

Os telhados verdes nas políticas ambientais e como medida mitigadora das inundações urbanas: uma revisão sistemática

DOI: 10.20396/labore.v15i00.8663910

Bárbara Roberta Morais

<https://orcid.org/0000-0001-9797-4116>

Universidade Federal de Minas Gerais/ Belo Horizonte [MG] Brasil

Juan David Méndez-Quintero

<https://orcid.org/0000-0003-0768-8744>

Universidade Federal de Minas Gerais/ Belo Horizonte [MG] Brasil

Diego Rodrigues Macedo

<https://orcid.org/0000-0002-1178-4969>

Universidade Federal de Minas Gerais/ Belo Horizonte [MG] Brasil

Marcelo Antônio Nero

<https://orcid.org/0000-0003-2124-5018>

Universidade Federal de Minas Gerais/ Belo Horizonte [MG] Brasil

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo relatar um histórico de estudos e o estado da arte no que se refere ao conceito de telhados verdes nas políticas públicas ambientais e nas pesquisas relacionadas à mitigação das inundações urbanas. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica histórica das técnicas e estudos, utilizados nos últimos 15 anos, em processo de gestão e planejamento para a implantação de telhados verdes como medida mitigadora das inundações urbanas. Foram utilizados os repositórios de busca Scopus, Periódicos da Capes e Scielo. A busca foi realizada por meio de um conjunto de palavras-chave selecionadas e suas combinações nos idiomas português, espanhol e inglês. Após tratamento e análise das informações, obteve-se 33 obras, nas quais se relatam as aplicações e exemplos práticos, bem como a evolução em função da inovação tecnológica. Nos documentos selecionados foi possível observar que existem legislações vigentes acerca do tema e que os telhados verdes de fato são eficientes na gestão das águas pluviais urbanas, contribuindo não somente na mitigação das inundações das cidades, mas também com outros fatores ambientais como as ilhas de calor. Ademais, foi observado que o desempenho na detenção e redução do escoamento superficial é aumentado quando se faz uso de mais de uma técnica sustentável de gestão das águas pluviais, como a utilização de telhados verdes e pavimentos permeáveis.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem hidrológica. SUDS. Ecotelhado.

Green roofs in environmental policies and as a mitigation measure for urban floods: a systematic review

ABSTRACT

This article aims to report a history of studies and the state of the art regarding the concept of green roofs in environmental public policies and research related to the mitigation of urban flooding. Therefore, a historical bibliographic review of the techniques and studies used in the last 15 years in the management and planning process for the implementation of green roofs as a measure to mitigate urban flooding was carried out. Three search repositories were used: Scopus, Capes Periodicals, and Scielo. The search was performed using a set of selected keywords and their combinations in Portuguese, Spanish, and English. After processing and analyzing the information contained in the documents found, 33 works were obtained, in which applications and practical examples are reported, as well as the evolution due to technological innovation. In the selected documents, it was possible to observe that there are laws in force on the subject and that green roofs are efficient in the management of urban rainwater, contributing not only to the mitigation of flooding in cities but also to other environmental factors such as heat islands. Furthermore, it was observed that the performance in arresting and reducing runoff is increased when more than one sustainable rainwater management technique is used, such as the use of green roofs and permeable pavements.

KEYWORDS

Hydrological modeling. SUDS. Ecoroof.

1. Introdução

A intensa e crescente concentração de edificações e áreas pavimentadas e o uso e ocupação inadequado do solo em áreas urbanas tem impactado severamente as bacias hidrográficas inseridas no tecido urbano. Além dos problemas relacionados à poluição pontual e difusa, a urbanização impacta a dinâmica hidrológica superficial e subsuperficial.

Neste sentido as elevadas taxas de impermeabilização do solo urbano associada aos altos índices pluviométricos aumentam, consideravelmente, o volume e velocidade de escoamento superficial que desencadeia a inundação nas cidades. Segundo Tabares-Catimay (2019) uma das formas de amenizar esses problemas é através dos Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SUDS) ou Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID). Os SUDS ou LID vem sendo estudados e implementados desde meados da década de 1970 em países desenvolvidos, com o intuito de solucionar os problemas relacionados com a gestão das águas pluviais urbanas.

Estas práticas sustentáveis de drenagem urbana têm como premissa a manutenção da paisagem natural e das áreas permeáveis através do uso de pavimentos permeáveis, jardins de infiltrações domiciliares ou condominiais e telhados verdes (Alamy Filho et al., 2016).

Uma das principais técnicas compensatórias é o telhado verde, que é uma cobertura vegetal implantada sobre as superfícies dos telhados convencionais, constituído basicamente por vegetação, substrato, camada filtrante, camada drenante, camada protetora, manta de impermeabilização e estrutura do telhado convencional (Tassi et al., 2014) (Figura 1). Os componentes do telhado verde o tornam uma técnica eficiente na diminuição das inundações urbanas, devido à capacidade em filtrar, reter e armazenar as águas pluviais, diminuindo o volume e a velocidade da água escoada e, conseqüentemente, atrasando o pico de escoamento (Vijayaraghavan, 2016).

Outros benefícios dos telhados verdes são a redução do efeito das ilhas de calor, melhoria do microclima do ambiente, diminuição do consumo de energia, redução do ruído, melhoria da qualidade e umidade do ar, reaproveitamento da água da chuva, formação de novos ecossistemas, construção de habitat para diversas espécies, desenvolvimento da agricultura urbana, paisagismo e arborização das cidades (Berardi et al., 2014; Mendonça & Melo, 2017; Nunes et al., 2017).

Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo realizar um levantamento dos estudos de modelagem hidrológica de telhados verdes e as políticas públicas de incentivo à adoção dessa medida sustentável. O desenvolvimento metodológico foi baseado em uma revisão sistemática do assunto através das bases bibliográficas disponíveis.



Figura 1. Componentes do telhado verde. Fonte: Adaptado de Vijayaraghavan, 2016.

2. Procedimentos metodológicos

Para desenvolvimento dessa pesquisa, foram utilizados três repositórios de buscas: Scopus, Periódicos da Capes e Scielo. Na base de dados da Scopus foram consultados os artigos nos idiomas inglês e espanhol. Já nos demais, as buscas foram realizadas no idioma português. A busca foi baseada nas seguintes palavras-chaves: telhados verdes, inundações urbanas, escoamento superficial, modelagem hidrológica. Essa busca foi realizada no período de 2005 a 2020 e nos idiomas português, espanhol e inglês. Esse período foi escolhido porque o foco é analisar os estudos mais modernos e, além disto, o número de estudos publicados antes de 2005 é quantitativamente pequeno para os critérios estabelecidos, sendo encontrada apenas uma publicação antes dessa data.

Na base de dados da Scopus foram utilizadas, as expressões booleanas: (*title-abs-key* ("green roofs") *and title-abs-key* ("urban flooding") *or title-abs-key* ("surface runoff") *or title-abs-key* ("hydrological modeling")) *and (limit-to* (pubyear, 2020) *or limit-to* (pubyear, 2019) *or limit-to* (pubyear, 2018) *or limit-to* (pubyear, 2017) *or limit-to* (pubyear, 2016) *or limit-to* (pubyear, 2015) *or limit-to* (pubyear, 2014) *or limit-to* (pubyear, 2013) *or limit-to* (pubyear, 2012) *or limit-to* (pubyear, 2011) *or limit-to* (pubyear, 2010) *or limit-to* (pubyear, 2009) *or limit-to* (pubyear, 2008) *or limit-to* (pubyear, 2007) *or limit-to* (pubyear, 2006) *or limit-to* (pubyear, 2005)) *and (limit-to* (doctype, "ar")) *and (limit-to* (srctype, "j")) *and (limit-to* (language, "english") *and limit-to* (language, "spanish"))).

Nas outras bases de dados, as sintaxes de busca seguiram o mesmo padrão, tendo como diferencial apenas o idioma. Ademais, a busca retornou um total de 106 estudos na base de dados da Scopus, 6 trabalhos no portal de Periódicos da Capes e 6 artigos na biblioteca eletrônica da Scielo.

Com isso, realizou-se a leitura dos resumos e, quando necessário, do trabalho completo. Por fim, selecionou-se um total de 33 estudos centrais (27,97% do total levantado) para compor este estudo. A escolha dos artigos foi decorrente da análise de pesquisas que quantificaram o efeito dos telhados verdes na mitigação de inundações urbanas e a aplicação desses em políticas públicas de Desenho e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (DDUBI).

2.1 ANÁLISE DOS DADOS

No período estudado destaca-se um aumento crescente no número de publicações nos oito últimos anos, com destaque para os anos de 2017 e 2019 (Figura 2). Neste período destaca-se entre os 10 principais autores a professora Virginia Stovi da Universidade de Sheffield no Reino Unido; professora Antonia Longobardi e professora Mirka Mobilia ambas da Universidade de Salerno na Itália (Figura 3).

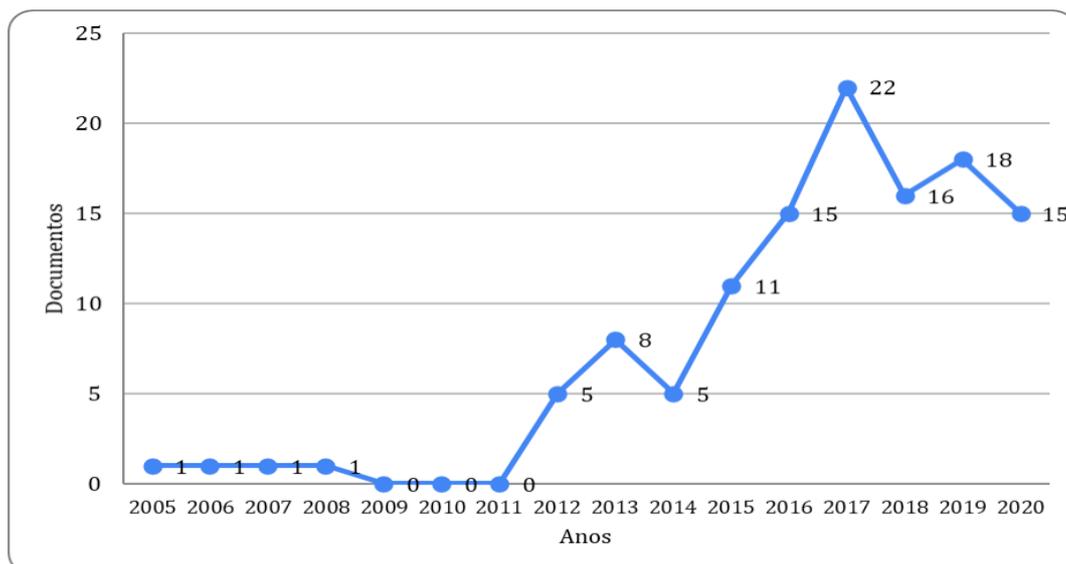


Figura 2. Evolução da quantidade de publicações por ano. Fonte: Artigos contabilizados do Scopus, Scielo e Periódicos da Capes. Org.: dos Autores, 2020.

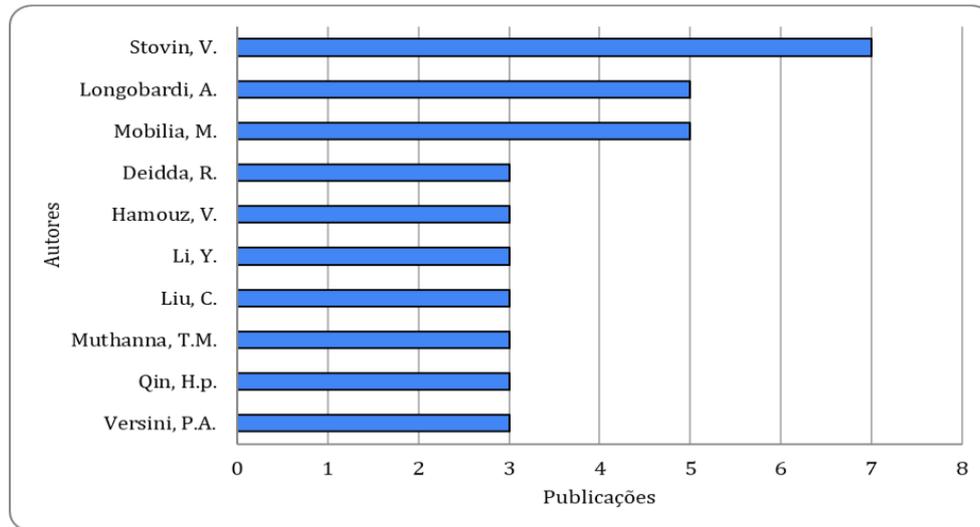


Figura 3. Autores com o maior número de artigos publicados no período de 2005 a 2020. Fonte: Artigos contabilizados do Scopus, Scielo e Periódicos da Capes. Org.: dos Autores, 2020.

Estudos realizados na China e Estados Unidos destacam-se, com ambos os países tendo um total de 19 pesquisas cada. O Brasil, antes da busca no idioma português ocupava a mesma colocação que a Austrália (3 trabalhos publicados), após a nova inclusão esse número subiu para 13 (Figura 4).

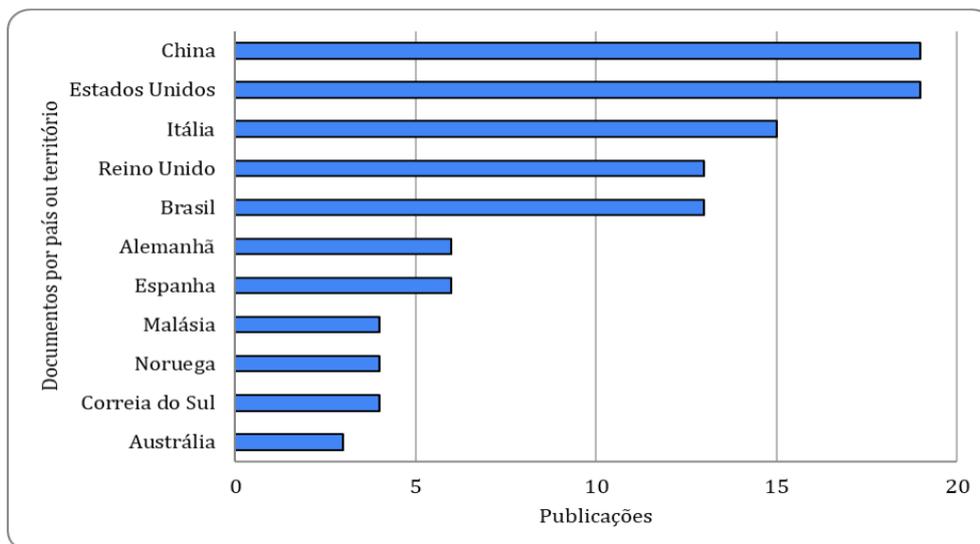


Figura 4. Países ou territórios com destaque nas publicações acerca do tema no período de 2005 a 2020. Fonte: Artigos contabilizados do Scopus, Scielo e Periódicos da Capes. Org.: dos Autores, 2020

3. Políticas públicas municipais e os telhados verdes

Diversos autores (VanWoert et al., 2005; Pappalardo et al., 2017; Zhou et al., 2019) destacam a eficiência dos telhados verdes na retenção e retardo do escoamento superficial, e a importância de políticas públicas no incentivo de práticas sustentáveis.

No contexto brasileiro atualmente, há textos governamentais que estabelecem a instalação de telhados verdes em determinados locais (p.ex. condomínios acima de 3 pavimentos ou com áreas maiores de 400 m²). Também existe o incentivo fiscal com a redução da cobrança do Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana (IPTU) e na preferência nos processos de licenciamento do empreendimento. Outro benefício é a atribuição de selos e certificados sustentáveis, que também agregam as vantagens supracitadas aos imóveis. No atual cenário, tem-se vigente em nível municipal leis e decretos a cerca deste tema (Quadro 1).

Quadro 1. Textos governamentais acerca dos telhados verdes.

Leis e Decretos	Município	Descrição
Lei nº 6.793/2010	Guarulhos [SP]	O município de Guarulhos [SP], através da Lei nº 6.793, de 28 de dezembro de 2010 concede desconto de 3% no valor do IPTU anual devido, pelo período de cinco exercício consecutivos, caso o imóvel adote duas medidas sustentáveis previstas na lei, entre elas a instalação de telhados verdes em todas as coberturas disponíveis da construção (Guarulhos [SP], 2010).
Lei nº 7.031/ 2012	Guarulhos [SP]	A Lei nº 7031, de abril de 2012, dispõe nos termos do Art. 1º, sobre a obrigatoriedade da instalação de telhado verde em construções edificadas com mais de três pavimentações (Guarulhos [SP], 2012).
Lei nº 235/2012	Goiânia [GO]	A Lei complementar nº 235 de 28 de dezembro de 2012 do município de Goiânia [GO], institui o Programa “IPTU VERDE”. Conforme disposto no Art. 2º, será concedido um desconto de 3% no IPTU para os imóveis que fizerem uso de no mínimo duas boas práticas sustentáveis, entre elas a instalação de telhado verde em todos os telhados disponíveis para esse tipo de cobertura no imóvel (Goiânia [GO], 2012).
Decreto nº 29.100/2017	Salvador [BA]	Em Salvador [BA], o Programa de Certificação Sustentável “IPTU VERDE” regulamentado no Decreto nº 29.100, de 06 de novembro de 2017, concede alguns benefícios aos imóveis que aderirem ao programa, tais como: tramitação prioritária nos processos de licenciamento e desconto de 5 a 10% no valor do IPTU. Um dos critérios pontuados para conseguir a certificação, consiste na adoção de projetos sustentáveis como a implantação de telhado verde em pelo menos 25% da área do teto da edificação (Salvador [BA], 2017).
Lei nº 913/2015	Santos [SP]	Em Santos [SP], a lei complementar nº 913, de 21 de dezembro de 2015, no Município de Santos [SP], incentiva a implantação de coberturas verdes e concede o benefício de 1,5 a 10% de desconto no valor do IPTU aos edifícios com três ou mais pavimentos, podendo variar de três a dez exercícios fiscais (Santos [SP], 2015, Art. 1º, 7º e 8º).
Decreto nº 35.745/2012	Rio de Janeiro [RJ]	No Rio de Janeiro [RJ], o Decreto Municipal nº 35.745, de 06 de junho de 2012, atribui o selo “Qualverde” aos empreendimentos que fazem uso de práticas sustentáveis destinadas à redução dos impactos ambientais. Como benefício, os imóveis certificados passam a ter prioridade no processo de licenciamento. Uma das práticas sustentáveis que é pontuada para a aquisição do selo “Qualverde” é a implantação dos telhados verdes no teto do último pavimento da edificação (Rio de Janeiro [RJ], 2012).
Lei nº 5.840/2014	Canoas [RS]	A lei municipal de Canoas [RS], Lei nº 5.840, de 27 de maio de 2014, permite a utilização dos telhados verdes como forma de compensar parcialmente a Área Livre Obrigatória (ALO) exigida e que não puder ser executada no lote. Terrenos com até 1.500m² de área, poderão receber uma compensação de no máximo 50% de sua ALO, conforme disposto nos Art. 1º e 8º, por exemplo. No Art. 10º, a instalação de telhado verde fica obrigatória aos imóveis que tenham causado danos ambientais no processo de construção (Canoas [RS], 2014).
Decreto nº 17.273/2020	Belo Horizonte [MG]	Em Belo Horizonte [MG], o Decreto nº 17.273 de 04 de fevereiro de 2020, regulamenta o parcelamento, ocupação e uso do solo em áreas de interesse ambiental e patrimônio cultural e urbano no município. No parágrafo 1 do artigo 75 da seção 3 (taxa de permeabilidade e do controle de drenagem), encontra-se descrito que telhados verdes e jardins verticais são dispositivos passíveis de serem utilizados em complementos da caixa de captação. Caixa esta, que será exigida em todo o território municipal, exceto para as Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS) ou Áreas de Especial Interesse Social (AEIS), conforme previsto no art. 161 da Lei nº 11.181, de 2019 (Belo Horizonte [MG], 2020).
Lei nº 18.112/2015	Recife [PE]	No mesmo segmento, a Lei nº 18.112 de 12 de janeiro de 2015, de Recife [PE], estabelece que os projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais com mais de 400m² de área de cobertura deverão prever a implantação de telhado verde para sua aprovação (Recife [PE], 2015).

Fonte: Autores (2020).

4. Avaliação dos estudos de telhados verdes como medida SUDS

No atual cenário, segundo projeções da ONU, cerca de 55% da população mundial vive em áreas urbanas, uma proporção que é esperada chegar a 68% até 2050 (Raimondi & Becciu, 2021; Jiménez et al., 2021). Devido a esse aumento na urbanização e a constante necessidade de atender a essa demanda, as superfícies naturais são cobertas e modificadas. Isso acaba resultando no aumento das temperaturas e nos níveis de ruído, pior qualidade do ar, perda da biodiversidade e na geração de escoamento superficial. Sendo este último problema gerado pela impossibilidade de infiltração da água no solo, atingindo hoje um grande número de cidades (Raimondi & Becciu, 2021).

A eficiência dos telhados verdes na mitigação das inundações urbanas é descrita por muitos autores em revisões. Loc et al. (2017), verificaram que os telhados verdes como medida SUDS foram os que apresentaram melhores resultados técnicos na redução e retenção do escoamento pluvial, porém, segundo levantamento com 140 famílias, foi constatado que SUDS públicos (espaços verdes urbanos e pavimentos permeáveis) possuem uma maior aceitabilidade social. Através da análise multicritério, os autores verificaram que os espaços verdes urbanos públicos são medidas SUDS mais favoráveis, seguido por telhados verdes, pavimentações permeáveis e captação da água da chuva.

Estudos temporais de longo tempo com respeito a telhados verdes reforçam a efetividade da tecnologia. Segundo Sartor et al. (2018) uma casa contendo telhado verde na Alemanha vem sendo monitorada desde 1998 até 2012 e, dentre os principais resultados foi observado que o cálculo da evapotranspiração no comportamento do modelo é o mais importante para as simulações hidrológicas. Ademais, eles citam que na prática fica comprovada a eficiência do telhado na filtragem das águas pluviais, bem como a eficiência deste na retenção durante fortes eventos de chuva (Sartor et al., 2018). Em um estudo com dados temporais de 18 anos para uma bacia urbana na França, afetada frequentemente por inundações, Versine et al. (2015) modelaram os telhados verdes em escala de bacia e edifício para efeito de comparação. Os autores chegaram à conclusão a partir dos resultados quantitativos obtidos que a implantação extensa de telhados verdes pode afetar o escoamento urbano em termos de pico de vazão e volume e, com isso, é possível evitar inundações em vários casos. Ainda de acordo com os mesmos autores, os telhados verdes são eficientes para mitigar os efeitos dos eventos usuais de chuva, mas para eventos mais severos eles acabam sendo menos úteis. Assim, eles concluem que os telhados verdes combinados com outras estruturas (como LID) representam uma contribuição interessante para a gestão das águas urbanas.

Estudos temporais mais curtos (p.ex. entre 5 e 24 meses) também apontam para a eficiência dos telhados verdes. No estudo de Carter & Rasmussen (2006) um lote de telhado verde foi analisado entre 2003 a 2004 em Athens, no Estado da Geórgia, Estados Unidos da América, onde foi observado que o volume de chuva retido depende do nível de precipitação, podendo variar de 50% (> 76,2 mm) a 90% (< 25,4 mm) e, além disso, o escoamento do telhado verde foi retardado em média 34,9 minutos. Burszta-Adamiak (2012) realizou um estudo de 2009 a 2010 que verificou a retenção média para 153 eventos de precipitações em um prédio na Polônia contendo telhado verde, para os dados analisados a retenção média variou de 82,5% a 85,7%, sendo que para eventos de precipitação de até 1 mm por dia, a retenção chegou a quase 100%. Tassi et al. (2014) avaliaram por 17 meses o controle quantitativo do escoamento pluvial por meio de um telhado verde situado em Santa Maria, RS, Brasil. Para os 43 eventos de chuva analisados, os autores observaram que o telhado verde reduziu em média 62% do volume escoado superficialmente, além de ter promovido o retardo do início do escoamento. No estudo de Ohnuma & Mendiondo (2015), realizaram-se análises de um total de 1083 mm precipitados em um período de 5 meses em um condomínio localizado em São Carlos, SP, Brasil. Os resultados mostraram uma eficiência de 36% na retenção pluviométrica do telhado verde em comparação com o telhado cerâmico, que segundo os autores constituiu 90% de escoamento do total precipitado. Squier-Babcock & Davidson (2020), realizaram um estudo durante 21 meses em um telhado verde extenso de 5550 m², projetado para receber eventos de chuva de 25,4 mm, em Nova Iorque, Estados Unidos da América. Para os resultados os pesquisadores observaram uma retenção de 56% dos 1.062 mm de chuva registrado e uma redução de 65% no pico de escoamento. Rosatto et al. (2015), ao longo de um ano de estudos, concluíram que para a faixa de 21 a 41 mm de precipitação a retenção foi de 63% a 68%, com chuvas de 42 a 60 mm a taxa de retenção foi de 31% a 39%, já para a faixa de 61 a 80 mm a porcentagem de retenção foi de 25% a 38%, semelhante à análise anterior e, por fim, no caso de chuvas com precipitações acima de 90 mm os telhados verdes apresentaram retenção de água em torno de 16% a 22%.

Estudos de modelagem também apresentam importantes insights. Em nível de telhado, Santos et al. (2013) realizaram simulações da dinâmica da água em dois telhados verdes (gramínea e vegetação cactácea) e um

telhado controle utilizando o modelo Hydrus. Foram realizados experimentos com lâminas de 42 mm/h e 79 mm/h. Como resultado, para a primeira lâmina os telhados verdes conseguiram reter 33,6% para o telhado com grama e 32,1% para o telhado com cacto, além de atrasarem o pico de escoamento em 11 minutos. Para a segunda lâmina a retenção foi de 15,5% para o telhado com grama e 14,2 para o telhado com cacto, quanto ao retardo no pico de escoamento, o telhado com cacto obteve 10 minutos e o com grama 11 minutos. Já para o telhado controle a retenção foi de 2,3% para o primeiro teste e 2,1% para o segundo. Hakimdavar et al. (2014) testaram, no modelo Hydrus-1D, o desempenho de três telhados verdes extensivos com as mesmas características de construção, porém com diferentes áreas de drenagem, como resultados eles observaram que a área de drenagem tem maior impacto na redução do pico de escoamento, a redução do pico de escoamento aumenta com o aumento da área de drenagem e a retenção da chuva e o tempo para o pico de escoamento não são muito influenciados pela área de drenagem. Utilizando o modelo Hydrus-1D para um telhado verde em um prédio em Athens, no estado da Geórgia, Estados Unidos da América, Hilten et al. (2008) descreveram que a intensidade das precipitações interfere na retenção dos telhados verdes, sendo que pequenas tempestades (< 2,54 cm) proporcionam retenção completa e tempestades maiores ocasionam a detenção das águas pluviais. Um estudo desenvolvido por Loiola et al. (2019) na Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, utilizando três tipos de bandejas modulares de telhados verdes, mostrou o desempenho médio de 58% na retenção de água induzida por irrigação e um atraso médio no escoamento total de aproximadamente 12 minutos, considerando todos os tipos de módulos de telhado verde. Castro et al. (2020) realizaram o estudo em um prédio na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, Brasil, fazendo uso de quatro módulos de experimentação. Os autores verificaram que o melhor resultado quanto à redução da vazão foi obtido pelo telhado com vegetação, tendo um percentual médio de retenção de 91,7% nas 3 primeiras horas. Watrin et al. (2020), realizaram a pesquisa em um edifício da Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil, e utilizaram duas parcelas experimentais. Os autores observaram que coberturas verdes extensivas consistem em uma ferramenta eficaz para reduzir o escoamento da chuva na escala do telhado, particularmente para eventos de pequenas tempestades. Ainda segundo os autores, telhados verdes extensivos conseguem reter e evapotranspirar até 75% da precipitação em comparação com os telhados convencionais, em condições de clima tropical amazônico, período de precipitação baixa e com profundidade mínima de substrato.

Alguns estudos avaliaram o efeito não apenas em nível de telhado, mas também em extensões maiores. Mentens et al. (2006) realizaram uma revisão de 18 estudos para construção de uma base dados para Bruxelas. Foi através do levantamento de 628 registros de dados e utilização de equações matemáticas, que os autores estimaram o potencial de redução do escoamento para a cidade. De acordo com as simulações, se 10% dos telhados de Bruxelas fossem constituídos por vegetação, haveria uma redução de 2,7% do escoamento superficial na região e 54% por edifício individual. Ainda segundo os autores, para que o efeito na redução do escoamento geral seja maior, os telhados verdes devem ser acompanhados por outras tecnologias SUDS de redução e retenção. Na pesquisa de Zhou et al. (2019), destaca-se o resultado obtido para uma área de 675 km² em Pequim, China, em que 13 das 20 passagens subterrâneas de inundação não teriam acontecido na tempestade conhecida como 7,21 de 2012 (77 pessoas perderam a vida), caso 20% dos potenciais telhados verdes tivessem sido adaptados. De acordo com os estudos de Mora-Melià et al. (2018) fazendo uso do modelo SWMM (Storm water management *model*), para eventos de chuva moderada, se 50% da área circundante dos setores das cidades que sofrem com inundações do Chile tivessem os telhados verdes, independentemente do tipo, isso poderia evitar as inundações nestes locais. Já, em eventos de chuvas fortes, alguns telhados verdes semiextensivos e extensivos cobrindo de 60% a 95% da área circundante, respectivamente, poderiam evitar inundações. Bai et al. (2019), verificaram através da analytical hierarchy process (AHP) e do modelo SWMM quatro cenários de LID para um distrito de uma cidade chinesa. Como resultado, os telhados verdes tiveram melhor desempenho na redução dos escoamentos.

Estudos de modelagem puramente teóricos enfatizam a aplicabilidade dos telhados verdes. Qin et al. (2013) utilizaram o modelo SWMM para analisar e comparar três técnicas de LID em uma bacia hidrográfica chinesa. Como resultado para os telhados verdes, os autores identificaram que a redução de inundações durante o período de chuvas foi mais eficiente com a localização do pico de intensidade mais tardio. Na pesquisa de Pappalardo et al. (2017) utilizando o modelo SWMM, os resultados mostraram uma maior eficiência dos telhados verdes do que pavimentos permeáveis no controle do escoamento urbano em uma densa bacia hidrográfica no sul da Itália. Ademais, os autores relataram a necessidade de não apenas utilizar as medidas SUDS em áreas públicas, mas também a necessidade de políticas inovadoras que incentivem a implantação em áreas privadas para aumentar a capacidade reguladora do escoamento pluvial. Masseroni & Cislighi (2016), observaram através da modelagem hidrológica pelo SWMM que a implementação de telhados verdes, em

100% da escala de captação, reduziu as taxas do pico de escoamento e os volumes de escoamento em 30 a 35% na bacia hidrográfica do Rio Seveso na Itália. Ercolari et al. (2018), verificaram através do modelo hidrológico MOBIDIC-U (MOdello di Bilancio Idrologico DIstribuito e Continuo - aree Urbane), que implementar telhados verdes em escala de bacias urbanas consiste em uma prática valiosa para reduzir o pico e o volume do fluxo nas redes de drenagem urbana. Além, eles descrevem que a eficiência dos telhados verdes é maior para tempestades frequentes de menor magnitude. A eficiência da técnica compensatória também é verificada em estudos que realizam o ajuste do modelo através de experimentação em campo. Carter & Jackson (2007) modelaram os efeitos dos telhados verdes em uma bacia hidrográfica urbana fazendo uso de várias escalas espaciais e do pacote de software StormNet Builder (SWMM). Como resultado, eles observaram que a implantação de telhados verdes podem reduzir significativamente as taxas de pico de escoamento, principalmente aqueles provenientes de pequenas tempestades.

Outro ponto bastante explorado na literatura é em relação à metodologia de construção do telhado verde. No estudo de VanWoert et al. (2005) foi comparado três tipos de telhados e diferentes porcentagens de inclinação do telhado e profundidade do telhado verde. Os autores concluíram que um telhado contendo vegetação consegue reter até 82,8% das águas pluviais. No mais, foi verificado que a combinação de declividade reduzida e meio de crescimento mais profundo diminuíram a quantidade total de escoamento. Analisando quatro diferentes opções de LID em escala de edifício e de sub-bacia hidrográfica, através da utilização do modelo SWMM, Barszcz (2015) observou que a redução mais significativa no escoamento e na vazão da escala de captação foi obtido pela combinação de camadas de solo permeável e telhados verdes, já para a escala de telhado o melhor resultado foi obtido para valas de infiltração e camadas permeáveis de solo como o telhado verde. Versini et al. (2016), observaram através de simulações em uma bacia francesa que os telhados verdes podem reduzir em até 80% o volume e o pico de escoamento, dependendo da intensidade da chuva e da saturação inicial do substrato. Além disso, esses autores citam que aparentemente a área total do telhado verde é mais importante que a sua localização, mas que a redução máxima da vazão parece ser dependente da distribuição espacial da precipitação.

No estudo de Li & Babcock (2016), foi observado que incluir um recurso de armazenamento da água captada no projeto de telhado verde aumenta a redução cumulativa do escoamento superficial em longo prazo em uma média 23,5%, enquanto o aumento na profundidade do substrato resulta em uma melhoria de em média 5,3%. Viola et al. (2017), concluíram em sua pesquisa que a profundidade do substrato na retenção das águas pluviais é crucial e que há um aumento no desempenho de retenção de coberturas extensivas para intensivas. Outro fator discutido foi o papel impulsionador das condições climáticas na retenção dos telhados verdes. De-Ville (2017), relata que ao analisar uma tempestade de projeto de 1h e 30 min, para 12 propriedades físicas de substrato, obteve um resultado para o pico de escoamento que foi 33% menor de um substrato para outro. O estudo de Palermo et al. (2019) considerando distintas profundidades do substrato durante seis meses de eventos climáticos, obteve como resultado uma variação no volume de redução de enxurradas de 22% a 24%, sendo os maiores índices obtidos nas maiores profundidades. Chow et al. (2015) analisou seis blocos de ensaio de telhado verde, dos quais, um não continha vegetação, cinco eram vegetados, sendo que quatro desses possuíam cada um uma espécie de planta diferente e, o quinto era uma junção das quatro espécies de plantas. Como resultados, o telhado com a mistura das espécies vegetais foi o que apresentou maior eficiência na retenção do escoamento superficial. Já para a monocultura, o telhado com suculenta (sedum) foi o mais eficiente. Chow et al. (2017) também concluiu que a sedum apresentou o melhor resultado na retenção do escoamento.

5. Conclusões

Os resultados dos estudos desses últimos 15 anos, mostraram de forma científica que a tecnologia de telhados verdes diminuem a vulnerabilidade urbana às inundações e, que o emprego conjunto com outras tecnologias verdes de SUDS aumenta, consideravelmente, a eficácia na retenção e gestão das águas pluviais.

As revisões selecionadas nessa pesquisa mostram a eficiência dos telhados verdes na mitigação das inundações urbanas, além de reforçarem a importância dessas medidas sustentáveis nas políticas ambientais. No geral, os telhados verdes alcançaram uma eficiência de 14,20% a 91,70% na retenção pluviométrica.

O uso de tecnologias verdes, principalmente combinadas, pode reduzir a necessidade de canais de drenagem urbana, criando mecanismos sustentáveis para uma gestão abrangente das águas urbanas e, com isso, facilitando a integração de medidas SUDS nos planos diretores de infraestrutura das cidades, além de contribuir

com a análise *trands-offs* entre as medidas mitigadoras de inundações e o desenvolvimento urbano. No entanto, o comportamento de retenção e detenção do telhado verde é específico para cada local, sendo necessário o estudo de modelagem hidrológica para verificação desse comportamento para a área em específico. Dentre as características observadas nas pesquisas analisadas, os autores enfatizam as características sazonais climáticas da região, evapotranspiração, profundidade e material base do substrato, tipo de substrato, tecnologia do telhado (como sistemas intensivo ou extensivo), tipo vegetacional, inclinação, área ocupada, entre outros parâmetros que devem ser analisados para o desempenho dos telhados verdes.

Oportunidades de novas pesquisas residem inclusive na exploração de tecnologias, como da utilização conjunta de levantamentos aerofotogramétricos via Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), como drones, e análises de planejamento com emprego de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Por meio dessas tecnologias seria possível definir as áreas prioritárias para a implantação dos telhados verdes, bem como os planos de ação e a melhor execução das leis que beneficiam os cidadãos.

5.1. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (código 001) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. BRM e JDMQ possui bolsa de mestrado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. DRM possui bolsa de Produtividade CNPq (PQ- 309763-2020-7).

6. Referências

- Alamy Filho, J. E., Barcelos e Manna, I. B. C., Melo, N. A. de, & Caixeta, A. C. M. (2016). Eficiência hidrológica de telhados verdes para a escala de loteamentos residenciais. *Sociedade & Natureza*, 28(2), <https://doi.org/10.1590/1982-451320160206>
- Bai, Y., Li, Y., Zhang, R., Zhao, N., & Zeng, X. (2019). Comprehensive Performance Evaluation System Based on Environmental and Economic Benefits for Optimal Allocation of LID Facilities. *Water*, 11(2), 341. <https://doi.org/10.3390/w11020341>
- Barszcz, M. (2015). Influence of Applying Infiltration and Retention Objects to the Rainwater Runoff on a Plot and Catchment Scale – Case Study of Sluzewiecki Stream Subcatchment in Warsaw. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24, 57-65. <https://doi.org/10.15244/pjoes/29197>
- Belo Horizonte. (2020). *Decreto municipal nº 17.273 de 04 de fevereiro de 2020*. Disponível em: <<https://www.cmbh.mg.gov.br/atividadelegislativa/pesquisarlegislacao/decreto/17273/2020>>. Acesso em: 03 fev. 2021.
- Berardi, U., Ghaffarianhoseini, A. H., & Ghaffarianhoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied energy*, v. 115, p. 411-428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Burszta-Adamiak, E. (2012). Analysis of the retention capacity of green roofs. *Journal of Water and Land Development*, 16(1), pp. 3-9. <https://doi.org/10.2478/v10025-012-0018-8>
- Canoas. (2014). *Lei Municipal nº 5.840, de 27 de maio de 2014*. <https://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br;rio.grande.sul;canoas:municipal:lei:2014-05-27;5840>. Acesso em: 27 de agosto de 2020.
- Carter, T. L., & Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic Behavior of Vegetated Roofs 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), pp. 1261-1274. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x>
- Carter, T., & Jackson, C. (2007). Rhett. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and urban planning*, 80(1-2), pp. 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.06.005>
- Castro, A. S., et al., Goldenfum, J. A., da Silveira, A. L., DallAgnol, A. L. B., Loebens, L., Demarco, C. F., ... & Quadro, M. S. (2020). The analysis of green roofs runoff volumes and its water quality in an experimental study in Porto Alegre, Southern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06777-5>
- Chow, M. F., Bakar, M. F., Roslan, M. A., Fadzailah, F. A., Idrus, M. F., Ismail, N. F., ... & Basri, H. (2015). Hydrological performance of native plant species within extensive green roof system in Malaysia. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, 10(15), 6419-6423.

- Chow, M. F., Bakar, M. F. A., Sidek, L. M., & Basri, H. (2017). Effects of substrate types on runoff retention performance within the extensive green roof. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(21): 5379-5383.
- De-Ville, S., Menon, M., Jia, X., Reed, G., & Stovin, V. (2017). The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. *Journal of Hydrology*, 547, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.006>
- Ercolani, G., Chiaradia, E. A., Gandolfi, C., Castelli, F., & Masseroni, D. (2018). Evaluating performances of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.050>
- Goiânia. (2012). *Lei complementar n° 235, de 28 de dezembro de 2012*. https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2012/lc_20121228_000000235.htm. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Guarulhos. (2010). *Lei Municipal n° 6.793, de 28 de dezembro de 2010*. https://leis.guarulhos.sp.gov.br/06_prefeitura/leis/leis_download/06793lei.pdf. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Guarulhos. (2012). *Lei Municipal n° 7031, de abril de 2012*. <https://leismunicipais.com.br/a/sp/g/guarulhos/lei-ordinaria/2012/703/7031/lei->. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S., & Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*, 73, pp. 494-508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>
- Hilten, R. N., Lawrence, T. M., & Tollner, E. W. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of hydrology*, 358 (3-4), pp. 288-293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.010>
- Jiménez, A., Russo, B., Ruiz, O., & Acero, A. (2021). Eficiencia hidráulica y ambiental de cubiertas verdes en un clima mediterráneo continental seco. Aplicación a una nueva urbanización en la ciudad de Zaragoza (España). *Ingeniería Del Agua*, 25(2), 127. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.14112>
- Li, Y., & Babcock, R. W. (2016). A Simplified Model for Modular Green Roof Hydrologic Analyses and Design. *Water*, 8, 343. <https://doi.org/10.3390/w8080343>
- Loc, H. H., Duyen, P. M., Ballatore, T. J., Lan, N. H. M., & Gupta, A. D. (2017). Applicability of sustainable urban drainage systems: an evaluation by multi-criteria analysis. *Environment Systems and Decisions*, 37(3), pp. 332-343. <https://doi.org/10.1007/s10669-017-9639-4>
- Loiola, C., Mary, W., & Da Silva, L. P. (2019). Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate change. *Journal of Hydrology*, 573, pp. 1057-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.004>
- Masseroni, D., & Cislighi, A. (2016). Green roof benefits to reduce the risk of flooding in the catchment scale. *Environmental Earth Sciences*, 75(7), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5377-z>
- Mendonça, T. N. M. de, & Melo, A. B. de. (2017). Telhado verde modular extensivo: biodiversidade e adaptação das plantas aos Blocos TEVA. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 8 (2), pp. 117-126. <https://doi.org/10.20396/parc.v8i2.8649606>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and urban planning*, 77(3), pp. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Mora-Melià, D., López-Aburto, C., Ballesteros-Pérez, P., & Muñoz-Velasco, P. (2018). Viability of Green Roofs as a Flood Mitigation Element in the Central Region of Chile. *Sustainability*, 10(4), 1130. <https://doi.org/10.3390/su10041130>
- Nunes, D. M., Da Silva, L. P., & Da Fonseca, P. L. (2017). Avaliação do papel dos telhados verdes no desenho e desenvolvimento urbano de baixo impacto ambiental e no controle de enchentes na Cidade do Rio de Janeiro. *Labor & Engenho*, 11(3), pp. 374-393. <https://doi.org/10.20396/labore.v11i3.8648820>
- Ohnuma Jr, A. A., & Mendiando, E. M. (2015). Metodologia para cálculo de eficiência de técnicas compensatorias em lote urbano. *Revista Internacional de Ciências*, 5(1), pp. 29-41. <https://doi.org/10.12957/ric.2015.16582>
- Palermo, S. A., Turco, M., Principato, F., & Piro, P. (2019). Hydrological Effectiveness of an Extensive Green Roof in Mediterranean Climate. *Water*, 11(7), 1378. <https://doi.org/10.3390/w11071378>

- Pappalardo, V., La Rosa, D., Campisano, A., & La Greca, P. (2017). The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning: A preliminary evaluation from a southern Italy case study. *Ecosystem Services*, 26, 345-354. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.015>
- Qin, H., Li, Z., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of environmental management*, 129, pp. 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- Raimondi, A., & Becciu, G. (2021). Performance of Green Roofs for Rainwater Control. *Water Resources Management*, 35(1), 99-111. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02712-3>
- Rio de Janeiro. (2012). *Decreto Municipal nº 35.745, de 06 de junho de 2012*. http://smaonline.rio.rj.gov.br/legis_consulta/42362Dec%2035745_2012.pdf. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Rio de Janeiro. (2012). *Lei Estadual nº 6.349, de 30 de novembro de 2012*. <https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/1033548/lei-6349-12>. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Recife. (2015). *Lei nº 18.112 de 12 de janeiro de 2015*. https://www.normasbrasil.com.br/norma/lei-18112-2015-recife_280138.html. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Rosatto, H., Moyano, G., Cazorla, L., Laureda, D., Meyer, M., Gamboa, P., ... & Kohan, D. (2015). " Extensive" green roof systems, efficiency in the retention capacity rainwater of the vegetation implanted. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Universidad Nacional de Cuyo, 47(2), pp. 123-134.
- Salvador. (2017). *Decreto Municipal nº 29.100, de 06 de novembro de 2017*. <http://iptuverde.salvador.ba.gov.br/downloads/Decreto.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Santos, P. T. D. S., Santos, S. M. D., Montenegro, S. M. G. L., Coutinho, A. P., Moura, G. S. S. D., & Antonino, A. C. D. (2013). Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. *Ambiente Construído*, 13(1), pp. 161-174. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000100011>
- Santos. (2015). *Lei complementar nº 913, de 21 de dezembro de 2015*. <https://egov.santos.sp.gov.br/legis/document/?code=5727&tid=98>. Acesso em: 27 ago. 2020.
- Squier-Babcock, M., & Davidson, C. I. (2020). Hydrologic Performance of an Extensive Green Roof in Syracuse, NY. *Water*, 12(6), p. 1535. <https://doi.org/10.3390/w12061535>
- Sartor, J., Mobilia, M., & Longobardi, A. (2018). Results and findings from 15 years of sustainable urban storm water management. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 8(4), pp. 505-514. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V8-N4-505-514>
- Tabares-Catimay, J., Gallo-Martínez L. M. & Mancipe-Muñoz, N. A. (2019). Modelación del desempeño hidrológico de techos verdes en ciudades andinas tropicales usando SWMM. *Producción+ Limpia*, 14(1), pp. 46-60. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a2>
- Tassi, R., Tassinari, L. C. D. S., Picilli, D. G. A., & Persch, C. G. (2014). Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. *Ambiente Construído*, 14(1), pp. 139-154. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000100012>
- Vanwoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., & Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention. *Journal of environmental quality*, 34(3), pp. 1036-1044. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>
- Versini, P.A., Ramier, D., Berthier, E., & De Gouvello, B. (2015). Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale. *Journal of Hydrology* 524, pp. 562-575. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020>
- Versini, P. A., Gires, A., Tchinguirinskaia, I., & Schertzer, D. (2016). Toward an operational tool to simulate green roof hydrological impact at the basin scale: A new version of the distributed rainfall-runoff model Multi-Hydro. *Water Science & Technology*, 74(8), 1845-1854. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.310>
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, 57, pp. 740-752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Viola, F., Hellies, M., & Deidda, R. (2017). Retention performance of green roofs in representative climates worldwide. *Journal of Hydrology*, 553, 763-772. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.033>



Zhou, D., Liu, Y., Hu, S., Hu, D., Neto, S., & Zhang, Y. (2019). Assessing the hydrological behaviour of large-scale potential green roofs retrofitting scenarios in Beijing. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40, pp. 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.010>

Watrin, V. da R., Blanco, C. J. C., & Gonçalves, E. D. (2019). Thermal and hydrological performance of extensive green roofs in Amazon climate, Brazil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 173(3), pp. 125-134. Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jensu.18.00060>