contrário, a sua aplicação torna-se limitada, especialmente em países que não dispõem de políticas públicas de apoio a projetos sustentáveis.

Key-word

benefits
urban ecosystem
urban expansion
green Infrastructure
sustainable technology

ABSTRACT

Green roofs present as a management technology and a sustainable solution to tackle the adverse effects of urbanisation, however there are still knowledge gaps to be filled in order to make their application feasible. This study aimed to carry out a survey of the main articles developed about green roofs, seeking to highlight the main benefits and limitations of the green roofs application as a sustainable technology. The methodology used was a systematic review, in which national and international publications were assessed and collected to support the research. The platforms used for the searches were Scielo and Web of Science, with restrictions applied so that the study would be based on articles more qualified for the topic. In the systematic review carried out in this work, the articles published on the Asian continent stood out in quantitative terms. In relation to the species plant used, the most applied were those included in the Poaceae family and the succulents of the Crassulaceae family. However, it was observed that there is a need for a deeper understanding of the plants used physiology. From the point of view of environmental benefits, the systems green roofs present the capacity to reduce energy used to cooling the temperature air indoor and can also promote the air pollution reduction, although it is an area of study less applied than the other one, and besides contribute to urban drainage. The technology performance is influenced by the climate type, vegetation used and type of substrate. Thus, the technology becomes more viable when it meets local needs, when the implementation and maintenance costs are outweighed by its benefits. Otherwise, the application becomes limited, especially in countries that do not have public policy support for sustainable projects.

Informações do artigo

Recebido: 18 de julho, 2022
Aceito: 27 de outubro, 2022
Publicado: 30 de dezembro, 2022

Introdução

Nas últimas décadas, a urbanização alterou drasticamente os ecossistemas em todo o mundo. Conforme Chen e Chen (2021), as cidades abrigam aproximadamente a metade da população mundial, demandando energia, água e recursos. A rápida urbanização tem resultado em diversos impactos ambientais como a má qualidade do ar, a perda de habitats naturais, a diminuição das áreas verdes e a redução da porcentagem de área de superfície permeável (HASHEMI; MAHMUD e ASHRAF, 2015). Além disso, as mudanças climáticas e eventos naturais extremos tem ocorrido com frequência e têm provocado uma sobrecarga nos sistemas de drenagem e inundações com danos econômicos e sociais (DONG; GUO e ZENG, 2017; CHEN; KANG e LIN, 2018).

Para melhorar a capacidade de resposta, observa-se a necessidade de uma abordagem integrada e uma visão mais holística da relação entre a conservação da natureza e urbanização (DEMUZERE et al., 2014). A Organização das Nações Unidas por exemplo, em seu plano de ação global, visa por meio do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável nº 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) tornar as cidades mais integradas e sustentáveis, incluindo a eficiência no uso dos recursos, a resiliência a desastres, bem como a mitigação e adaptação às mudanças climáticas (UNITED NATIONS, 2016).

É nesse contexto que as infraestruturas verdes se apresentam como uma ideia promissora para enfrentar os efeitos adversos à urbanização, sendo o seu uso uma solução sustentável e resiliente, assim como uma ferramenta de gestão e desenvolvimento urbano (SHARMA et al., 2018; VIECCO et al., 2021). Dentre as infraestruturas verdes, tem-se o telhado verde, também conhecido como telhado vivo, telhado frio (XU et al., 2012), cobertura vegetada (FIORETTI et al., 2010), cobertura viva ou ecotelhado (GETTER et al., 2009; FRANCIS e LORIMER, 2011). Conforme Shafique, Kim e Rafiq (2018), o sistema de telhado verde consiste na técnica usada em arquitetura que se refere a um telhado vivo plantado com diferentes tipos de vegetação em um meio de crescimento (substrato).

Os telhados verdes podem ser classificados, de modo geral, em duas formas: extensivo ou intensivo, a depender dos componentes que os constituem. O tipo extensivo corresponde ao sistema mais leve, com menor profundidade de solo e água, e plantas de pequeno porte, consequentemente, implantação e manutenção mais simples. Por outro lado, os telhados verdes intensivos utilizam grande profundidade de solo, maior retenção de água e plantas que apresentam maior crescimento e diversidade. Isso requer aumento na frequência de manutenção, mais consideração sobre a capacidade da estrutura do edifício para suportar o peso e altos custos de capital (BERARDI et al., 2014; SHAFIQUE; KIM e RAFIQ, 2018).

Os telhados verdes são inseridos nas coberturas de residências e edifícios e apresentam múltiplos benefícios sociais e ambientais, comparado às coberturas planas em meio urbano.

Pesquisas bem documentadas fornecem tais evidências, como: gestão das águas pluviais e redução do escoamento (SPEAK et al., 2013; GONG et al., 2019), melhora a qualidade do ar, da água e a qualidade de vida (BERNDTSSON, 2010; VIECCO et al., 2021), isolamento acústico e redução de ruído, potencial da agricultura urbana, prolongamento da vida útil dos materiais de cobertura, provisão de espaço estético e de lazer, melhorias na comercialização de imóveis, (MANSO et al., 2021), enriquecimento urbano, melhoria e preservação da biodiversidade (LI e YEUNG, 2014), economia de energia de aquecimento e refrigeração e redução da ilha de calor urbana (FIORETTI et al., 2010; CIRRINCIONE; MARVUGLIA e SCACCIANOCE, 2021).

Como resultado, diante dos benefícios citados, inúmeros países passaram a implementar a infraestrutura verde, principalmente com as crescentes preocupações climáticas. Tornou-se prática popular no gerenciamento de águas pluviais na construção de “cidades esponjas” na China, no projeto urbano sensível à água na Austrália e nos sistemas de drenagem urbana sustentável no Reino Unido (WANG et al., 2017). Todavia, segundo o estudo de Buffam et al. (2016), quando a água da chuva percola no solo do telhado verde, ela pode lixiviar nutrientes ou metais pesados ali presentes, o que se configura como uma limitação da técnica, sobretudo se almeja-se atividades de reúso.

Além disso, o telhado verde possui um alto valor inicial de implantação, além de manutenção, irrigação e de uma estrutura do telhado que seja projetada para a sobrecarga que o sistema vai exercer. Todos esses fatores representam gastos que podem desvencilhar a ideia de adotar a tecnologia como alternativa sustentável para mitigar os efeitos negativos da urbanização. Fatores estes que vem sendo abordados por autores como Teixeira et al. (2017), Peczkowski et al. (2020) e Koroxenidis e Theodosiou (2021).

Os telhados verdes têm representado grandes desafios e oportunidades de potencializar o seu uso, proporcionando maior crescimento na área de estudo. Neste sentido, o objetivo do trabalho foi realizar uma revisão sistemática para compreender as principais áreas de pesquisa sobre telhado verde, além de descrever aspectos como o uso do sistema, espécies utilizadas, viabilidade econômica e importância dada à qualidade da água nos estudos.

Material e Métodos

O presente estudo segue o uso da técnica de revisão sistemática de literatura. Os fundamentos por trás da adoção dessa abordagem se dão através de uma pergunta e identificação de estudos relevantes para o tema. A fim de minimizar vieses e garantir a replicabilidade futura, rigor e transparência são alcançados adotando processos fixos. O processo fixo é uma das características que distinguem a revisão sistemática de revisões de literatura tradicionais (MALLETT et al., 2012).

Conforme Mallett et al. (2012), as revisões sistemáticas geralmente incluem as seguintes etapas: primeiro é desenvolvida a questão da pesquisa, considerando a população, intervenção, resultados e

comparador. Em seguida são definidas estratégias de pesquisa, *strings*, critérios de inclusão e exclusão, com o objetivo de identificar os estudos em bancos de dados acadêmicos e sites institucionais. Nessa fase, todos os estudos encontrados são incluídos. Nas etapas seguintes, os estudos coletados são selecionados quanto à relevância do título, resumo e texto completo, usando processos de triagem. A fase final envolve a extração de dados quantitativos e/ou qualitativos relevantes, a fim de sintetizar as evidências.

Para realização da presente revisão sistemática sobre telhados verdes, foram detalhadas as seguintes etapas: desenvolvimento da questão para revisão sistemática; identificação e coleta dos estudos; avaliação da qualidade dos estudos e análise de dados.

Desenvolvimento da questão para revisão sistemática

Para início da revisão sistemática sobre telhados verdes, os problemas foram especificados por meio de uma pergunta que conduziu às questões sobre eficiência dos diferentes usos dos telhados verdes, aspectos econômicos envolvidos no sistema implantado e o quanto esse afeta os ecossistemas à jusante. Para o presente estudo, foi definida a seguinte questão norteadora:

“A implantação dos telhados verdes é eficiente na minimização dos efeitos negativos causados pela urbanização?”

Como resposta, os seguintes tópicos foram estruturados:

- Abrangência: viabilidade de implantação de área verde para mitigação dos impactos negativos da urbanização, como o aumento da temperatura e uma maior ocorrência de alagamentos devido à impermeabilização do solo;
- Intervenção: testar a eficiência dos telhados verdes diante desses problemas;
- Resultado: possibilidade dos altos custos e da insustentabilidade do uso de telhados verdes, além de gerar efluentes de qualidade a ser analisada.

Identificação e coleta dos estudos

A partir deste passo, alguns critérios claros e registráveis foram definidos para que a seleção dos estudos fosse relevante e capaz de ser reproduzida em trabalhos futuros.

Como critérios, foi escolhido fazer buscas na plataforma SciELO para os artigos nacionais, usando a palavra-chave “*green roof*”, para que todos os artigos sobre o tema aparecessem nos resultados das buscas, restringindo a pesquisa à Brasil. Para os artigos internacionais, a estratégia de busca fez uso de operadores booleanos e, para atender a questão norteadora, a combinação de palavras-chave foi elaborada para projetar a seguinte sequência de pesquisa: “*thermal comfort*” OR “*stormwater quality*” OR “*runoff water management*” AND “*green roof*” na plataforma de pesquisa *Web of*

Science (<http://isiknowledge.com/>). A plataforma foi adotada como base de dados por possuir abrangência e ter periódicos de notoriedade no ambiente acadêmico.

Em relação à abrangência temporal, foram considerados apenas artigos científicos publicados entre os anos 2013 e 2021, sendo selecionados apenas periódicos revisados por pares, escritos em inglês e português.

Sobre a pesquisa é importante destacar que, ao se usar o correspondente em português das palavras-chave usadas na busca dos artigos internacionais, ou seja, “telhado verde; conforto térmico; qualidade das águas pluviais; gestão de água de escoamento”, não foram encontrados artigos significantes à pesquisa, tendo sido necessária a mudança de critério entre as buscas nacionais e internacionais.

Avaliação da qualidade dos estudos

O passo seguinte foi analisar a classificação das revistas nas quais os artigos selecionados foram publicados. O presente estudo considerou apenas os artigos de revistas com Qualis A e B, conforme a tabela do Qualis Unificado, versão preliminar da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (<https://www.ufpe.br/documents/2999946/3681245/QUALIS+UNIFICADO.pdf>).

Segundo Schenck, Blaauw e Viljoen (2016), com o intuito de melhorar a filtragem dos artigos, foram formuladas questões como critérios de inclusão e exclusão da qualidade e adequação ao tema, associando pontuações aos artigos que atendem a solicitação feita na pergunta.

A Tabela 1 apresenta as questões onde foram definidos como “Q”, conforme apresentado a seguir.

Tabela 1. Questões restritivas sobre o tema

Questões
Q1: Os objetivos do artigo estão descritos claramente?
Q2: O uso de telhados verdes é citado?
Q3: É discutido sobre os principais usos dos telhados verdes?
Q4: A coleta e análise de dados são descritas?
Q5: As espécies utilizadas e o substrato são descritos no estudo?
Q6: Os resultados são descritos claramente?
Q7: O estudo faz análise sobre a viabilidade econômica do sistema?
Q8: As problemáticas do estudo são apresentadas?

Fonte: Autores (2022)

Para cada resposta positiva foi associado o número “1” e para as respostas negativas foi associado o número “0”. Para cada artigo foi calculada uma porcentagem, que consiste na soma de respostas positivas dividido pelo número de questões, sendo multiplicado por 100 para ser encontrado o valor da porcentagem. Os artigos com porcentagem entre 100% e 67% foram considerados “Bom”, os artigos entre 66% e 34% como “Satisfatório” e os artigos entre 33% e 0% como “Ruim”. Para esse estudo, foram considerados apenas os artigos classificados como “Bom”, a fim de obter conteúdo com maior qualidade e direcionado ao tema.

Como resultado à seleção de busca, ao processo de triagem e leitura dos resumos, foi possível selecionar 10 artigos nacionais e 22 internacionais considerados coerentes com a questão norteadora.

Análise de dados

Diante do esforço para mapear a produção científica sobre os usos de telhados verdes, a presente pesquisa utilizou do método analítico misto, incorporando uma análise bibliométrica e uma análise de conteúdo qualitativa para coletar informações dos documentos selecionados e estruturar em um período determinado de tempo, a evolução, características dos estudos, práticas, desafios e principais temas de pesquisa.

O método analítico misto tem sido amplamente utilizado para avaliar o progresso dos estudos científicos de vários fluxos de estudos. Segundo Zhang, Zhong e Geng (2019), a análise bibliométrica é uma abordagem sistêmica que analisa quantitativamente a literatura científica. Adicionalmente, uma análise de conteúdo qualitativa também foi realizada para identificar artigos com características semelhantes.

Os dados coletados foram organizados em planilhas eletrônicas no programa Microsoft Excel, sendo avaliados os pontos positivos e negativos. Com essas informações, foi possível propor recomendações futuras para os quesitos que necessitam de mais aprofundamento. A presente pesquisa teve o intuito de analisar os principais usos dos telhados verdes – redução de temperatura e economia de energia, redução de escoamento de água de chuva e qualidade da água –, suas vantagens e desvantagens.

Resultados e Discussões

Os parâmetros bibliométricos analisados no presente trabalho foram utilizados para apontar as

características gerais dos estudos selecionados e dos periódicos que foram publicados, a distribuição geográfica, a distribuição cronológica e os principais temas de pesquisa sobre telhados verdes identificados através da análise dos artigos centrais.

Características gerais dos estudos

A quantidade total de pesquisas selecionadas, considerando os estudos nacionais e internacionais, foi de 32 artigos. Esse total foi resultado das restrições impostas pela metodologia para que apenas estudos relevantes fossem usados para a análise. Conforme a Tabela 2, os artigos nacionais estão dispostos no ID 1 ao 10 e representam 31% do universo selecionado, enquanto 69% equivalem aos artigos internacionais, ID 11 ao 32.

Em relação ao reconhecimento dos estudos selecionados, os artigos internacionais se mostraram a frente dos nacionais a cerca do número de citações que eles ganharam até dezembro de 2021, destacando-se Norton et al. (2015) e Demuzere et al. (2014) com o número de citações de 418 e 356, respectivamente.

Norton et al. (2015) abordam métodos de mitigação do aquecimento devido ao desenvolvimento urbano, ao analisarem quatro tipos de infraestruturas urbanas verdes: espaços abertos verdes (principalmente parques públicos), árvores que projetam sombras densas, telhados verdes e sistemas verticais de esverdeamento (paredes e fachadas verdes), em um estudo de caso na Austrália. Corroborando ao artigo supracitado, Demuzere et al. (2014) destacaram diversas evidências existentes no uso do sistema de telhado verde.

Tabela 2. Síntese dos artigos nacionais e internacionais selecionados para a revisão sistemática

ID	Referência	Número de citação	Periódicos	Estrato
1	Santos et al. (2013)	31	Ambiente Construído	A3
2	Tassi et al. (2014)	42	Ambiente Construído	A3
3	Moruzzi, Moura e Barbassa (2014)	8	Ambiente Construído	A3
4	Carneiro et al. (2015)	11	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	B2
5	Teixeira et al. (2017)	10	Ambiente Construído	A3
6	Melo e Mendonça (2017)	0	Revista Ibracon de estruturas e materiais	A3
7	Omar et al. (2018)	17	Engenharia Agrícola	B2
8	Sampaio et al. (2018)	3	Engenharia Agrícola	B2
9	Feitosa (2019)	0	Saúde em Debate	B2
10	Arboit et al. (2021)	52	Revista Brasileira de Recursos Hídricos	A3
11	Demuzere et al., (2014)	356	Journal of Environmental Management	A1
12	Sproul et al. (2014)	179	Energy and Buildings	A1
13	Norton et al. (2015)	418	Landscape and Urban Planning	A1
14	Huang, Chen e Tsai, (2016)	14	Energy and Buildings	A1
15	Lim e Lu (2016)	67	Journal of Hydrology	A1
16	Bevilacqua et al. (2016)	110	Energy and Buildings	A1
17	Chen, Tung e Li (2017)	7	Water	A1
18	Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-Bailey (2017)	245	Journal of Environmental Management	A1
19	Wang et al. (2017)	4	Water	A1
20	Sangkakool et al. (2018)	24	Energy and Buildings	A1
21	Feng, Burian e Pardyjak (2018)	10	Water	A1
22	Movahhed et al. (2019)	3	Energy Procedia	A3
23	Gong et al. (2019)	24	Science of The Total Environment	A1
24	Palermo et al. (2019)	37	Water	A1
25	Talebi et al. (2019)	18	Ecological Engineering	A1
26	Gong et al. (2020)	6	Science of The Total Environment	A1
27	Rey et al. (2020)	57	Sustainability	A1
28	Peczowski et al. (2020)	2	Sustainability	A1
29	Cirincione, Marvuglia e Scaccianoce (2021)	101	Building and Environment	A1
30	Chen e Chen (2021)	49	Ecological Engineering	A1
31	Koroxenidis e Theodosiou (2021)	95	Journal of Cleaner Production	A1
32	Viecco et al. (2021)	60	Building and Environment	A1

Fonte: Autores (2022)

No entanto, o estudo tratou o tema de forma mais ampla evidenciando as principais aplicações do sistema, como: os benefícios biofísicos (captura de CO₂), benefícios térmicos, benefícios psicológicos e sociais para os indivíduos, redução de escoamento das águas pluviais e a melhoria da qualidade do ar e da água.

Quanto aos artigos nacionais, 20% deles não foram citados em outras pesquisas. Pode-se justificar a pouca ou a falta de citações, pelo fato do tema, telhados verdes no Brasil, ser um tema cuja notoriedade está em processo de desenvolvimento, muito embora tenha apresentado trabalhos pouco atuais de reconhecimento considerável, como Tassi et al. (2014) e Santos et al. (2013), citados 42 e 31 vezes, respectivamente.

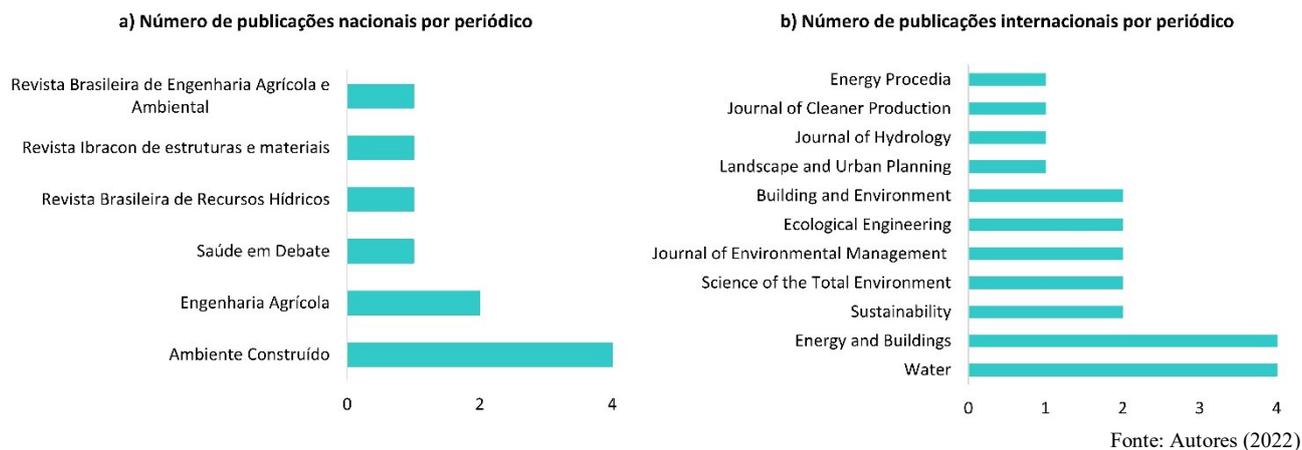
O estudo de Tassi et al. (2014) trata da gestão quantitativa do escoamento das águas pluviais, escoamento este que é atenuado com a alta taxa de impermeabilização do solo devido a urbanização crescente. Santos et al. (2013) destacam a importância da gestão de escoamento das águas pluviais, realizando uma simulação do uso do sistema para contenção da água da chuva e para mitigar consideravelmente o nível dos alagamentos no pico de cheia.

Uma pesquisa de experimento de campo de longo prazo, desenvolvida por Arboit et al. (2021), ocupa o primeiro lugar entre os artigos nacionais mais influentes e recentes (52 citações). De acordo com a Tabela 2, o trabalho avalia as taxas de evapotranspiração de módulos de telhado verde irrigado e não irrigado, reforçando a importância da vegetação como mecanismo para melhorar os benefícios do controle de águas pluviais.

Em relação aos periódicos onde foram publicados os artigos nacionais e internacionais, destaca-se que as nacionais apresentam uma boa qualidade acerca do tema, visto que 60% das revistas nacionais se enquadraram na classificação A3, seguidos de revistas B2 (30%), segundo critérios da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Aos artigos internacionais, 92% dos trabalhos se enquadram em periódicos excelentes (A1).

Os artigos selecionados para a presente pesquisa foram publicados em 17 periódicos, sendo 6 nacionais e 11 internacionais. Entre todos os 17 periódicos, 8 (47%) publicaram apenas um artigo. A Figura 1 mostra a quantidade de publicações por periódico.

Figura 1. Distribuição dos periódicos em função do número de artigos publicados. Número de publicações nacionais por periódico (imagem a) e número de publicações internacionais por periódico (imagem b)



Com base nos resultados das publicações nacionais, o periódico com a maior quantidade de publicações foi a Ambiente Construído, com 4 artigos publicados, seguido da revista Engenharia Agrícola, com 2 publicações. Em relação aos artigos internacionais, as duas revistas mais produtivas em termos de número de publicação correspondem a 8 (36%) artigos da pesquisa. Sendo elas, as revistas *Energy and Buildings* (4 publicações) e a *Water* (4 publicações).

Por outro lado, fazendo uma análise dos periódicos mais influentes em relação ao número de citações dos artigos publicados. Com base na Tabela 2 e Figura 1, observa-se que a revista nacional Ambiente Construído se mantém como periódico influente, já que detém 2 artigos com alto número de citações, Tassi et al. (2014) e Santos et al. (2013), 42 e 31 citações, respectivamente. A revista Brasileira de Recursos Hídricos, embora apresente apenas 1 artigo publicado, Arboit et al. (2021), este por sua vez apresenta 52 citações, maior número dentre os artigos nacionais.

Em relação aos periódicos internacionais, a *Energy and Buildings* apresenta artigos com número significativo de citações, Sproul et al. (2014) (179 citações) e Bevilacqua et al. (2016) (110 citações). Paralelamente, os periódicos: *Landscape and Urban Planning Journal* e *Journal of Environmental Management* atraem grande atenção dos pesquisadores na área da pesquisa de telhados verdes pelos maiores números de artigos citados, bem como o periódico *Building and Environment* que obteve apenas uma publicação, no entanto, apresentou um artigo recente com valor considerável de citações, Cirrincione, Marvuglia e Scaccianoce (2021).

Distribuição geográfica dos estudos

A Figura 2 apresenta os artigos publicados sobre telhados verdes no Brasil e no mundo. Ao analisar a posição geográfica dos estudos, observa-se que, a nível nacional, a maioria dos trabalhos se desenvolveram nas

regiões Nordeste e Sul do país (4 publicações). Ao analisar os trabalhos, percebe-se que independente da região estudada, a maioria dos estudos tratam sobre a gestão de escoamento. Isso porque muitos problemas persistentes no país estão vinculados ao crescimento rápido e não planejado das cidades, a alta taxa de impermeabilização do solo, aliado aos eventos chuvosos cada vez mais intensos.

Quanto aos artigos internacionais, a maioria dos estudos pertencem a Austrália, China, Itália e Taiwan, com 3 publicações por país. 50% desses países com maior número de publicação são asiáticos (China e Taiwan), o que reflete nos resultados das publicações por continente, onde a Ásia se sobressai com 33% das publicações, seguidos da Europa (29%), América (24%) e Oceania (14%).

No intervalo de tempo da presente pesquisa, o continente africano não apresentou publicações.

Além disso, os resultados descritos na Figura 2 indicam que os países asiáticos que apareceram na pesquisa estão em desenvolvimento, podendo significar que, como o Brasil, esses países estão em busca de novas alternativas para minorar os efeitos negativos do crescimento acelerado de suas cidades, como o aumento da temperatura e do escoamento superficial. Também é observado uma quantidade considerável de países desenvolvidos interessados no tema, como Austrália e Itália (3 publicações), Estados Unidos da América e Grécia (2 publicações).

Figura 2. Distribuição geográfica das publicações nacionais, por região e internacionais por país e continente



Fonte: Autores (2022)

Distribuição cronológica dos estudos

Com relação à quantidade de publicações por ano, foi considerado como intervalo de tempo os anos 2013 a 2021. Como pode ser visto na Figura 3.

Nacionalmente, o número de publicações oscilou ao longo dos anos, com destaque aos anos de 2016 e 2020 que não apresentaram publicações sobre o tema. Além disso, as publicações nacionais não se mantiveram em constante crescimento, mantendo-se entre uma a duas publicações por ano. Já as publicações internacionais apresentaram maior crescimento nos últimos anos, com destaque aos anos de 2019 e 2021 (4 publicações/ano). Em contrapartida, o ano de 2015 apresentou o menor resultado (1 publicação/ano) e não houve publicações em 2013.

No que se refere a distribuição cronológica dos estudos de modo geral (nacional e internacional), pode-se afirmar que a quantidade de publicações se tornou mais recorrente nos últimos anos, sendo 2017 a 2021, o intervalo de tempo com maior número de publicações sobre telhados verdes (4 a 5 publicações/ano), exceto 2020 (3 publicações), Figura 3.

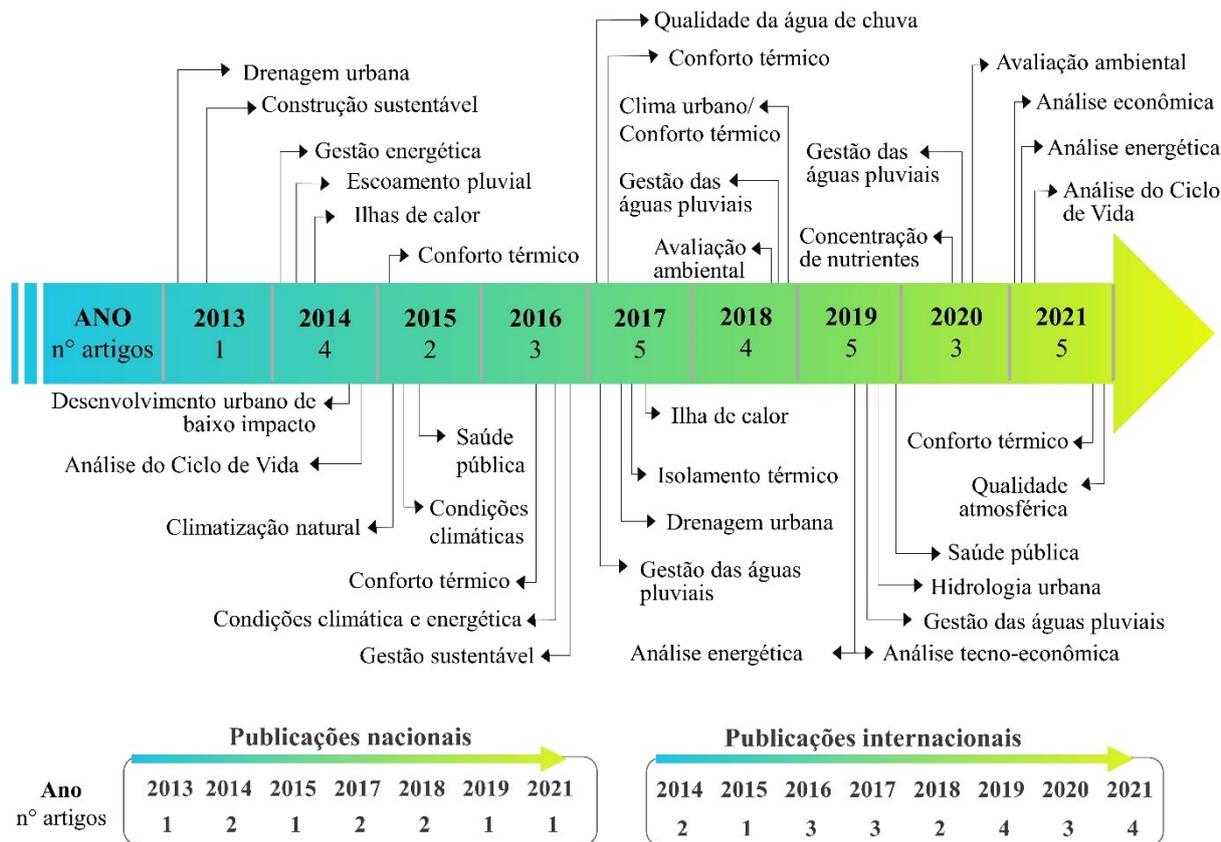
Em relação à evolução dos tópicos de pesquisa, conforme ilustrado na linha do tempo da Figura 3, considera-se como principais tópicos dentro do tema telhados verdes: conforto térmico, condições climáticas e

gestão das águas pluviais, sendo frequentemente focos das pesquisas entre os anos de 2013 a 2021. Já os tópicos de pesquisa: saúde pública (2015, 2019), ilhas de calor (2014, 2017) e análise do ciclo de vida (2014, 2021) se apresentaram de forma pontual entre as publicações nacionais e internacionais, no entanto complementares aos tópicos principais.

Adicionalmente, os tópicos análise técnica, econômica, energética e ambiental vem atraindo atenção dos pesquisadores nos últimos anos, uma vez que passaram a ser foco das pesquisas entre os anos de 2018 a 2021. Com base na linha do tempo, o fato desses tópicos estarem presentes nas pesquisas mais recentes se deve ao conceito, desenvolvimento sustentável, voltar a ser discutido atualmente, sendo incorporados nas pesquisas ao avaliar o uso de telhados verdes como uma alternativa capaz de coexistir e interagir com os pilares social, econômico e ambiental, além da possibilidade de promover bem-estar local.

Desse modo, o tópico a seguir apresenta os tipos de espécies de plantas citadas nos estudos, os principais usos do sistema de telhados verdes, bem como os diversos benefícios avaliados pelas pesquisas no âmbito do conforto térmico, redução da poluição do ar, escoamento das águas pluviais e melhoria da qualidade da água.

Figura 2. Linha do tempo dos principais tópicos de pesquisa sobre telhados verdes e o número de publicações geral, nacional e internacional por ano



Fonte: Autores (2022)

Espécies citadas nos estudos

Espécie de planta utilizada no sistema de telhados verdes tem grande influência no seu desempenho em todos os seus possíveis usos. A vegetação afeta a gestão da água da chuva, pois se deve dar preferência a espécies que tenham alta capacidade de absorção de água e que tenha alta taxa de evapotranspiração, para transferir a água para a atmosfera e evitar que esta sobrecarregue os sistemas urbanos de drenagem.

Além disso, o tipo de planta escolhido também afeta o conforto térmico, visto que espécies com folhas maiores e crescimento com direcionamento mais horizontal representam um melhor sombreamento do telhado e, por consequência, temperaturas mais baixas do teto e do ambiente interno do local. Para qualidade da água, o tipo de planta escolhido influencia o tipo e a quantidade de nutrientes que será lixiviado do telhado verde, afetando a utilização da água oriunda do sistema. Deve ser dada prioridade às espécies que se adaptem ao clima do local onde são plantadas, desse modo a planta reage com menos intensidade e absorve os poluentes com mais facilidade, como o dióxido de carbono.

Conforme a Tabela 3, dentre as espécies citadas nos trabalhos, destaca-se as que se enquadram na família Poaceae, também conhecidas como gramas ou capins, e as suculentas que fazem parte da família Crassulaceae, sendo citadas tanto pelos artigos nacionais como internacionais. Aos artigos nacionais, destaca-se a espécie *Zoysia Japonica*, utilizada em dois estudos, Carneiro et al. (2015) e Teixeira et al. (2017).

A *Zoysia Japonica* é um tipo de grama, sendo uma das plantas mais recomendadas nos estudos.

O estudo de Carneiro et al. (2015) mostrou o uso da espécie em conjunto com a *Arachis repens*, em um experimento onde foi comparada a temperatura de ambientes com telhados verdes usando as duas espécies e telhado de fibrocimento e telha reciclada. Os resultados mostraram que o sistema apresentou uma redução de temperatura em comparação com os telhados de fibrocimento e telha reciclada.

Apesar disso, o telhado verde com a espécie *Arachis repens* apresentou uma redução maior que o telhado com a *Zoysia Japonica*, onde houve reduções de 5,3°C e 4,4°C, respectivamente. Ainda assim, a espécie obteve um bom desempenho, visto que a diferença de temperatura não foi considerável.

Quanto ao restante das espécies, os artigos nacionais apenas as citam como uso, mas nenhum artigo explica especificamente em seus resultados a atuação da vegetação, apenas o desempenho do sistema como um todo.

Em relação aos estudos internacionais, ressalta o uso de diversas espécies de suculentas, família Crassulaceae, citadas nos artigos mais recentes como Gong et al. (2020), Peczkowski et al. (2020), Rey et al. (2020) e Viecco et al. (2021).

As suculentas são plantas que tem uma boa capacidade de contenção de água, além de resistir por longos períodos sem irrigação, o que justifica as sugestões dos artigos.

Vale destacar, que os artigos em estudo reforçam a importância do uso de espécies nativas no desempenho do sistema, por estarem adaptadas ao clima onde estão inseridas, evitam que sejam necessários gastos maiores com irrigação, fertilização ou até problemas com crescimento exagerado de raízes, que podem danificar a estrutura do telhado.

Segundo Rey et al. (2020), a espécie de suculenta *Echeveria ballsii* teve o melhor desempenho, manteve uma boa aparência e cresceu significativamente sob as

condições do substrato. No entanto, foi recomendado estender a avaliação conjunta de substratos e espécies nativas, a fim de alcançar um melhor entendimento do estabelecimento das plantas e garantir que a melhoria da qualidade da água e a retenção de águas pluviais permaneçam ao longo do tempo. Além disso, os autores concluíram que as espécies *Paepalanthus alpinus* e *Echeveria ballsii* são potencialmente adequadas para telhados verdes em Bogotá (Colômbia) e em condições climáticas de montanha neotropical.

Tabela 3. Espécies de plantas utilizadas nos sistemas de telhados verdes das publicações nacionais e internacionais

Família Espécie	Publicações nacionais	Publicações internacionais
Acoraceae <i>Acorus calamus</i>	-	Huang, Chen e Tsai (2016)
Aizoaceae <i>Carpobrotus edulis</i> , <i>Aptenia cordifolia</i>	-	Bevilacqua et al. (2016), Palermo et al. (2019), Wang et al. (2017)
Amaranthaceae <i>Halimione portulacoides</i>	-	Cirrincione, Marvuglia e Scaccianoce (2021)
Asparagaceae <i>Chlorophytum comosum</i> , <i>Asparagus densiflorus</i>	Tassi et al. (2014)	-
Asteraceae <i>Achyrocline bogotensis</i>	-	Rey et al. (2020)
Cactaceae <i>Melocactus macrodiscus</i>	Santos et al. (2013)	-
Caryophyllaceae <i>Cerastium tomentosum</i> , <i>Dianthus grantianopolitanus</i>	-	Bevilacqua et al. (2016), Palermo et al. (2019)
Crassulaceae <i>Sedum rupestre</i> , <i>Spurium</i> , <i>Sexangulare</i> , <i>Telephium</i> , <i>Floriferum</i> , <i>Album</i> , <i>Lineare thunb</i> , <i>Echeveria ssp</i> , <i>Kalanchoe blossfeldiana</i>	Arboit et al. (2021), Tassi et al. (2014)	Gong et al. (2020), Peczkowski et al. (2020), Rey et al. (2020), Viecco et al. (2021)
Commelinaceae <i>Callisia repens</i>	Moruzzi, Moura e Barbassa (2014)	-
Davalliaceae <i>Nephrolepis exaltata</i>	-	Huang, Chen e Tsai (2016)
Eriocaulaceae <i>Paepalanthus alpinus</i>	-	Rey et al. (2020)
Fabaceae <i>Arachis repens</i> , <i>Genista Lydia</i> ,	Carneiro et al. (2015)	Feng, Burian e Pardyjak (2018)
Lamiaceae <i>Plectranthus barbatus</i> , <i>Mentha crispa</i> , <i>Perovskia atriplicifolia</i>	Melo e Mendonça (2017), Tassi et al. (2014)	Feng, Burian e Pardyjak (2018)
Nyctaginaceae <i>Bougainvillea</i>	-	Lim e Lu (2016)
Poaceae <i>Zoysia japonica</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Stipa gigantea</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , (<i>bouteloua gracilis</i>), <i>Arundo donax var. versicolor</i>)	Carneiro et al. (2015), Demuzere et al., (2014), Sampaio et al. (2018), Santos et al. (2013), Teixeira et al. (2017)	Feng, Burian e Pardyjak (2018), Lim e Lu (2016)
Portulacaceae <i>Armeria marítima</i> , <i>Portulaca grandiflora</i>	-	Talebi et al. (2019)
Não especificado	Feitosa (2019), Omar et al. (2018)	Chen, Tung e Li (2017), Chen e Chen (2021), Gong et al. (2019), Koroxenidis e Theodosiou (2021), Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-Bailey (2017), Movahhed et al. (2019), Norton et al. (2015), Sangkakool et al. (2018), Sproul et al. (2014)

Usos do sistema de telhados verdes: benefícios e desafios

A escolha de como o telhado verde será usado depende da necessidade do local e a sua efetividade depende da adaptação do sistema, visto que esta precisa de manutenção por se tratar de organismos vegetais que necessitam de água, sol e um solo adequado para se manter saudável e cumprir o seu objetivo. Dentre os diversos usos dos telhados verdes, o conforto térmico, eficiência energética, redução da poluição do ar, gestão de

escoamento das águas pluviais e a melhoria da qualidade da água, foram os mais proeminentes nos estudos analisados na presente pesquisa, sendo detalhadamente analisados a seguir, em função das pesquisas nacionais e internacionais, Figura 4.

O conforto térmico se dá por meio do controle da variação de temperatura no ambiente, podendo ser aplicado tanto para climas frios quanto climas quentes, nos quais se apresenta mais significativamente. Sampaio et al. (2018), ao analisar índices de conforto térmico em protótipos e modelos reduzidos, observaram que janeiro

foi o mês que apresentou as piores condições de calor, enquanto junho e julho apresentaram as piores condições de frio. Segundo Melo e Mendonça (2017), esse controle é possível pois o telhado verde é um isolante térmico com uma transmitância térmica menor que os telhados convencionais. Não só isso, mas também a espessura do substrato e o tamanho das folhas influenciam no funcionamento do sistema (DEL BARRIO, 1998).

Vale destacar que o uso de telhados verdes para mitigar as mudanças nas condições climáticas, especificadamente ao fenômeno ilha de calor urbano, é mais indicado em combinação com outras técnicas de mitigação, sendo importante maior desenvolvimento para torná-las relevantes para vários climas e ao longo do ano (MOHAJERANI; BAKARIC E JEFFREY-BAILEY, 2017).

Do mesmo modo, os telhados verdes apresentam a capacidade de reduzir as necessidades de energia para a climatização dos edifícios. A eficiência energética oferecida pelos telhados verdes, se torna ainda mais importante considerando os eventos recentes (pandemia de Covid-19) que levaram um grande número de pessoas a passar muito mais tempo dentro de suas residências e consumir mais energia.

Adicionalmente, o sistema de telhados verdes também proporciona a redução da poluição do ar. Segundo Bevilacqua et al. (2016), a redução da poluição do ar por meio dos telhados verdes acontece pois o sistema retira o dióxido de carbono da atmosfera, este lançado por veículos ao queimar combustível e outras fontes poluidoras. Isso representa uma melhora na qualidade de vida da população local, tanto socialmente quanto na saúde física e mental, ao promover bem-estar.

Em relação à redução do escoamento superficial, Tassi et al. (2014), explicam que a vegetação, o substrato e a camada de drenagem do sistema servem como armazenadores da água da chuva, impedindo, ao menos temporariamente, que sobrecarregue os seus receptores na rede de águas pluviais. A vegetação retém parte da chuva, evitando que esta siga para o solo, e realiza o processo de evapotranspiração, perdendo água para a atmosfera.

Ainda segundo Tassi et al. (2014), o solo do substrato também armazena a água que não fica retida na vegetação, sendo elemento suporte capaz de conter os elementos necessários para manter a planta viva, fornecendo água e nutrientes. Porém, ele perde sua função de contenção quando está saturado, por isso a situação do substrato antes do evento chuvoso é de grande importância. O tipo de telhado verde também tem influência, visto que o telhado intensivo apresenta uma camada de substrato mais espessa, capaz de conter a água da chuva por mais tempo que o telhado extensivo, embora represente maior sobrecarga na estrutura de suporte. Já a camada de drenagem tem como função principal impedir alagamentos indesejáveis e excesso de água na plantação, considerando que a estrutura dos telhados é praticamente horizontal. Além disso, retém a chuva evitando que esta escoe e utiliza como fonte de água para a vegetação em tempos de estiagem.

Com relação à qualidade da água, Teixeira et al. (2017), afirmam que pode tanto melhorar quanto piorar, a depender de vários fatores, como: tipo de telhado (extensivo ou intensivo), tipo de substrato, vegetação, se é

feito uso de fertilizantes e com que frequência. Pois, o telhado pode liberar nutrientes, metais pesados e alterar a cor da água que sai do sistema. Por outro lado, o telhado verde pode servir como filtro para partículas que por ventura se encontrem na água da chuva, melhorando sua qualidade.

Uso do sistema nos estudos nacionais

Na Figura 4 a seguir, podem ser vistos os tipos de uso escolhidos nos estudos nacionais utilizados neste trabalho (imagem a), destacando-se o uso dos telhados verdes para conforto térmico, que representa 50% das pesquisas.

De acordo com Melo e Mendonça (2017), na sua pesquisa sobre a contribuição para isolamento térmico do Etileno Acetato de Vinila (EVA) como produto interno de blocos cimentícios para telhados verdes, foi constatado que o sistema apresentou até 2°C abaixo da temperatura dos telhados convencionais nas mesmas condições climáticas a que foram submetidos os protótipos. Além disso, os telhados apresentam temperatura mais baixa no teto e ambiente interno, caracterizando uma menor amplitude térmica. Com o objetivo de analisar o balanço de energia entre telhados vegetados e não vegetados, Omar et al. (2018) compararam os telhados em relação as alterações micrometeorológicas e seus efeitos no balanço energético por meio de um modelo de simulação calculado em função da evapotranspiração de referência. Os autores identificaram e quantificaram modificações nos elementos micrometeorológicos com consequente alteração no balanço energético, tendo o telhado vegetado o fluxo de calor sensível 69% menor que o observado para a laje (telhado não vegetado) e 55% maior para o fluxo de calor latente.

Feitosa (2019), ao avaliar a atenuação do estresse térmico entre protótipos idênticos de duas habitações, sendo apenas uma com telhado e paredes vegetadas, percebeu melhorias nos parâmetros das condições de salubridade ambiental e minimização de riscos associados à saúde na habitação que apresentava a infraestrutura verde. O autor também destaca que os Índices de Calor máximos registrados nos protótipos não vegetado e vegetado foram 57,5°C e 49,2°C respectivamente.

Quanto ao escoamento superficial, o trabalho de Santos et al. (2013) destacou que os telhados verdes apresentaram uma melhor capacidade de contenção de água de chuva em comparação com os telhados convencionais, compostos por telhas cerâmicas. Entretanto, o telhado verde apresentou melhor comportamento para chuvas de menos intensidade. Em um evento chuvoso com intensidade igual a 42 mm/h, o sistema absorveu cerca de 30% da precipitação, enquanto que em chuvas de maior intensidade, 79 mm/h, o sistema absorveu por volta de 15% da precipitação.

Arboit et al. (2021) também focaram no escoamento superficial, porém direcionando o estudo na análise de evapotranspiração das vegetações, especificadamente a espécie *Sedum Rupestre*. Foi realizado uma pesquisa de campo de longo prazo para avaliar as taxas de evapotranspiração de módulos de telhado verde. Como resultado, a análise de longo prazo

mostrou que 47% do total de chuvas foi convertido em escoamento superficial, 21% ficou retido nos módulos do telhado verde e 32% foi liberado por evapotranspiração, reforçando a importância da vegetação como mecanismo para melhorar os benefícios do controle de águas pluviais.

Moruzzi, Moura e Barbassa (2014), por meio de estudos experimentais com telhados verdes extensivos em

escala piloto, constataram que a inclinação e a umidade antecedente do solo são decisivas tanto na redução do escoamento gerado quanto no transporte de material do telhado para o sistema de drenagem e ou aproveitamento subsequente.

Figura 4. Usos do sistema de telhados verdes pelos estudos nacionais (a) e internacionais (b)



Uso do sistema nos estudos internacionais

Em relação aos artigos internacionais, a Figura 4 mostra a prevalência dos estudos sobre gestão de escoamento pluvial (7 artigos) e conforto térmico (5 artigos). Pode-se perceber pela Figura 4 que, além dos usos de maior relevância, citados anteriormente, outros trabalhos focaram nos usos de telhados verdes para melhoria na qualidade do ar (2 artigos) e na eficiência energética (2 artigos). Outros estudos destacam alguns desafios nos usos do sistema, como viabilidade econômica e/ou ambiental (4 artigos) e a qualidade das águas pluviais (2 artigos).

Quanto ao uso do telhado verde para redução do volume de escoamento pluvial, estudos como Chen e Chen (2021) e Talebi et al. (2019) avaliaram o desempenho de retenção de telhados verdes diante de condições adversas. Chen e Chen (2021), avaliaram a eficiência dos telhados verdes durante eventos de chuva com intensidades diferentes. Os jardins de telhado verde foram considerados mais eficientes na redução do volume de escoamento diante de chuvas de alta densidade e de curta duração, enquanto durante eventos de chuva de alta densidade de longo prazo, eles foram considerados mais eficientes na redução da duração do pico de escoamento (~ 20min) em comparação com superfícies de concreto.

Talebi et al. (2019) avaliaram o uso de telhados verdes em condições variáveis de clima, substratos e vegetação. Os resultados revelaram que o tipo de vegetação teve um impacto maior no desempenho de retenção de água dos telhados verdes do que a capacidade de armazenamento de substrato associados a diferentes profundidades, porosidade e ponto de murcha do substrato ao longo do intervalo assumido no estudo (simulação de 2000 a 2006). Gong et al. (2019), ao avaliarem os telhados verdes em eventos de única chuva e monitoramento de longo prazo, notaram, nas duas situações, que à medida que a escala do módulo e a espessura do substrato

aumentavam, a capacidade de retenção aumentava; à medida que a escala do módulo aumentava, a taxa de redução de fluxo de pico (TRFP) dos módulos de telhados verdes aumentava e a espessura do substrato parecia ter menos efeito sobre o TRFP.

Por outro lado, Palermo et al. (2019) consideraram diferentes valores de profundidade do solo (6 cm, 9 cm, 12 cm e 15 cm) por seis meses sob condições climáticas mediterrâneas. Os resultados mostraram como o substrato específico do solo foi capaz de atingir uma redução de volume de escoamento variando de 22% a 24%, aumentando a profundidade do solo.

Sobre o conforto térmico, Wang et al. (2017), em um estudo sobre a capacidade de um telhado verde extensivo sobreviver apenas com irrigação por longos períodos de estiagem em uma região árida na China, constataram que o sistema é uma ótima alternativa, caso sejam usadas plantas adequadas para esse tipo de clima. Os resultados mostraram que o telhado foi efetivo no controle da variação de temperatura interna do local onde estavam sendo feitos os testes, com a temperatura ultrapassando os 35°C.

O uso de telhados verdes hidropônicos é uma alternativa apresentada por Huang, Chen e Tsai (2016), em seu estudo que compara a eficiência de telhados verdes extensivos e telhados verdes hidropônicos, que consistem em vasos de plásticos que flutuam em um substrato de água, ao invés de solo. Constatou-se, então, que os telhados verdes hidropônicos reduziram entre 12°C e 23°C da temperatura do telhado, além de reduzir em 70% a amplitude térmica. Apesar disso, os resultados mostraram que o telhado verde extensivo mostrou uma maior redução de temperatura e de amplitude térmica em comparação com o hidropônico, que, por sua vez, apresenta uma melhor capacidade de contenção de água de chuva.

O estudo de Cirrincione, Marvuglia e Scaccianoce (2021) observou a variação do potencial econômico energético dos telhados verdes em cenários diferentes

(dois ambientes urbanos europeus caracterizados por condições climáticas muito diferentes, Esch-sur-Alzette no Luxemburgo e Palermo na Itália). Os autores realizaram uma simulação ao longo de 60 anos (2020, 2050, 2080) considerando alterações climáticas e crescimento demográfico ao longo do tempo. Foi observado que os telhados verdes permitiram economias de energia significativas (variando de 20% a 50% para Esch-sur-Alzette e de 3% a 15% para Palermo).

Numa abordagem analítica abrangente, Movahhed et al. (2019), investigaram o efeito da aplicação do telhado verde junto com painéis solares fotovoltaicos para a eficiência energética de um edifício típico. Para isso, foi utilizado vegetações que incluíam gramas, arbustos e três painéis solares comerciais. Como resultado, a redução do consumo de energia na presença de telhado verde foi cerca de 0,1%. Além disso, a redução máxima das emissões de dióxido de carbono foi de 16,31 toneladas anuais.

Em relação aos estudos sobre qualidade do ar, apenas dois artigos, Viecco et al. (2021) e Demuzere et al. (2014), direcionaram a pesquisa para esta área de estudo. O potencial dos telhados verdes para aliviar a poluição do ar ainda não é totalmente explorado, o que justifica as poucas publicações na área. De uma forma mais ampla, Demuzere et al. (2014) abordaram sobre as aplicações do uso de telhados verdes. Em relação à qualidade do ar, os autores destacaram a importância do uso do sistema no benefício biofísico (captura de CO₂), mas ressaltam que ainda faltam dados robustos sobre o potencial do sequestro de CO₂ por meio de espaços verdes não convencionais, como telhados verdes e fachadas verdes.

Viecco et al. (2021) investigaram diferentes layouts de telhados e paredes verdes para avaliar a eficiência na captura de material particulado (PM_{2,5}) em um bairro urbano de Santiago, Chile. Os autores observaram que a melhoria da qualidade do ar pelas infraestruturas verdes depende da altura das edificações, infraestrutura urbana do entorno, cobertura vegetal e proximidade da fonte poluidora. Além disso, destacaram que para diminuir as concentrações de PM_{2,5} através do uso de telhados verdes, deve ser dada prioridade à instalação dos mesmos em edifícios com altura inferior a 10 m. Para as paredes verdes, a redução de PM_{2,5} é favorável em todos os casos estudados.

Qualidade da água pluvial nos estudos

A qualidade da água lixiviada dos telhados verdes pode ser um entrave diante do efeito da água nos ecossistemas à jusante ou quanto a sua reutilização. No universo de artigos selecionados, pode-se notar que apenas três deles mostraram interesse no assunto (1 nacional e 2 internacionais).

O estudo nacional feito por Teixeira et al. (2017), compara a qualidade da água de telhados verdes e telhas de concreto para usos não-potáveis. Para tanto, foi utilizado terra comum para jardinagem como substrato e a espécie de grama *Zoysia japonica* como vegetação. Foram analisados os parâmetros: oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio (em forma de nitrato, nitrito e amônia), fósforo, Demanda Química de Oxigênio (DQO), além de pH, turbidez, temperatura, coliformes totais e coliformes

termotolerantes. Não foi citada no estudo a análise da presença de metais pesados na água. Por fim, o artigo conclui que o telhado de concreto apresentou melhor desempenho que o telhado verde com relação aos parâmetros (menos pH, que obteve melhores resultados no telhado verde), mas que ambas as amostras dos telhados não atendem à NBR 15527 (ABNT, 2007) para o aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis. Apesar disso, é dada a opção de instalar um sistema de desinfecção para que seja possível a utilização dessa água sem riscos aos usuários.

Quanto ao artigo internacional Peczkowski et al. (2020), o estudo analisou o escoamento e a qualidade da água de sistemas de telhados verdes na Baixa Silésia (Polônia). A qualidade da água do estudo foi estimada em função das condições da deposição atmosférica anual, levando em consideração os indicadores como condutividade eletrolítica; o teor de N, NO₃, NO₂, NH₄, P, PO₄, além dos teores de metal como: Cu, Zn, Pb e Cd. Como resultados, foi observado que a carga de nitrogênio total tinha ultrapassado os valores de concentração na água da chuva e, no caso do teor de metal, as concentrações de cobre e zinco apresentaram valores significativamente maiores nas superfícies verdes em relação à precipitação. Já o estudo feito em Pequim por Gong et al. (2020) explorou os fatores que afetam a capacidade dos telhados verdes de reduzir os nutrientes no escoamento das chuvas, em nove tipos de telhados verdes extensivos. Os autores chegaram a resultados cujo telhados verdes extensivos apresentaram maiores concentrações de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-NH₄⁺) e nitrogênio nitrato (N-NO₃⁻) do que os telhados tradicionais de concreto, mas com concentrações de fósforo (TP) semelhantes.

É possível ressaltar que, apesar do termo qualidade da água de chuva fazer parte dos tópicos de pesquisa, dos grupos de palavras chaves de determinados artigos do presente trabalho, além de representar uma possível fonte de poluentes para os ecossistemas à jusante, o retorno dos estudos sobre o assunto não se apresenta de forma considerável. Muito embora, seja um aspecto importante e necessário a ser estudado, ao considerar os diversos fatores que podem influenciar na qualidade da água que passa pelo telhado verde.

No artigo de revisão de Hashemi, Mahmud e Ashraf (2015), também foi observado o desafio no uso do telhado verde, quanto à qualidade da água. Segundo os autores, a qualidade da água pode ser melhorada, mas depende de vários fatores, como tipo de material usado no solo do substrato, sua espessura, a vegetação escolhida, uso de fertilizantes e a frequência do uso, eventos chuvosos e fontes de poluição próximas. Na revisão feita por Shafique, Kim e Rafiq (2018) é explicado que solos com menos matéria orgânica em sua composição resulta em uma melhor qualidade da água. E também conclui com a informação de que a melhoria da qualidade varia do modo como o telhado verde é construído e mantido.

Viabilidade econômica

Além da qualidade da água oriunda dos telhados verdes ser uma das problemáticas para aplicação do sistema, a viabilidade econômica também é um dos fatores que afetam a sua implantação. O telhado verde possui um

valor inicial de implantação, considerando o investimento nos substratos, vegetação e na estabilidade da estrutura de suporte do telhado. Além disso, apresenta gastos com a manutenção e irrigação.

A viabilidade econômica do sistema foi tópico de pesquisa de 4 artigos internacionais. Os trabalhos de Sproul et al. (2014), Feng, Burian e Pardyjak (2018), Chen, Tung e Li (2017) e Koroxenidis e Theodosiou (2021) apresentaram a importância da análise econômica dos telhados verdes, sendo um fator que pode definir a possibilidade de implantação do sistema.

Ao comparar algumas infraestruturas verdes e aplicar um método de desenvolvimento de baixo impacto, a fim de permitir a tomada de decisão, Chen, Tung e Li (2017) identificaram que os telhados verdes apareceram com maior frequência nas melhores soluções para minimizar as inundações pluviais, já que o atraso do escoamento para telhados verdes seja significativamente maior do que para pavimentos permeáveis. Além disso, embora os barris/cisternas de chuva possam efetivamente armazenar águas pluviais, o custo desta tecnologia demonstrou ser significativamente maior do que telhados verdes e pavimentos permeáveis para o mesmo efeito na redução de inundações.

Sproul et al. (2014) ao analisar o custo médio de instalação de projetos de telhado verde nos Estados Unidos, consideraram que o custo para substituir um telhado verde extensivo no final de sua vida útil é de aproximadamente 1/3 do custo inicial de instalação, já que a maioria dos componentes do sistema de telhado verde, como o meio de crescimento, vegetação e etc. podem ser recuperados. Os autores também ressaltam que os telhados verdes são menos econômicos quando comparados aos telhados pretos e brancos, todavia os custos adicionais de implantação são completamente compensados pela economia total adquirida. Ambas as opções de sistemas são ótimas alternativas sustentáveis para promover o bem-estar local e os telhados verdes se mostram mais efetivos quando, além do conforto térmico, a necessidade do local é contenção de água de chuva para reduzir alagamentos.

Portanto, a escolha entre um telhado branco (pintura) e um verde (vegetação) deve basear-se na preferência do proprietário do edifício, sendo a prioridade não só econômica, como também estética e ambiental, Sproul et al. (2014).

Ao ser analisada a evapotranspiração de um telhado verde que usa irrigação em um clima com chuvas escassas, Feng, Burian e Pardyjak (2018), constataram que o custo anual com irrigação se mostrou maior que a economia devido à redução do impacto causado pela água da chuva. O restante dos gastos com irrigação precisa ser compensado pelos outros benefícios que o sistema pode proporcionar.

Paralelamente, Koroxenidis e Theodosiou (2021) realizaram uma análise comparativa do ciclo de vida ambiental e econômico entre telhados verdes e planos sob condições de clima mediterrâneo. Como resultado, o estudo apresentou o potencial das coberturas verdes não apenas na melhoria da eficiência energéticas dos edifícios, como também na redução das emissões dos gases de efeito estufa e no desperdício de material. Os autores afirmam que, em termos de pegada ambiental, os telhados verdes são superiores aos planos, todavia essa superioridade é

questionada quando a disponibilidade hídrica e a viabilidade econômica são fatores-chaves, especialmente em países onde essa tecnologia não é apoiada financeiramente.

Uma referência de apoio ao uso de tecnologias verdes é programa de estratégia de gestão de águas pluviais de Singapura (*ABC Waters Program*). Segundo Lim e Lu (2016), a combinação entre a drenagem convencional de águas pluviais com a prática de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto tem apresentado resultados positivos.

Sendo evidenciado pelo número de projetos concluídos desde pequenos locais de tratamento de origem até projetos maiores e caros de restauração de canais. Tudo isso é possível devido à forte vontade política e estrutura holística do Programa.

Conclusão

- Na revisão sistemática realizada neste trabalho, destacaram-se os artigos publicados no continente asiático com maior número de trabalhos. Em relação à distribuição cronológica dos tópicos, a “análise técnica”, “econômica”, “energética” e “ambiental” vem atraindo atenção dos pesquisadores, uma vez que passaram a ser foco das pesquisas entre os anos de 2018 a 2021.
- As espécies de maiores usos, tanto nos artigos nacionais como internacionais, foram as incluídas na família Poaceae e as suculentas da família Crassulaceae. No entanto, observou-se a necessidade de um maior aprofundamento sobre a fisiológica das plantas usadas nas pesquisas.
- Foi observado que a maioria dos estudos assegura os benefícios dos telhados verdes, principalmente com relação ao conforto térmico, onde o telhado reduz a variação de temperatura dos locais onde é aplicado, causando um maior bem-estar aos usuários. Também foi amplamente recomendado para a redução do escoamento superficial, pois ao reter parte da água da chuva o sistema evita que esta sobrecarregue a rede de drenagem de águas pluviais em momento de pico de cheia. O sistema apresenta capacidade de reduzir as necessidades de energia e climatização, como a redução de poluição do ar, muito embora seja uma área de estudo menos aplicada que as anteriores.
- O desempenho dos telhados verdes é influenciado pelo tipo de clima, vegetação utilizada, tipo de substrato, bem como o tipo de telhado verde. Diante disso, a tecnologia se torna mais viável quando atende às necessidades locais, de modo que os custos de implantação e manutenção sejam superados pelos seus benefícios. Do contrário, a sua aplicação torna-se limitada, especialmente em países que não dispõem de política públicas de apoio a projetos sustentáveis.

Referência

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15527**: Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

- ARBOIT, N. K. S. et al. Green roof evapotranspiration rates and stormwater control under subtropical climate: a case study in Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, p. 1–12, 2021. DOI:10.1590/2318-0331.262120210089.
- BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A. H.; GHAFARIANHOSEINI, A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, p. 411–428, 2014. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.10.047.
- BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 351–360, 2010. DOI:10.1016/j.ecoleng.2009.12.014.
- BEVILACQUA, P. et al. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. **Energy and Buildings**, v. 122, p. 63–79, 2016. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.03.062.
- BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E.; DURTSCHKE, R. D. Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 506–514, 2016. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.02.044.
- CARNEIRO, T. A. et al. Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1086–1092, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1086-1092
- CHEN, C. F.; KANG, S. F.; LIN, J. H. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. **Ecological Engineering**, v. 112, n. December 2017, p. 10–20, 2018. DOI:10.1016/j.ecoleng.2017.12.013.
- CHEN, P. Y.; TUNG, C. P.; LI, Y. H. Low impact development planning and adaptation decision-making under climate change for a Community against pluvial flooding. **Water**, v. 9, n. 10, p. 756, 2017. DOI:10.3390/w9100756.
- CHEN, Y. C.; CHEN, Z. A. Water retention capacity and runoff peak flow duration of the urban food garden: A city-based model and field experiment. **Ecological Engineering**, v. 159, p. 106073, 2021. DOI:10.1016/j.ecoleng.2020.106073
- CIRINCIONE, L.; MARVUGLIA, A.; SCACCIANOCE, G. Assessing the effectiveness of green roofs in enhancing the energy and indoor comfort resilience of urban buildings to climate change: Methodology proposal and application. **Building and Environment**, v. 205, p. 108198, 2021. DOI:10.1016/j.buildenv.2021.108198.
- DEL BARRIO, E. P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 2, p. 179–193, 1998. DOI:10.1016/s0378-7788(97)00029-7.
- DEMUZERE, M. et al. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 107–115, 2014. DOI:10.1016/j.jenvman.2014.07.025.
- DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. **Water Research**, v. 124, p. 280–289, 2017. DOI:10.1016/j.watres.2017.07.038.
- FEITOSA, R. C. Uso de sistemas modulares vegetados para promoção da saúde urbana e atenuação do estresse térmico. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 109–120, 2019. DOI:10.1590/0103-11042019s308.
- FENG, Y.; BURIAN, S. J.; PARDYJAK, E. R. Observation and estimation of evapotranspiration from an irrigated green roof in a rain-scarce environment. **Water**, v. 10, n. 3, p. 262, 2018. DOI:10.3390/w10030262.
- FIORETTI, R. et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building and Environment**, v. 45, n. 8, p. 1890–1904, 2010. DOI:10.1016/j.buildenv.2010.03.001.
- FRANCIS, R. A.; LORIMER, J. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, p. 1429–1437, 2011. DOI:10.1016/j.jenvman.2011.01.012.
- GETTER, K. L.; BRADLEY ROWE, D.; CREGG, B. M. Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 8, n. 4, p. 269–281, 2009. DOI:10.1016/j.ufug.2009.06.005.
- GONG, Y. et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. **Science of the Total Environment**, v. 687, p. 505–515, 2019. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.06.100.
- GONG, Y. et al. Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff. **Science of the Total Environment**, v. 732, p. 139248, 2020. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139248.
- HASHEMI, S. S. G.; MAHMUD, H. BIN; ASHRAF, M. A. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 669–679, 2015. DOI:10.1016/j.rser.2015.07.163.
- HUANG, Y. Y.; CHEN, C. T.; TSAI, Y. C. Reduction of temperatures and temperature fluctuations by hydroponic green roofs in a subtropical urban climate. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 174–185, 2016. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.07.023.
- KOROXENIDIS, E.; THEODOSIOU, T. Comparative environmental and economic evaluation of green roofs under Mediterranean climate conditions – Extensive green roofs a potentially preferable solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, n. May, 2021. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.127563.
- LI, W. C.; YEUNG, K. K. A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, p. 127–134, 2014. DOI:10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001.
- LIM, H. S.; LU, X. X. Sustainable urban stormwater management in the tropics: An evaluation of Singapore’s ABC Waters Program. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 842–862, 2016. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.04.063.
- MALLET, R. et al. The benefits and challenges of using systematic reviews in international development research. **Journal of Development Effectiveness**, v. 4, n. 3, p. 445–455, 2012. DOI:10.1080/19439342.2012.711342.
- MANSO, M. et al. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110111, 2021. DOI:10.1016/j.rser.2020.110111.
- MELO, A. B. DE; MENDONÇA, T. N. M. Cement blocks with EVA waste for extensive modular green roof: contribution of components in thermal insulation. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 10, n. 1, p. 92, 2017. DOI:10.1590/S1983-41952017000100006
- MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 522–538, 2017. DOI:10.1016/j.jenvman.2017.03.095.
- MORUZZI, R. B.; MOURA, C. C. DE; BARBASSA, A. P. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 59–73, 2014. DOI:10.1590/s1678-86212014000300005.
- MOVAVHED, Y. et al. Simultaneous use of PV system and green roof: A techno-economic study on power generation and energy consumption. **Energy Procedia**, v. 159, p. 478–483, 2019. DOI:10.1016/j.egypro.2018.12.037.

- UNITED NATION. **Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development**, 2016. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: jan. 2022.
- NORTON, B. A. et al. Planning for cooler cities: A framework to prioritize green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 127–138, 2015. DOI:10.1016/j.landurbplan.2014.10.018.
- OMAR, A. et al. GREEN ROOF: SIMULATION OF ENERGY BALANCE COMPONENTS IN RECIFE, PERNAMBUCO STATE, BRAZIL. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 3, p. 334–342, 2018. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n3p334-342/2018
- PALERMO, S. A. et al. Hydrological effectiveness of an extensive green roof in Mediterranean climate. **Water**, v. 11, n. 7, 2019. DOI:10.3390/w11071378.
- PECZKOWSKI, G. et al. Runoff and water quality in the aspect of environmental impact assessment of experimental area of green roofs in Lower Silesia. **Sustainability**, v. 12, n. 11, 2020. DOI:10.3390/su12114793.
- REY, C. V. et al. Green roof design with engineered extensive substrates and native species to evaluate stormwater runoff and plant establishment in a neotropical mountain climate. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 7–9, 2020. DOI:10.3390/su12166534.
- SAMPAIO, C. A. D. P. et al. SIMILITUDE AND THERMAL PERFORMANCE ON NON-CONVENTIONAL ROOFS. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 7–12, 2018. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p7-12/2018.
- SANGKAKOOL, T. et al. Prospects of green roofs in urban Thailand – A multi-criteria decision analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 400–410, 2018. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.06.060.
- SANTOS, P. T. DA S. et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 161–174, 2013. DOI:10.1590/s1678-86212013000100011.
- SCHENCK, R.; BLAAUW, D.; VILJOEN, K. Enabling factors for the existence of waste pickers: A systematic review. **Social Work (South Africa)**, v. 52, n. 1, p. 35–53, 2016. DOI:10.15270/52-1-478.
- 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:10.1016/j.rser.2018.04.006.
- SHARMA, A. et al. Role of green roofs in reducing heat stress in vulnerable urban communities - A multidisciplinary approach. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 9, 2018. DOI:10.1088/1748-9326/aad93c.
- SPEAK, A. F. et al. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. **Science of the Total Environment**, v. 461–462, p. 28–38, 2013. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.04.085.
- SPROUL, J. et al. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. **Energy and Buildings**, v. 71, p. 20–27, 2014. DOI:10.1016/j.enbuild.2013.11.058.
- TALEBI, A. et al. Water retention performance of green roof technology: A comparison of canadian climates. **Ecological Engineering**, v. 126, p. 1–15, 2019. DOI:10.1016/j.ecoleng.2018.10.006.
- TASSI, R. et al. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 139–154, 2014. DOI:10.1590/S1678-86212014000100012
- TEIXEIRA, C. A. et al. Estudo comparativo da qualidade da água da chuva coletada em telhado com telhas de concreto e em telhado verde para usos não potáveis. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 2, p. 135–155, 2017. DOI:10.1590/s1678-86212017000200150.
- VIECCO, M. et al. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. **Building and Environment**, v. 204, 2021. DOI:10.1016/j.buildenv.2021.108120.
- WANG, Y. et al. Thermal study on extensive green roof integrated irrigation in northwestern arid regions of China. **Water**, v. 9, n. 11, p. 810, 2017. DOI:10.3390/w9110810.
- XU, T. et al. Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. **Building and Environment**, v. 48, n. 1, p. 1–6, 2012. DOI:10.1016/j.buildenv.2011.08.011.
- ZHANG, L.; ZHONG, Y.; GENG, Y. A bibliometric and visual study on urban mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, 2019. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118067.