

Influência do substrato no desempenho térmico de telhados verdes

Influence of substrate on green roof thermal performance

Fabiana Campos Pimentel 

Rutineia Tassi 

Daniel Gustavo Allasia 

Bruna Minetto 

Cristiano Gabriel Persch 

Resumo

Os substratos de telhados verdes (TV) podem ser aprimorados, buscando melhorar as características térmicas que influenciam na transmissão de calor dessa camada. Este artigo apresenta os resultados de um ano de monitoramento térmico de quatro TVs modulares com diferentes substratos. Os substratos avaliados foram o solo local, substrato comercial à base de turfa e dois substratos alternativos obtidos a partir da adição de biocarvão da casca de arroz carbonizada (CAC) e outros componentes, incluindo resíduos da construção civil. O substrato de solo local apresentou desempenho térmico inferior aos demais substratos com relação a todos os índices térmicos avaliados: amplitude térmica, amortecimento térmico, atraso térmico e taxa de temperatura externa. Os substratos com adição de CAC apresentaram resultados superiores ao solo local e inferiores ao substrato comercial, indicando potencial alternativa a substratos de maior custo, bem como forma de destinar e agregar valor a esse passivo ambiental. Os resultados mostram a importância da escolha apropriada do substrato, de forma a melhorar o desempenho térmico de TVs, bem como a observância do estado de desenvolvimento da vegetação. É apontada a necessidade de estudos para o desenvolvimento de substratos com propriedades que contribuam para o melhor desempenho térmico de TVs.

Palavras-chave: Conforto térmico. Resíduos da construção civil. Biocarvão.

Abstract

Green roof (GR) substrates can be improved, seeking to increase the thermal characteristics, which influence the heat transmission on this layer. This article presents the results of one year of thermal monitoring of four modular GR with different substrates. The substrates assessed were local soil, commercial peat-based, and two alternative substrates obtained from the improvement of the local soil amended with the addition of biochar obtained through the Carbonized Rice Husk (CRH) and other components including construction waste. The local soil substrate presented lower thermal performance than the others, in relation to all evaluated indices: thermal amplitude, thermal damping, thermal delay and External Temperature Ratio. The substrates with the addition of CRH showed better results than the local soil and lower thermal performance than the commercial substrate being a potential alternative to more expensive substrates, as well to allocate and add value to this environmental liability. The results indicate the importance of the appropriate choice of substrate to improve GR's thermal performance, as well as the observance of the state of development of the vegetation. The need for studies is pointed out for the development of substrates with properties that contribute to the better thermal performance of GRs.

Keywords: Thermal comfort. Construction waste. Biochar.

¹Fabiana Campos Pimentel

¹Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

²Rutineia Tassi

²Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

³Daniel Gustavo Allasia

³Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

⁴Bruna Minetto

⁴Engenheira Sanitarista e Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

⁵Cristiano Gabriel Persch

⁵Universidade Federal do Mato Grosso
Cuiabá - MS - Brasil

Recebido em 19/01/23

Aceito em 04/04/23

Introdução

As ilhas de calor urbano (ICU) podem ser definidas como locais cujas temperaturas são maiores quando comparadas às temperaturas de áreas periféricas (AKBARI; KOLOKOTSA, 2016; OKE, 1973; OKE *et al.*, 2017), e estão associadas a ações antrópicas decorrentes de atividades humanas. Estruturas como edifícios, estradas e outras infraestruturas absorvem e reemitem mais o calor do sol que paisagens naturais, como florestas e corpos d'água (MA *et al.*, 2017; TAKEBAYASHI; MORIYAMA, 2007; TASSI *et al.*, 2014).

Além disso, no ambiente urbano diversas atividades emitem gases que têm potencial de aumentar a quantidade da energia térmica absorvida (CARLSON *et al.*, 1981; GUNAWARDENA; WEKKS; KERSHAW, 2017), afetando não apenas os ambientes internos, mas também causando desconforto para os pedestres (COSTANZO; EVOLA; MARLETTA, 2016; ZÖLCH *et al.*, 2016). Assim, as ICU podem representar também uma ameaça à saúde humana, visto que mais da metade da população mundial já vive em cidades (KII, 2021; UNITED..., 2021), e o aquecimento desses locais pode aumentar a morbidade e mortalidade, especialmente durante ondas de calor (ZHAO *et al.*, 2018).

Portanto, é necessário que o desenvolvimento dos espaços urbanos seja repensado, e acompanhado de tecnologias que permitam a mitigação das altas temperaturas nesses locais (NORTON *et al.*, 2015), especialmente em um cenário no qual mudanças climáticas indicam que algumas regiões podem sofrer ainda mais com o aumento das temperaturas (SACHINDRA; MUTHUKUMARAN; PERERA, 2015). Nesse sentido, métodos de mitigação que incluem a introdução de infraestruturas verdes, como os telhados verdes, dentre outros, têm sido indicados em função dos diferentes serviços ecossistêmicos que desempenham (ENVIRONMENTAL..., 2008a, 2008b, 2008c, 2008d; FORSCHUNGSGESELLSCHAFT..., 2018; TANG; ZHENG, 2019).

Os telhados verdes se constituem em uma das soluções baseadas na natureza (SBN), que podem proporcionar não só à edificação, como ao meio ambiente e população importantes benefícios (AKBARI; KOLOKOTSA, 2016; FORSCHUNGSGESELLSCHAFT..., 2018; TASSI *et al.*, 2014), como o isolamento acústico (ASCIONE *et al.*, 2013; PIOVESAN, 2013), a promoção da biodiversidade local (GETTER; ROWE, 2006), a valorização do imóvel (JOBIM, 2013), o retardo e diminuição dos picos de escoamento pluvial (COSTA; COSTA; POLETO, 2012; LIBERALESSO *et al.*, 2021; PERSCH, 2019; PERSCH *et al.*, 2021; TASSI *et al.*, 2014). Além disso, os telhados verdes proporcionam o aumento da vida útil das membranas dos telhados (BEVILACQUA; MAZZEO; ARCURI, 2018), a atenuação das ilhas de calor urbano (ALEXANDRI; JONES, 2008; BOSCH; SANG, 2017; BOWLER *et al.*, 2010; FERRAZ, 2012; TAKEBAYASHI; MORIYAMA, 2007), e o aumento da eficiência energética das edificações (JAFFAL; OULDBOUKHITINE; BELARBI, 2012; LIN *et al.*, 2013; OULDBOUKHITINE; BELARBI; SAILOR, 2014; TEEMUSK; MANDER, 2009; TANG; ZHENG, 2019) devido à redução da amplitude térmica interna dos ambientes (PALMEIRA, 2016; PARIZOTTO; LAMBERTS, 2011; SUSCA; GAFFIN; DELL'OSSO, 2011; WONG *et al.*, 2003; ZINZI; AGNOLI, 2012). Este último benefício é atingido especialmente porque os telhados verdes apresentam propriedades térmicas distintas às propriedades térmicas de telhados convencionais, absorvendo a radiação solar, utilizando-a em seus processos metabólicos e reduzindo as trocas térmicas entre ambientes internos e externos (BESIR; CUCE, 2018; PARIZOTTO; LAMBERTS, 2011; SAIZ *et al.*, 2006). Todavia, essa capacidade dependerá de fatores ligados às variáveis climáticas locais como temperatura ambiente, umidade, estação do ano, e variáveis que dependem da própria composição do telhado verde como o material do sistema estruturante, vegetação adotada e, principalmente, da profundidade e composição da camada de substrato (ASCIONE *et al.*, 2013; BERARDI; GHAFARIANHOSEINI; GHAFARIANHOSEINI, 2014; EKSI *et al.*, 2017).

O substrato promove o meio físico e as condições necessárias para o desenvolvimento da vegetação (ALBERTO *et al.*, 2012; AMPIM *et al.*, 2010; LIBERALESSO, 2018; LIBERALESSO *et al.*, 2021) e condiciona o desenvolvimento dos benefícios de um telhado verde (NOYA *et al.*, 2017). Embora seja um componente importante, na verdade não há um substrato universal para telhados verdes e, muitas vezes, os telhados verdes são executados utilizando material local (solo) em razão de custos (LIBERALESSO *et al.*, 2021).

Alguns trabalhos, no entanto, buscam aprimorar benefícios específicos dos telhados verdes no desenvolvimento da vegetação e/ou na retenção hídrica (YOUNG *et al.*, 2014), por meio da utilização de aditivos aos substratos, como a incorporação de vermicomposto, biochar, fibra de coco (KRATZ; WENDLING, 2016), argila e lodo de esgoto, cinzas de papel, argila de escavações (MOLINEUX; FENTIMAN; GANGE, 2009), vermiculita esfoliada, perlita expandida, tijolo triturado, areia com componentes orgânicos (VIJAYARAGHAVAN; RAJA, 2014), resíduos verdes compostados (GRACESON

et al., 2014a), bio sólido (GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004) e casca de arroz (CHEN *et al.*, 2018; DE LUCIA; TREVES; COMINO, 2021; LIBERALESSO, 2018; LIBERALESSO *et al.*, 2021; NOYA *et al.*, 2017).

Outros estudos mais específicos também investigaram a influência da composição do substrato dos telhados verdes nos aspectos térmicos (CASCONI *et al.*, 2018, 2019; CHEN *et al.*, 2018, 2021; KAZEMI; COURARD; HUBERT, 2022; NARANJO *et al.*, 2020; SAILOR; HAGOS, 2011; WANG *et al.*, 2020). Muitas dessas pesquisas, no entanto, são de curto prazo, e avaliaram o desempenho térmico dos substratos desenvolvidos para condições específicas, em ambiente controlado de laboratório ou estufa (KAZEMI; MOHORKO, 2017). Há, portanto, uma lacuna no conhecimento de resultados de pesquisas que incluam o monitoramento de longo prazo em condições de área aberta, e que compreendam tanto os períodos mais frios quanto os mais quentes do ano, que impõem condições específicas para o desempenho dos telhados verdes (FRIEDRICH, 2009).

Buscando avançar nesse sentido, neste artigo são apresentados os resultados de análises térmicas obtidas a partir do monitoramento contínuo de telhados verdes modulares ao longo de um ano. Os módulos foram instalados em ambiente aberto (condições de campo), e receberam quatro diferentes substratos: um substrato à base de solo local, alternativa mais econômica; um substrato comercial, alternativa mais cara; dois substratos que combinam o solo local com aditivo de biocarvão obtido a partir da carbonização de casca de arroz em diferentes proporções, além de outros componentes como resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto.

Material e métodos

Configuração experimental

O conjunto experimental consistiu em quatro módulos de telhados verdes, sendo que cada um desses módulos continha exatamente a mesma estrutura, exceto pelos substratos que foram quatro tipos diferentes. Os quatro substratos avaliados foram:

- (a) substrato alternativo SC2 desenvolvido por Liberalesso *et al.* (2021) com utilização de uso do solo local (10%) e melhoramento de propriedades relacionadas à retenção hídrica e manutenção da vegetação, a partir da adição de biocarvão de casca de arroz carbonizada (40%) e outros componentes (50%), como resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto;
- (b) substrato alternativo SC4 desenvolvido por Liberalesso *et al.* (2021) com utilização de uso do solo local (30%) e melhoramento de propriedades relacionadas à retenção hídrica e manutenção da vegetação, a partir da adição de biocarvão de casca de arroz carbonizada (20%) e outros componentes (50%) como resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto;
- (c) substrato comercial (SCOM) à base de turfa, marca comercial Garden Plus, uma opção comercial disponível na região, porém representando maior custo de aquisição e transporte; e
- (d) solo local (SOLO), obtido a partir da segunda camada de solo (horizonte A) do local onde os módulos foram instalados. Para aquisição do solo, foi descartada a camada superficial, com o propósito de evitar restos vegetais de outras vegetações que não a adotada para o experimento. O solo foi caracterizado em laboratório, e classificado como argissolo vermelho-amarelo, sendo encontrado em todo o território nacional. Esse solo apresentou 30% de argila em sua composição (LIBERALESSO, 2018), baixos teores de porosidade e restrições à fertilidade (EMPRESA..., 2022). Esse substrato representou a alternativa mais econômica para um telhado verde instalado no local.

A escolha da casca de arroz como aditivo justifica-se neste estudo por ser um importante passivo ambiental na região Sul do Brasil, com alto valor energético (MAYER; HOFFMANN; RUPPENTHAL, 2006; VLAEV; MARKOVSKA; LYUBCHEV, 2003), leve devido a sua elevada porosidade (GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004) e de difícil destinação por sua baixa densidade (LI *et al.*, 2011; Mayer; Hoffmann; Ruppenthal, 2006). O uso dos resíduos da construção civil não só reduz o uso excessivo de recursos naturais, mas também pode contribuir para melhorar o comportamento térmico e outras características dos substratos devido a sua baixa densidade (GRACSON *et al.*, 2014b; KAZEMI; COURARD; HUBERT, 2022). A vermiculita tem baixa condutividade térmica, ao mesmo tempo em que aumenta a retenção da água (SIMMONS, 2015), e o vermicomposto permite que, além do melhoramento de propriedades como a retenção de umidade no substrato (BERTRAND *et al.*, 2015; KIYASUDEEN; IBRAHIM; ISMAIL, 2020), sejam criadas condições nutricionais para o desenvolvimento da vegetação em condições limitadas como de telhados verdes extensivos (DE ALMEIDA; COLOMBO, 2021; JUSSELME *et al.*, 2019). As proporções volumétricas

utilizadas na formulação dos substratos alternativos e as características de porosidade dos substratos avaliados são apresentadas na Tabela 1.

Os módulos de telhado verde foram construídos em containers plásticos de 20 dm³ cada um, possuindo dimensões de 36 cm x 27 cm x 20 cm, sendo que, dos 20 cm de altura originais, foram utilizados 15 cm para geotêxtil, geomembrana, drenagem e substrato e o restante para acomodação da vegetação. Os módulos foram instalados lado a lado, a 1,5 m de altura com relação ao terreno, sobre bancada experimental de madeira, que foi devidamente nivelada (Figura 1a). Dois módulos não avaliados foram colocados nas extremidades laterais para evitar efeitos de borda nos módulos avaliados. O uso de sistemas de bancadas para investigações com módulos de telhados verdes tem sido amplamente empregado por diferentes autores (ARBOIT *et al.*, 2021; DE-VILLE; MENON, M.; STOVIN, 2018; QIN *et al.*, 2012; SKALA *et al.*, 2020; SNĚHOTA *et al.*, 2021; VARELA *et al.*, 2021).

Todos os módulos de telhados verdes foram construídos na mesma data, sendo que em cada módulo experimental foram simuladas as condições de um sistema multicamadas, sendo que do fundo para a superfície foram utilizados: uma camada de 10 mm de uma geomembrana drenante (MacDrain 2L), geotêxtil, 10 cm de substrato (um tipo de substrato para cada módulo) e a mesma densidade de vegetação (*Sedum rupestre*) (Figura 1). Toda a vegetação utilizada foi produzida especificamente para o experimento, e obtida a partir de mudas feitas por estaquia, e inicialmente cultivada em local próximo ao experimento; para o transplântio foram utilizadas mudas de porte similar em todos os módulos.

Uma descrição mais detalhada da concepção dos módulos de telhado verde pode ser encontrada em Liberalesso (2018) e Liberalesso *et al.* (2021). A Figura 2 mostra uma fotografia dos módulos instalados já sobre a bancada experimental, na qual se observa da esquerda para a direita da imagem, respectivamente, um módulo não monitorado, SOLO, SCOM, SC4, SC2, e módulo não monitorado. Na mesma imagem são indicadas as tubulações para a drenagem de fundo dos módulos, e aos fundos da imagem se observa também um conjunto de módulos não monitorados, que igualmente foram utilizados para evitar efeito de borda.

A instalação experimental foi realizada nas dependências do Campus Sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) no município de Santa Maria, RS, em uma área destinada ao grupo de pesquisa em modelagem hidroambiental e ecotecnologias. A área é aberta, em região elevada do terreno, cercada com tela de 1,2 m de altura, com vegetação rasteira composta de grama, tanto no interior da área quanto no entorno (é possível verificar na Figura 2 a cerca e a grama no entorno do experimento). O uso da grama no entorno garantiu que as condições de reflexão do calor do piso do entorno também fossem de uma superfície vegetada, com albedo similar ao obtido para o *Sedum rupestre* utilizado na instalação experimental (PALMEIRA, 2016). A edificação mais próxima encontra-se a aproximadamente 20 m e possui um pavimento, não provocando qualquer tipo de interferência no experimento (Figura 1b).

O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa), conforme a classificação de Köppen, com condições climáticas bastante adversas, com temperaturas médias máximas anuais de 25,3 °C e mínimas anuais de 14,7 °C (ROSSATO, 2011), sendo comum que durante o verão as máximas atinjam valores superiores a 30 °C, e durante o inverno haja temperaturas negativas. Do ponto de vista de precipitação, há boa distribuição dos volumes ao longo de todos os meses do ano, com média anual de, aproximadamente, 1.800 mm (INSTITUTO..., 2019).

Tabela 1 - Proporções volumétricas e porosidade dos substratos utilizados nos módulos de telhados verdes

Substratos (ID)	CAC (%)	Solo (%)	Outros (%)	Porosidade total (%)
SC2	40	10	50	68
SC4	20	30	50	62
SOLO	0	100	0	55
SCOM	0	0	100*	82

Nota: Legenda:

ID: Identificação;

CAC: casca de arroz carbonizada;

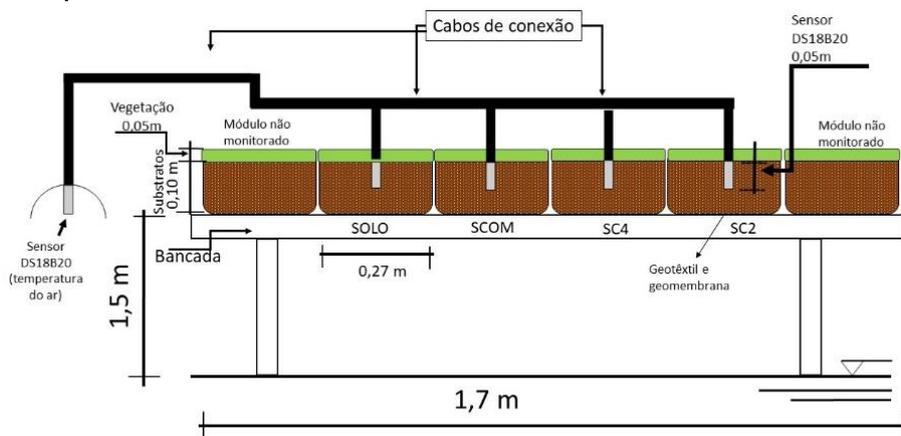
Outros: vermiculita (15%), resíduo da construção civil (20%) e vermicomposto (15%);

*substrato comercial a base de turfa (SCOM); e

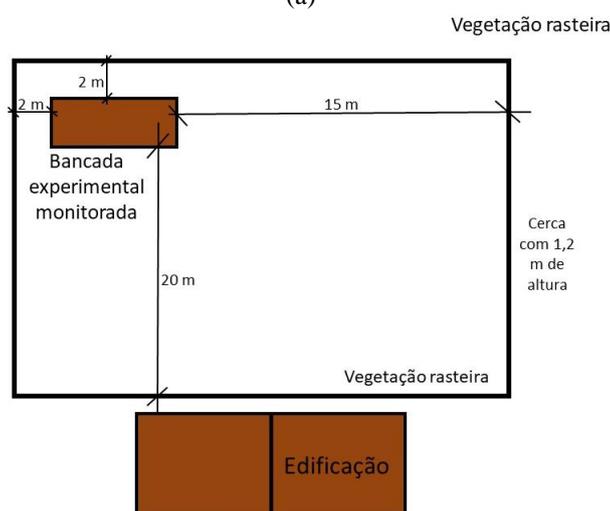
SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A).

Fonte: adaptado de Liberalesso (2018).

Figura 1 - Instalação experimental com esquema em (a) corte do arranjo experimental e b) planta de localização do experimento



(a)



(b)

Figura 2 - Visão dos módulos de telhados verdes avaliados e dispostos sobre a bancada experimental: SOLO, SCOM, SC4 e SC2



Monitoramento e tratamento de dados

O período de monitoramento da temperatura interna dos substratos, bem como da temperatura do ar, utilizado para fins de análise corresponde a abril de 2019 a março de 2020, abrangendo as quatro estações do ano, embora a instalação experimental tenha sido realizada anteriormente no ano de 2018. O período inicial de aclimação dos módulos de telhados verdes foi importante para assegurar que antes do início do monitoramento a vegetação de todos os módulos estivesse homogênea e com plena cobertura do substrato. Para o monitoramento da temperatura interna dos substratos, cada módulo recebeu um sensor de temperatura à prova d'água, do tipo DS18B20 com precisão de $\pm 0,5$ °C, previamente calibrado. Em todos os módulos o sensor foi posicionado 5 cm abaixo da superfície da camada do substrato (Figura 1a). Para o monitoramento da temperatura do ar (ambiente) local foi utilizado um sensor com mesma característica, posicionado a 1,5 m do solo (medição realizada na mesma altura da bancada experimental). Para evitar que esse sensor ficasse diretamente exposto à radiação solar, e essa interferisse no monitoramento, foi utilizada uma cúpula em isopor sem base, dentro da qual o sensor foi instalado, permitindo monitorar apenas a temperatura do ar. Para verificar a confiabilidade do sistema de monitoramento, foi realizada a consistência da temperatura do ar com os dados de temperatura obtidos na estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na UFSM. Todos os sensores foram conectados a uma placa microcontroladora Arduino UNO com dispositivo de memória *flash* (sd card) e intervalo de medição de 5 minutos. Paralelamente, foi realizada uma inspeção visual na cobertura vegetal dos módulos, a fim de verificar o estado da cobertura vegetal durante os meses monitorados.

Foi possível contar com 245 dias de monitoramento, para fins de análises – dias faltantes correspondem ao mês de janeiro de 2020, devido à necessidade de manutenção do sistema de monitoramento, e outros dias esporádicos, devido a interrupções no suprimento de energia elétrica. O dia 09/03/2019 foi escolhido para ilustrar o comportamento térmico do verão, devido à temperatura máxima do ar ter atingido valor elevado, próxima a 40 °C, compatível com extremos observados na região durante essa estação. Da mesma forma, o dia 15/08/2019 foi escolhido para ilustrar o comportamento térmico do inverno, quando a temperatura mínima do ar foi inferior a 10 °C.

Os potenciais benefícios térmicos de cada substrato foram avaliados por meio de índices térmicos, como a amplitude térmica, o atraso térmico, o amortecimento térmico e a taxa de temperatura externa. A partir do monitoramento foram realizadas as seguintes análises:

- variação da temperatura interna nos substratos em comparação com a temperatura do ar, em análise de longo prazo e sazonal;
- estatísticas descritivas das temperaturas como a média, máxima e mínima temperatura interna nos substratos e temperatura do ar, em análise de longo prazo e sazonal;
- variação da temperatura interna nos substratos em um dia típico de verão e de inverno; e
- índices de desempenho térmico, como a amplitude térmica, índice de amortecimento térmico, atraso térmico, e a taxa de temperatura externa (*External Temperature Ratio* – ETR), em análise mensal.

As Equações 1 e 2 foram utilizadas para determinar as amplitudes térmicas do ar (AT_{ar}) e dos substratos (AT_s), respectivamente; a Equação 3 para determinar o índice de amortecimento térmico de cada substrato (μ). Por fim, o atraso térmico diário de cada substrato foi determinado por meio da Equação 4.

$$AT_{ar} = T_{max}^{ar} - T_{min}^{ar} \quad \text{Eq. 1}$$

$$AT_s = T_{max}^{subst} - T_{min}^{subst} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\mu = \frac{AT_s}{AT_{ar}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\omega = H_{max}^{subst} - H_{max}^{T_{ar}} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

AT_{ar} a amplitude térmica do ar (°C);

T_{max}^{ar} e T_{min}^{ar} a temperatura máxima e mínima do ar, respectivamente (°C);

AT_s a amplitude térmica de cada substrato (°C);

T_{max}^{subst} e T_{min}^{subst} a temperatura máxima e mínima de cada substrato (°C), respectivamente, μ o amortecimento térmico (adm);

ω o atraso térmico de cada substrato (horas);

$H_{max}^{T_{ar}}$ e H_{max}^{subst} referem-se ao horário de ocorrência da temperatura máxima do ar e de cada substrato, respectivamente.

Para o amortecimento térmico, valores de μ próximos a 0 indicam maior amortecimento, enquanto valores próximos a 1 indicam que a amplitude térmica do substrato é próxima a do ar. O atraso térmico indica o tempo decorrido entre a ocorrência da temperatura máxima do ar e a temperatura máxima do substrato; dessa forma, quanto maiores os valores de ω , maior é a capacidade do substrato de atrasar a ocorrência de sua temperatura máxima.

A taxa de temperatura externa, ou *External Temperature Ratio* (ETR) (CASCONI *et al.*, 2019; KAVISKI, 2018), foi determinada a partir da Equação 5, que expressa a razão entre a temperatura máxima diária de cada substrato e a temperatura média do ar. Esse índice representa a mitigação do efeito da ICU devido à instalação do telhado verde. Portanto, valores reduzidos correspondem a maiores reduções sobre o efeito das ICUs (CASCONI *et al.*, 2019).

$$ETR = \frac{T_{max}^{subst}}{\bar{T}} \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo:

T_{max}^{subst} a temperatura máxima do substrato (°C); e

\bar{T} a temperatura média do ar (°C).

Para avaliar se houve diferença significativa entre temperaturas e índices térmicos determinados mensalmente e sazonalmente para os diferentes substratos, foi utilizado o teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5%. Todo o tratamento estatístico dos dados foi realizado com o uso do software R (R CORE TEAM, 2017).

Resultados e discussão

Comportamento térmico

Na Tabela 2 são apresentadas as médias mensais das temperaturas máximas, médias e mínimas ao longo do período de monitoramento, bem como os volumes de precipitação registrados (Pobs) na estação convencional 83936 do INMET desse período (INSTITUTO..., 2022), em comparação com a normal climatológica de Santa Maria (Pnormal). Merece ser destacado que durante o período de monitoramento, a média da temperatura máxima do ar foi de 27,6 °C, portanto, ligeiramente superior à média da temperatura máxima da normal climatológica de Santa Maria (25,4 °C), enquanto a média da temperatura mínima foi de 14,2 °C, bastante similar à média da temperatura mínima da normal climatológica (14,9 °C).

O volume de precipitação total durante o período de monitoramento foi bastante semelhante ao esperado, com base na Pnormal, embora tenham sido observados meses com totais acumulados que se diferem significativamente do valor de referência; por exemplo, em maio o volume de chuva foi 90% superior, enquanto em junho 74% inferior. É merecido destacar que durante todos os meses mais quentes (dezembro, fevereiro e março) o volume de precipitação foi inferior ao esperado, estando de 55% a 74% abaixo da Pnormal, reduzindo a disponibilidade hídrica para a vegetação.

A Figura 3 apresenta as temperaturas no ar e nos substratos durante todo o período de monitoramento. Por fim, na Figura 4 foram apresentados os valores médios das temperaturas máxima e mínima de cada substrato ao longo das quatro estações do ano.

Os quatro substratos de telhados verdes foram hábeis em reduzir significativamente as temperaturas máximas e elevar as temperaturas mínimas com relação à temperatura do ar ao longo dos meses de monitoramento, conforme verificado pelo teste de Skott-Knott (Tabela 2).

Em longo prazo, os valores de diferença média para as temperaturas máximas (Tabela 2) indicam o potencial significativo dos telhados verdes em manter a temperatura das coberturas e ou de ambientes internos em valores inferiores à temperatura do ar, com conclusões que corroboram os achados de outros autores (ASCIONE *et al.*, 2013; BESIR; CUCE, 2018; JAFFAL; OULDBOUKHITINE; BELARBI, 2012; PALMEIRA, 2016; NARDINI; ANDRI; CRASSO, 2012; PARIZOTTO; LAMBERTS, 2011; REYES *et al.*, 2016; SIMMONS *et al.*, 2008; TEEMUSK; MANDER, 2009; ZINZI; AGNOLI, 2012). O SCOM apresentou-se como o mais adequado para amenizar os efeitos das temperaturas máximas em longo prazo, com a maior diferença média de temperaturas máximas em relação à temperatura do ar (4,5 °C) (Tabela 2), sendo essa

diferença considerada estatisticamente distinta dos demais substratos avaliados, conforme comprovado pelo teste de Skott-Knott – o substrato que teve menor desempenho nesse sentido foi o SC4 (0,7 °C).

Também, a maior diferença entre a temperatura máxima absoluta do substrato e do ar foi encontrada no substrato SCOM (7,2 °C no mês de março). Ainda, esse substrato foi o único a apresentar uma temperatura máxima inferior à temperatura do ar em todos os meses monitorados (Tabela 2), sendo significativamente inferior durante os meses que compreendem o verão (dezembro, fevereiro e março) (Figura 4a e Tabela 2), com valores de 27,6 °C (SCOM), enquanto a temperatura do ar foi de 33,1 °C, indicando que esse substrato seria uma opção excelente para proporcionar isolamento térmico nos meses mais quentes. Embora não tenha sido realizado monitoramento no mês de janeiro, em razão de manutenção do sistema de monitoramento, a média de temperatura máxima do ar foi de 30,9 °C (obtida na estação do INMET) foi ligeiramente inferior às médias correspondentes aos meses de dezembro e fevereiro; assim, acredita-se que o comportamento das temperaturas durante o mês de janeiro seria similar.

Figura 3 - Monitoramento de longo prazo para temperatura do: (a) ar e dos substratos (b) SC2, (c) SC4, (d) SCOM e (e) SOLO

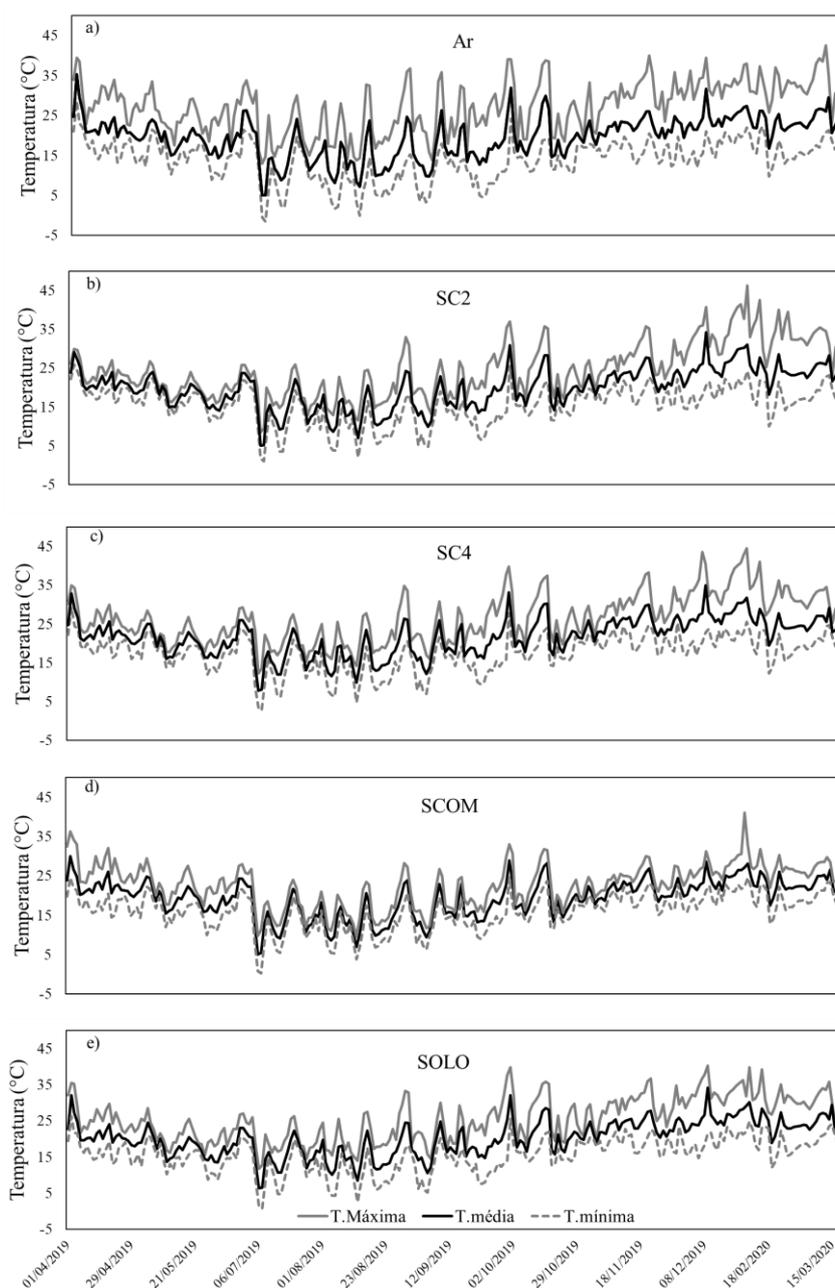


Tabela 2 - Valores médios mensais de temperatura máxima, média e mínima do ar e dos substratos SC2, SC4, SCOM e SOLO (°C)

Mês	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Med*	Dif.Méd**
Ano	2019						2020							
Pobs	210,4	260,2	34,3	174	91,3	89,8	460,3	161,4	73	57,2	39,8	150,2	-	
Pnormal	151,1	136,6	132,7	147,3	114,4	155,3	203,2	136	161,5	131,7	142	146,5	-	
AR	Máx	29,4a	24,8a	26,7a	19,9a	22,5a	25,2a	26,7a	30,0a	32,4a	32,9b	33,5a	27,6a	-
	Méd	22,6a	19,1a	19,6a	13,5a	14,3a	16,3b	19,8a	22,1c	23,2b	23,6b	24,2a	19,8b	-
	Mín	17,7b	15,4b	15,3a	9,0a	7,9b	9,8b	14,6b	16,5c	15,8c	17,3a	17,3b	14,2c	-
SC2	Máx	24,0c	20,5c	21,2b	17,3b	19,1b	22,0b	24,6a	27,0b	32,1a	36,2a	31,9b	25,1c	2,5b
	Méd	21,7a	18,6a	18,9a	13,6a	14,4a	16,7b	20,2a	22,5c	24,7a	25,7a	24,5a	20,1b	-0,3b
	Mín	19,3a	16,6a	16,6a	10,2a	9,9a	11,6b	16,1b	18,5b	17,8b	18,5a	19,0a	15,8b	-1,6a
SC4	Máx	26,5b	22,3b	24,3a	19,7a	21,8a	24,4a	27,2a	29,6a	33,8a	35,5a	30,7b	26,9a	0,7d
	Méd	23,2a	20,0a	20,7a	16,0a	17,0a	19,1a	22,7a	25,0a	26,6a	26,4a	25,3a	22,0a	-2,2d
	Mín	19,9b	17,5a	17,8a	12,6a	12,5a	14,0a	18,7a	21,0a	20,2a	19,9a	20,7a	17,7a	-3,5c
SCOM	Máx	27,5a	22,8b	23,6a	16,1b	17,3b	19,3c	22,7a	24,2c	25,9b	28,6c	26,3c	23,1d	4,5a
	Méd	22,6a	19,6a	19,6a	13,4a	14,1a	16,1b	19,6a	21,5c	22,7b	23,8b	23,1b	19,6b	0,2a
	Mín	18,1b	16,4a	16,2a	10,7a	11,1a	12,7a	16,6b	18,9b	18,8b	19,6a	20,0a	16,3b	-2,1b
SOLO	Máx	26,2b	21,2c	22,3b	18,7a	21,0a	23,5a	26,6a	29,1a	32,8a	32,5b	30,4b	25,8b	1,8c
	Méd	21,5a	18,0a	18,0a	14,6a	15,5a	17,6a	21,4a	23,5b	25,1a	25,3a	24,9a	20,5b	-0,6c
	Mín	17,3b	15,0b	14,9a	11,0a	10,5a	12,2a	16,9b	19,1b	18,3b	19,5a	20,1a	15,9b	-1,6a

Nota: Variáveis seguidas de mesma letra na coluna, conforme a classe de temperatura (máxima, média e mínima) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

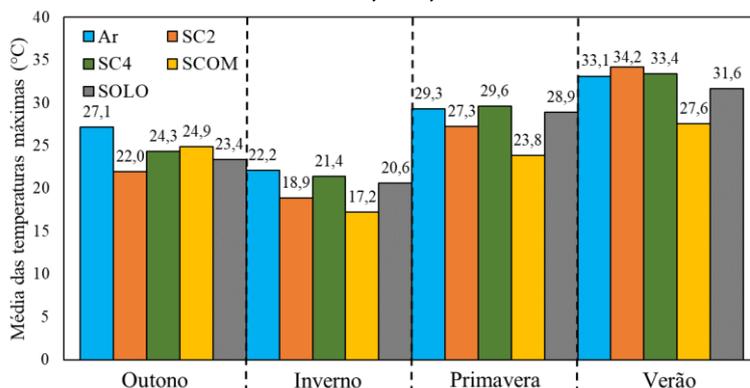
Pobs: Precipitação observada durante o período de monitoramento.

Pnormal: Precipitação média da normal climatológica.

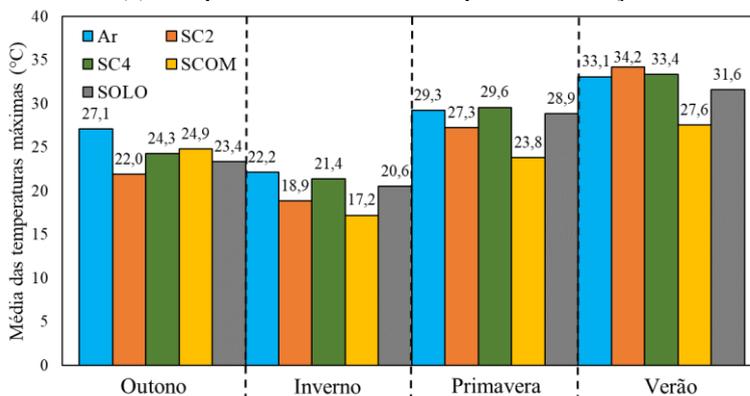
*Méd: média de longo prazo dentre os meses monitorados.

**Dif. Méd. refere-se à média das diferenças entre a temperatura de cada substrato e temperatura do ar, sendo que valores negativos indicam um aumento na temperatura do substrato em relação à temperatura do ar.

Figura 4 - Temperaturas do ar e dos substratos SC2, SC4, SCOM e SOLO



(a) Temperatura máxima média para cada estação



(b) Temperatura mínimas média para cada estação

Nota: médias seguidas de mesma letra para cada estação do ano não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Em todos os módulos houve variação de biomassa ao longo do período de monitoramento, e exposição parcial dos substratos durante o verão, em função das próprias características de plasticidade fenotípica do *Sedum rupestre* (CUSHMAN, 2001). A Figura 5 apresenta a situação da cobertura vegetal em três momentos do monitoramento. A partir da condição inicial (Figura 5a) é possível verificar as mudanças de coloração, alongamento e presença de flores na primavera durante a fase reprodutiva (Figura 5b), e encurtamento de galhos e aumento do tamanho das folhas como estratégia de sobrevivência durante o verão (Figura 5c), em função dos baixos volumes de precipitação e elevadas temperaturas do ar.

Nessas condições, a temperatura máxima interna dos substratos SC2 e SC4 superou a temperatura do ar (Tabela 2 e Figura 4a), mostrando a menor adequabilidade desses substratos em períodos mais quentes. Possivelmente, a menor capacidade de retenção de umidade em logo prazo desses dois substratos (LIBERALESSO *et al.*, 2021) tenha contribuído para a menor ação isolante destes. De fato, alguns autores mencionam que substratos que conseguem reter maior teor de umidade durante condições adversas atuam mais eficientemente como reguladores térmicos (BEVILACQUA *et al.*, 2017; JIM; PENG, 2012; PIMENTEL, 2022). Assim, as formulações de substratos alternativos à base de CAC poderiam ser aprimoradas para melhorar a capacidade de retenção de umidade a partir da adição de CAC em proporção superior a 50%, conforme a recomendação de Liberalesso *et al.* (2021).

No dia típico de verão (09/03/2020), a temperatura máxima do ar foi de 39,3 °C (Figura 6), enquanto as temperaturas máximas nos substratos dos telhados verdes foram de 35,5 °C (SC2), 34,0 °C (SOLO), 33,8 °C (SC4) e 28,5 °C (SCOM). Destaca-se, portanto, o SCOM com uma diferença entre sua temperatura interna e temperatura do ar superior a 10 °C. Também, pode-se observar que nas primeiras horas do dia a temperatura do ar era menor, em relação à temperatura no interior dos substratos, atingindo seu valor mínimo (17 °C) às 6 horas, enquanto os substratos apresentaram temperaturas mínimas mais elevadas de 19,3 °C (SC2), 21 °C (SOLO), 21,3 °C (SCOM e SC4), demonstrando o efeito do amortecimento térmico nos substratos dos telhados verdes, especialmente para SCOM e SC4.

Figura 5 - Cobertura vegetal durante o (a) início, (b) meio e (c) fim do monitoramento

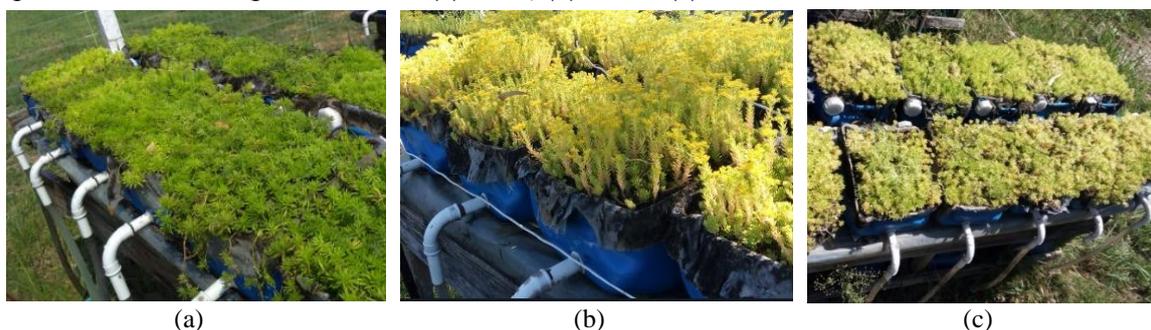
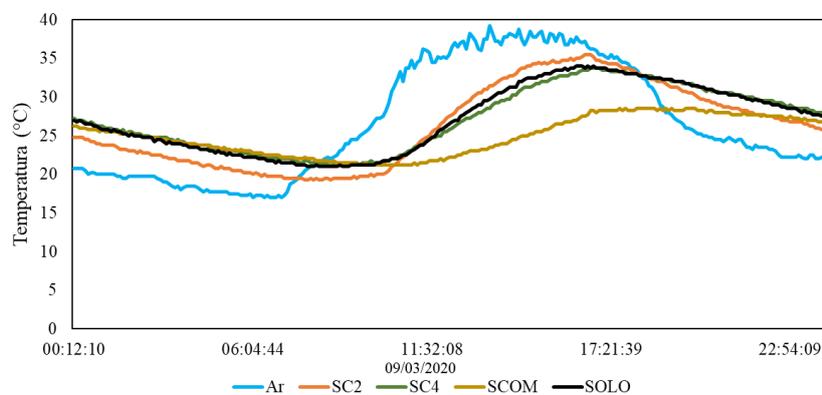


Figura 6 - Temperatura do ar e dos substratos em um dia típico de verão



Com relação às temperaturas mínimas, e considerando a análise em longo prazo, a temperatura mínima do ar apresentou-se significativamente menor que a temperatura mínima no interior dos substratos (Tabela 2). O substrato SC4 apresentou o maior valor médio de temperatura mínima dentre os substratos avaliados (17,7 °C), bem como o maior valor de diferença média para a temperatura mínima (-3,5 °C), sendo essas diferenças estatisticamente significativas em comparação com as temperaturas do ar de dos demais substratos (Tabela 2).

Quando analisados sazonalmente, nos meses de inverno (julho, agosto e setembro), os substratos também apresentaram temperaturas mínimas superiores às do ar, com destaque para o substrato SC4, que apresentou a maior temperatura mínima durante o inverno (13 °C), sendo estatisticamente distinta das temperaturas mínimas dos demais substratos, conforme identificado no teste de Skott-Knott (Figura 4b). Ainda, esse substrato apresentou a maior diferença de temperatura mínima absoluta com relação à temperatura do ar no mês de agosto (4,6 °C). Assim, essa análise baseada em temperaturas indica que em períodos de inverno esse substrato poderia ser considerado o mais adequado dentre os avaliados; no entanto, observando o período de verão previamente analisado, foi possível identificar que se o pretendido fossem os benefícios térmicos em ambas as estações, esse substrato não teria sido indicado, dado seu baixo desempenho (com redução de menos de 1 °C nas temperaturas máximas).

Para ilustrar o comportamento térmico dos substratos em um dia representativo do inverno, foi escolhido o dia 15/08/2019, quando a temperatura mínima do ar atingiu 6 °C às 6 horas (Figura 7), e a temperatura máxima foi de 21,3 °C, por volta das 14 horas. As temperaturas mínimas nos substratos foram de 6,8 °C (SC2), 7,0 °C (SCOM), 7,5 °C (SOLO) e 9,3 °C (SC4), com ocorrência posterior à temperatura mínima do ar, enquanto as máximas temperaturas nos substratos foram de 14,3 °C (SCOM), 17,3 °C (SC2), 19,8 °C (SOLO) e 20 °C (SC4). Assim, a análise desse dia confirma as evidências identificadas na análise de longo prazo, mostrando que o substrato SC4 contribuiu de maneira positiva para a preservação de maiores temperaturas no módulo de telhado verde.

Índices de desempenho

Na Tabela 3 e Figura 8 são apresentados os resultados para a análise dos índices de desempenho térmico dos substratos, quando considerados amplitude (A_T), amortecimento térmico (μ) e atraso térmico (ω), além da razão de temperatura externa (ETR).

Os substratos analisados foram capazes de reduzir significativamente a amplitude da temperatura interna, em comparação com a amplitude da temperatura do ar (média de longo prazo de 13,4 °C), como pode ser visto na Tabela 3 e na Figura 8a. Os substratos apresentaram amplitudes de 10 °C (SOLO), 9,3 °C (SC2), 9,2 °C (SC4) e 6,8 °C (SCOM), sendo estatisticamente diferentes na quase totalidade dos meses analisados. Entretanto, durante o mês de fevereiro, os substratos SC2 e SC4 apresentaram amplitude térmica equivalente àquela do ar (Tabela 3), possivelmente em razão da redução da vegetação, exposição do substrato, aumento das perdas por evaporação e redução da umidade interna. Como *et al.* (2017) mencionam que a umidade interfere na amplitude térmica do substrato, por exemplo. Dessa forma, substratos que apresentem maior capacidade de manutenção da umidade mesmo em condições adversas atuam mais eficientemente como reguladores térmicos (BEVILACQUA *et al.*, 2017; JIM; PENG, 2012; PIMENTEL, 2022).

Figura 7 - Temperatura do ar e dos substratos em dia típico de inverno

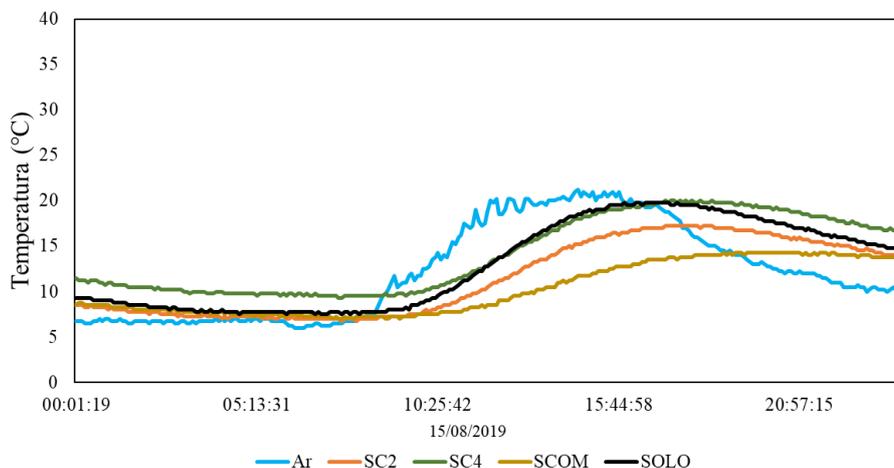
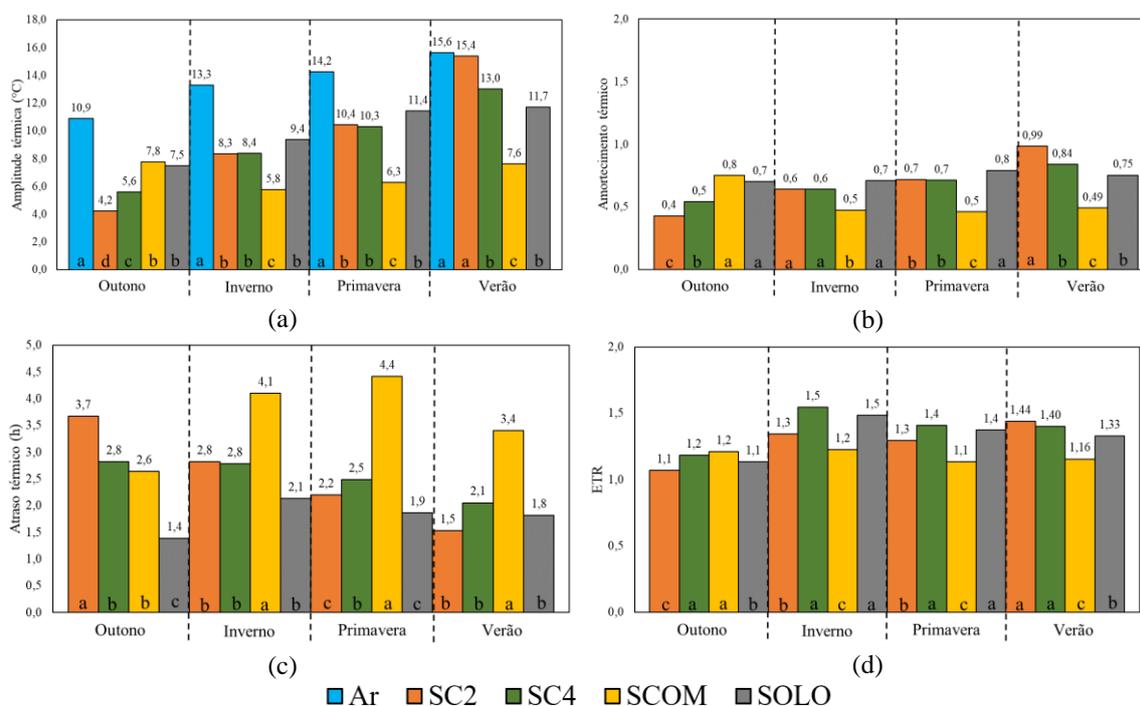


Tabela 3 - Valores de amplitude térmica (A_T), amortecimento térmico (μ), atraso térmico (ω) e ETR para cada substrato durante o período de monitoramento

Índice	Ano	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Fev	Mar	Méd*
		2019						2020					
AR	A_{Tar} (°C)	11,7a	9,6a	11,3a	10,9a	14,6a	15,3a	12,1a	13,5a	16,6a	15,6a	16,2a	13,4a
	A_{TS} (°C)	4,7d	3,8c	4,5c	7,1b	9,2b	10,5b	8,6b	8,6b	14,3a	17,8a	12,9b	9,3c
SC2	μ	0,4c	0,4c	0,5a	0,7a	0,6b	0,7a	0,7a	0,6b	0,9a	1,1a	0,8a	0,7b
	ω (h)	4,0a	3,5a	3,4a	2,7a	2,5b	3,0b	2,4b	2,3b	1,9b	1,8b	1,4c	2,6b
	ETR	1,1c	1,1b	1,1b	1,3a	1,4b	1,4b	1,2b	1,2b	1,4a	1,5a	1,3a	1,3c
SC4	A_{TS} (°C)	6,6c	4,6c	6,4b	7,1b	9,3b	10,4b	8,6b	8,7b	13,6a	15,7a	10,0c	9,2c
	μ	0,6b	0,5b	0,8a	0,7a	0,6b	0,7a	0,7a	0,6b	0,8a	1,0a	0,6b	0,7b
	ω (h)	2,8b	2,8b	2,8b	2,8a	2,5b	2,8b	2,8b	2,5b	2,4b	2,0b	2,3b	2,6b
SCOM	ETR	1,2b	1,2a	1,3a	1,6b	1,6a	1,5a	1,4a	1,3a	1,5a	1,5a	1,3a	1,4a
	A_{TS} (°C)	9,4b	6,5b	7,4b	5,4b	6,2c	6,6c	6,0b	5,3c	7,0b	8,9c	6,3d	6,8d
	μ	0,8a	0,7a	0,8a	0,5b	0,4c	0,5b	0,5b	0,4c	0,4b	0,6c	0,4c	0,6c
SOLO	ω (h)	2,3b	2,6b	3,1a	2,8a	4,2a	4,9a	4,7a	4,4a	4,4a	3,3a	3,7a	3,7a
	ETR	1,2a	1,2a	1,2b	1,3b	1,2c	1,2c	1,2c	1,1c	1,1b	1,2c	1,1b	1,2d
	A_{TS} (°C)	9,0b	6,3b	7,4b	7,7b	10,5b	11,3b	9,7a	10,0b	14,5a	13,1b	10,3c	10,0b
SOLO	μ	0,8a	0,6a	0,8a	0,7a	0,7a	0,7a	0,8a	0,7a	0,9a	0,8b	0,6b	0,7a
	ω (h)	1,2c	1,4c	1,6c	2,2a	1,5c	2,5b	2,2b	1,9b	1,7c	1,8b	2,0b	1,8c
	ETR	1,2b	1,1b	1,1a	1,5a	1,5a	1,5a	1,4a	1,3a	1,4a	1,4b	1,3a	1,3b

Nota: médias seguidas de mesma letra na coluna, conforme o índice de desempenho (amplitude térmica, amortecimento térmico, atraso térmico e ETR), não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. *Méd: média de longo prazo dentre os meses monitorados.

Figura 8 - Desempenho dos telhados verde com relação a: (a) amplitude térmica, (b) amortecimento térmico, (c) atraso térmico e (d) ETR mensais



Nota: médias seguidas de mesma letra na estação do ano não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Com relação ao amortecimento térmico (Figura 8b), o substrato SCOM apresentou o melhor desempenho ao longo do período monitorado (Tabela 3). Foram observados valores significativamente distintos para esse substrato (0,6) em comparação aos demais substratos, que apresentaram amortecimento térmico de 0,7. Valores semelhantes de amortecimento térmico em substratos de telhados verdes também foram encontrados por Liz (2016), que correlacionou os menores valores de amortecimento térmico com maiores tempos de atraso térmico.

O atraso térmico (Figura 8c) apresentou valores médios de longo prazo iguais a 3,7 horas (SCOM), 2,6 horas (SC2 e SC4) e 1,8 hora (SOLO). Esses resultados vão ao encontro de observações feitas por outros autores (ALMAAITAH; JOKSIMOVIC, 2022; CASCONE *et al.*, 2018; CASCONE, 2022; JIM; PENG, 2012; KOSTADINOVIC *et al.*, 2022), em que se verifica a ocorrência de um atraso temporal nas temperaturas máximas na camada de substrato de telhados verdes. Em longo prazo há uma diferença significativa de atraso térmico de aproximadamente 2 horas, entre os substratos SCOM e SOLO (Tabela 3), demonstrando a influência da composição do substrato na capacidade de atrasar a ocorrência das temperaturas máximas, e o melhor desempenho de SCOM nesse aspecto. Nessa mesma escala temporal de análise não foram verificadas diferenças significativas nos atrasos térmicos dos substratos SC2 e SC4 (Tabela 3).

Quando avaliado o índice ETR (Figura 8d), o substrato SCOM apresentou menor média de longo prazo (1,2), indicando o seu significativo potencial mitigador das ICUs (Tabela 3). Ainda, entre os substratos alternativos ao comercial, os substratos SC2 e SOLO se destacaram, apresentando os menores valores para este índice (1,3), sendo estatisticamente distintos entre si, seguido pelo substrato SC4 (1,4). Adicionalmente, a média dos valores de ETR dos substratos foram menores para os meses de verão (1,3) e maiores para os meses de inverno (1,4). Devido ao seu equacionamento (Equação 5), e por sua finalidade na indicação da mitigação das ICUs, é compreensível que os valores de ETR sejam maiores durante o inverno e menores o verão. O mesmo padrão foi encontrado por outros autores (BEVILACQUA *et al.*, 2017; CASCONE *et al.*, 2019), com valores mais elevados para o inverno e menores para o verão. Também, Cascone *et al.* (2019) ressaltam a dependência do tipo de substrato para os diferentes resultados obtidos para esse índice, e como estes podem ser manejados para minimização de fenômenos de ICUs.

A análise para os dias típicos mostra que para o verão (Figura 6) foram observadas amplitudes térmicas de 16,3 °C (SC2) 13 °C (SOLO), 12,5 °C (SC4) e 7,3 °C (SCOM), sendo inferiores à amplitude térmica do ar (22,3 °C). O substrato SCOM apresentou o melhor amortecimento térmico no dia típico de verão (0,3), enquanto os demais substratos tiveram valores de 0,6 (SC4 e SOLO) e 0,7 (SC2). O atraso térmico observado no dia típico de verão foi de 4,4 horas (SCOM), 3,3 horas (SC4), 3,1 horas (SC2) e 2,8 horas (SOLO) (Figura 6). Valores de ETR observados durante o dia 09/03/2020 variaram entre 1,1 (SCOM) e 1,3 (SC2, SC4 e SOLO). Já para o dia típico de inverno (Figura 7), os substratos apresentaram amplitudes térmicas inferiores à amplitude térmica do ar (15,3 °C), sendo 12,3 °C (SOLO), 10,8 °C (SC4), 10,5 °C (SC2) e 7,3 °C (SCOM). Em decorrência de tais amplitudes, os valores de amortecimento térmico no dia 15/08/2019 foram de 0,5 (SCOM), 0,7 (SC2 e SC4) e 0,8 (SOLO). Foram observados atrasos térmicos de 4,5h (SCOM), 2,5h (SC2 e SC4) e 1,4h (SOLO). O substrato SCOM destacou-se com relação ao índice ETR no dia típico de inverno (com ETR igual a 1,2), enquanto os demais substratos apresentaram valores de 1,6 (SC4 e SOLO) e 1,4 (SC2).

Assim, verifica-se também por meio da análise dos índices de desempenho térmico que o substrato comercial teve melhores resultados, com relação aos demais substratos avaliados. Já para os substratos com adição de CAC, estes se mostraram com melhor desempenho térmico se comparados ao substrato SOLO, sem nenhum tipo de melhoramento.

Discussão

Neste estudo foi avaliado como quatro diferentes substratos influenciaram o desempenho térmico de módulos de telhados verdes, por meio da comparação de temperaturas internas e índices térmicos ao longo de um ano. Considerando valores de temperatura médios de longo prazo, todos os substratos avaliados foram capazes de reduzir as temperaturas máximas e amplitudes térmicas em relação ao ar, com destaque para o substrato comercial SCOM, seguido pelos substratos SC2, SOLO e SC4. Da mesma forma, os substratos avaliados foram capazes de elevar as temperaturas mínimas em relação ao ar, com destaque para o substrato SC4, seguido pelos substratos SCOM, SOLO e SC2. Para os demais índices (amortecimento térmico, atraso térmico e ETR) verificou-se que o substrato SCOM teve desempenho estatisticamente superior aos demais substratos avaliados. As propriedades desse substrato como maior porosidade e maior capacidade de retenção de umidade (LIBERALESSO *et al.*, 2021), somada à maior proporção de matéria orgânica, foram determinantes para o

bom desempenho térmico, assim como encontrado em outros estudos (SANDOVAL *et al.*, 2017; CASCONE *et al.*, 2018).

Os resultados também mostram a importância do monitoramento de longo prazo e a análise de diferentes índices de desempenho térmico, visto que as conclusões do trabalho poderiam diferir se os períodos de monitoramento fossem restritos a uma ou outra estação, e as análises baseadas meramente em diferenças de temperaturas. Por exemplo, no verão, o SCOM teve desempenho térmico superior aos demais substratos avaliados. Dentre os substratos alternativos ao comercial, o SC2 teve desempenho superior nessa estação, proporcionando uma redução de aproximadamente 10% nas temperaturas internas do telhado verde, em relação à temperatura do ar. Já se o monitoramento fosse restrito ao inverno, os resultados indicariam que, embora nos quatro sistemas avaliados a temperatura mínima no interior dos substratos tenha sido superior à temperatura do ar, o SC4 seria uma alternativa mais apropriada, com temperatura interna 46% maior que a temperatura do ar, um desempenho contrastante com relação aos demais substratos, mostrando o potencial de isolamento térmico também em períodos frios (ASCIONE *et al.*, 2013; COLLINS *et al.*, 2017; SCHADE; LIDELÖW; LÖNNQVIST, 2021; TANG; QU, 2016). No entanto, ao adicionar à análise os indicadores de desempenho térmico como o amortecimento térmico, atraso térmico e ETR, foi possível identificar notada superioridade do SCOM.

De qualquer forma, verificou-se em condições de extremos de temperatura característicos do Sul do Brasil como as diferentes características dos substratos podem proporcionar diferentes benefícios térmicos, tanto no inverno quanto no verão. Como ainda não existe normativa técnica para a elaboração de substratos de engenharia no Brasil, identifica-se a necessidade de futuras pesquisas voltadas para o desenvolvimento de substratos para telhados verdes que podem ser adaptados para atender às necessidades de diferentes regiões climáticas, maximizando os benefícios pretendidos em condições específicas (DUARTE *et al.*, 2015; FERRAZ, 2012; JAFFAL *et al.*, 2012; MATHEUS *et al.*, 2016) e, preferencialmente, com o uso de materiais locais (AMPIM *et al.*, 2010; CASCONE, 2022; FARRELL *et al.*, 2012; MOLINEUX *et al.*, 2009; VIJAYARAGHAVAN 2016; XUE; FARRELL, 2020). Adicionalmente, é importante especial atenção ao uso de substratos obtidos a partir de solo local sem nenhum tipo de melhoramento, como o substrato SOLO avaliado neste trabalho. Embora a utilização do argissolo local fosse a opção inicialmente mais atrativa e viável devido à rápida disponibilidade e baixo custo, verificou-se o seu baixo desempenho com relação aos aspectos térmicos avaliados, sendo que seu uso seria recomendável apenas na impossibilidade de utilização de uma alternativa mais adequada.

É importante mencionar também que o potencial de isolamento térmico de um telhado verde depende do percentual de cobertura da vegetação, além das características do substrato, que conjuntamente afetam a transferência de calor entre o telhado verde e a atmosfera (JAFFAL; OULDBOUKHITINE; BELARBI, 2012; TEEMUSK; MANDER, 2009), devido ao efeito de sombreamento, que limita as perdas por evapotranspiração e constitui barreira física contra a radiação solar (AGUIAR; ROBINSON; FRENCH, 2019; ARBOIT *et al.*, 2021; BOLLMAN *et al.*, 2021; JIM 2012; OBERNDORFER *et al.*, 2007; PALMEIRA, 2016; PIMENTEL, 2022; SPEAK *et al.*, 2013; YAGHOUBIAN; SREBRIC, 2015). Espécies de *Sedum*, como a utilizada nesse trabalho, consistem na escolha mais comum de plantas para telhados verdes extensivos, por conta de suas características únicas: crescem com raízes relativamente rasas, são capazes de armazenar água, e possuem metabolismo ácido crassuláceo (CAM) para reduzir a perda de água por evapotranspiração em condições extremas (MACLVOR; LUNDHOLM, 2011; VAN WOERT *et al.*, 2005). Assim, é de se esperar que as diferentes taxas evapotranspirativas da *Sedum rupestre* ao longo das estações do ano (ARBOIT *et al.*, 2021) juntamente com as demais variáveis meteorológicas constituíram-se em elemento notável no comportamento térmico, devido à dissipação do calor latente para o ambiente externo (ARBOIT *et al.*, 2021; CASCONE *et al.*, 2019; CHEN, 2022; SCHWEITZER; ERELL, 2014; YANG; DAVIDSON; ZHANG, 2021), e isso se traduziu na variabilidade de resultados encontrados ao longo do período de estudo.

O presente estudo teve como limitação a análise sinérgica da interação água-solo-planta-atmosfera, que influencia o comportamento térmico de telhados verdes. Sabe-se que variáveis climatológicas, como radiação solar, insolação total diária e umidade do ar exercem influência nas taxas de evapotranspiração, interferindo na umidade do substrato (ARBOIT *et al.*, 2021; PALMEIRA 2016; CHEN, 2022; CITAKOGLU *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2022). Assim, além da composição dos substratos, esses elementos irão condicionar o desempenho térmico dos telhados verdes. Os resultados apresentados neste estudo não contemplam essa complexa interrelação, embora a vegetação utilizada nos módulos de telhado verde bem como as condições climáticas tenham sido as mesmas; portanto, sugerem-se pesquisas futuras que incorporem tais variáveis nos conjuntos experimentais, de forma a complementar os resultados aqui apresentados.

Conclusão

O uso de telhados verdes vem sendo incentivado no Brasil, em função dos diferentes benefícios que estes desempenham, a exemplo do isolamento térmico nas coberturas das edificações. No entanto, a falta de normativa técnica e diversidade climática do país pode conduzir a soluções que limitem o pleno cumprimento dos benefícios esperados.

Neste trabalho foi avaliado o potencial de isolamento térmico de quatro diferentes substratos de telhados verdes extensivos. Análises de temperaturas e diferentes índices de desempenho térmico foram utilizados para investigar como os diferentes substratos se comportaram ao longo de diferentes condições climáticas. Os substratos testados se mostraram adequados para aumentar a inércia térmica dos módulos de telhados verdes e em longo prazo teriam ação positiva em retardar e reduzir os fluxos de calor para o interior das edificações, minimizando os custos com resfriamento e aquecimento.

No entanto, os resultados ressaltam a importância da escolha criteriosa da composição do substrato para melhorar o desempenho térmico dos telhados verdes, especialmente com condições de extremos de temperatura, como os períodos mais quentes e mais frios. O substrato comercial à base de turfa (SCOM), com maior porosidade, maior capacidade de retenção de umidade e maior proporção de matéria orgânica produziu os melhores resultados nesse sentido. Todavia, substratos comerciais podem apresentar elevado custo de aquisição, além de baixa disponibilidade em locais distantes dos centros urbanos, o que muitas vezes inviabiliza sua utilização, e solos locais passam a ser atrativos. O uso de substratos à base de solos com altos teores de argila e baixa porosidade, sem nenhum tipo de melhoramento, a exemplo do substrato SOLO, seria desaconselhado, em função de seu baixo potencial de isolamento térmico verificado ao longo de todas as estações. Assim, a incorporação de alguns aditivos, a exemplo do biocarvão da casca de arroz, vermiculita, vermicomposto e resíduos da construção civil utilizados nos substratos SC2 e SC4, permitiu melhorar as propriedades do solo local, promovendo melhores benefícios térmicos.

Dessa forma, destaca-se o grande potencial para a realização de diferentes estudos que considerem a melhoria de solos locais visando sua utilização em coberturas verdes, especialmente aqueles que utilizam melhoramentos oriundos de passivos ambientais. Os resultados deste trabalho também reforçam a importância do monitoramento de longo prazo, que abrangeu diferentes estações do ano, e que conduziu a conclusões e interpretações mais precisas sobre o comportamento térmico dos substratos avaliados. Assim, destaca-se também a relevância de estudos dessa natureza, especialmente em locais com forte influência sazonal.

Referências

- AGUIAR, A. C.; ROBINSON, S. A.; FRENCH, K. Friends with benefits: the effects of vegetative shading on plant survival in a green roof environment. **PloS one**, v. 14, n. 11, p. e0225078, 2019.
- AKBARI, H.; KOLOKOTSA, D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 834-842, 2016.
- ALBERTO, E. Z. *et al.* Estudo do telhado verde nas construções sustentáveis. In: SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS, 12., São Paulo, 2012. **Anais [...]** São Paulo: SHEWC, 2012.
- ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, p. 480-493, 2008.
- ALMAAITAH, T.; JOKSIMOVIC, D. Hydrologic and thermal performance of a full-scale farmed blue-green roof. **Water**, v. 14, n. 11, p. 1700, 2022.
- AMPIM, P. A. Y. *et al.* Green Roof Growing media: Types, ingredients, composition and properties. **Journal of Environmental Horticulture**, v. 28, n. 4, p. 244-252, 2010.
- ARBOIT, N. K. S. *et al.* Green roof evapotranspiration rates and stormwater control under subtropical climate: a case study in Brazil. **RBRH**, v. 26, 2021.
- ASCIONE, F. *et al.* Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? **Applied Energy**, n. 104, p. 845-859, 2013.
- BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A.; GHAFARIANHOSEINI, A State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, p. 411-428, 2014.
- BERTRAND, M. *et al.* Earthworm services for cropping systems: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 553-567, 2015.

- BESIR, A. B.; CUCE, E. Green roofs and facades: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 915-939, 2018.
- BEVILACQUA, P. *et al.* Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern Mediterranean climate. **Energy and Building**, v. 150, p. 318-327, 2017.
- BEVILACQUA, P.; MAZZEO, D.; ARCURI, N. Thermal inertia assessment of an experimental extensive green roof in summer conditions. **Building and Environment**, v. 131, p. 264-276, 2018.
- BOLLMAN, M. A. *et al.* Effects of shading and composition on green roof media temperature and moisture. **Journal of Environmental Management**, v. 281, p. 111882, 2021.
- BOSCH, M. V. D.; SANG, A. O. Urban natural environment as nature-based solutions for improved public health- A systematic review of reviews. **Environmental Research**, v. 158, p. 373-384, 2017.
- BOWLER, D. E. *et al.* Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, p. 147-155, 2010.
- CARLSON, T. N. *et al.* Satellite Estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. **Journal of Applied Meteorology**, v. 20, n. 1, p. 67-87, 1981.
- CASCONE, S. *et al.* Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations. **Building Simulation**, v. 12, n. 3, p. 379-393, 2019.
- CASCONE, S. *et al.* A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. **Building and Environment**, v. 136, p. 227-239, 2018.
- CASCONE, S. The energy-efficient design of sustainable green roofs in mediterranean climate: an experimental study. **Energy and Buildings**, v. 273, p. 112427, 2022.
- CHEN, H. *et al.* Biochar improves sustainability of green roofs via regulate of soil microbial communities. **Agriculture**, v. 11, n. 7, p. 620, 2021.
- CHEN, H. *et al.* Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 333-342, 2018.
- CHEN, P. Y. Effects of meteorological variables and substrate moisture on evapotranspiration and thermal performance of a green roof in a subtropical climate. **Ecological Engineering**, v. 180, p. 106663, 2022.
- CITAKOGLU, H. *et al.* Estimation of monthly mean reference evapotranspiration in Turkey. **Water Resources Management**, v. 28, n. 1, p. 99-113, 2014.
- COLLINS, S. *et al.* Thermal behavior of green roofs under Nordic winter conditions. **Building and Environment**, v. 122, p. 206-214, 2017.
- COMA, J. *et al.* Thermal characterization of different substrates under dried conditions for extensive green roofs. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 175-180, 2017.
- COSTA, J.; COSTA, A.; POLETO, C. Telhado verde: redução e retardo do escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais**. v. 14, n. 2, p. 50-56, 2012.
- COSTANZO, V.; EVOLA, G.; MARLETTA, L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 247-255, 2016.
- CUSHMAN, J. C. Crassulacean acid metabolism: a plastic photosynthetic adaptation to arid environments. **Plant physiology**, v. 127, n. 4, p. 1439-1448, 2001.
- DE ALMEIDA, M. A.; COLOMBO, R. Construction of green roofs via using the substrates made from humus and green coconut fiber or sugarcane bagasse. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 22, p. 100477, 2021.
- DE LUCIA, M.; TREVES, A.; COMINO, E. Rice husk and thermal comfort: design and evaluation of indoor modular green walls. **Developments in the Built Environment**, v. 6, p. 100043, 2021.
- DE-VILLE, S.; MENON, M.; STOVIN, V. Temporal variations in the potential hydrological performance of extensive green roof systems. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 564-578, 2018.
- DUARTE, D. *et al.* The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224-239, 2015.

- EKSI, M. *et al.* Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal properties. **Energy and Buildings**, v. 145, p. 174-187, 2017.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Argissolos vermelhos-amarelos**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn0pzmhe02wx5ok0liq1mqk4130gy.html. Acesso em: 12 jul. 2022.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reducing urban heat islands: compendium of strategies urban heat island basics**. Washington, DC, 2008a.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reducing urban heat islands: compendium of strategies-cool roofs**. Washington, DC, 2008b.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reducing urban heat islands: compendium of strategies-green roofs**. Washington, DC, 2008c.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reducing urban heat islands: compendium of strategies-cool pavements**. Washington, DC, 2008d.
- FARRELL, C. *et al.* Green roofs for hot and dry climates: interacting effects of plant water use, succulence and substrate. **Ecological Engineering**, v. 49, p. 270-276, 2012.
- FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. São Paulo, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU. **Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing**. Bonn: FLL, 2018.
- FRIEDRICH, C. Selecting the proper components for a green roof growing media. In: CLAR, M. **Low impact development: new and continuing applications**. North Carolina: ASCE library, 2009.
- GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The role of extensive green roofs in sustainable development. **HortScience**, v. 41, n. 5, p. 1276-1285, 2006.
- GRACESON, A. *et al.* Plant growth responses to different growing media for green roofs. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 196-200, 2014b.
- GRACESON, A. *et al.* Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. **Biosystems Engineering**, v. 124, p. 1-7, 2014a.
- GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólido e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1069-1076, nov./dez. 2004.
- GUNAWARDENA, K. R.; WELLS, M. J.; KERSHAW, T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. **Science of the Total Environment**, v. 584-585, p. 1040-1055, 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Gráficos climatológicos, Santa Maria**. 2022. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/RS/83936>. Acesso em: 15 jul 2022.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Médias climatológicas, Santa Maria**. 2019. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/medias-climatologicas>. Acesso em: 25 fev 2019.
- JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157-164, 2012.
- JIM, C. Y. Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 8, n. 2, p. 173-187, 2012.
- JIM, C. Y.; PENG, L. LH. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 9-23, 2012.
- JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. Santa Maria, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- JUSSELME, M. D. *et al.* Increasing the ability of a green roof to provide ecosystem services by adding organic matter and earthworms. **Applied Soil Ecology**, v. 143, p. 61-69, 2019.

- KAVISKI, F. **Desempenho térmico de cobertura vegetada sobre guarita de fibra de vidro exposta a diferentes condições climáticas em Curitiba**. Curitiba 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- KAZEMI, F.; MOHORKO, R. Review on the roles and effects of growing media on plant performance in green roofs in world climates. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 23, p. 13-26, 2017.
- KAZEMI, M.; COURARD, L.; HUBERT, J. Coarse recycled materials for the drainage and substrate layers of green roof system in dry condition: Parametric study and thermal heat transfer. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103487, 2022.
- KII, M. Projecting future populations of urban agglomerations around the world and through the 21st century. **Nature Partner Journals Urban Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2021.
- KIYASUDEEN, K.; IBRAHIM, M. H.; ISMAIL, S. A. Vermicomposting of organic wastes and the production of vermicompost. In: RATHINAM, N. K.; SANI, R. K. **Biovalorisation of wastes to renewable chemicals and biofuels**. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- KOSTADINOVIĆ, D. *et al.* Experimental investigation of summer thermal performance of the green roof system with mineral wool substrate. **Building and Environment**, v. 217, p. 109061, 2022.
- KRATZ, D.; WENDLING, I. Crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* em substratos à base de arroz carbonizada. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, n. 3, p. 348-354, 2016.
- LI, Y. *et al.* A new method of comprehensive utilization of rice husk. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 2-3, p. 2151-2156, 2011.
- LIBERALESSO, T. *et al.* Effect of rice HUSK addition on the physicochemical and hydrological properties on green roof substrates under subtropical climate conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128133, 2021.
- LIBERALESSO, T. **Telhados verdes extensivos: influência da composição do substrato na retenção hídrica e no desenvolvimento da vegetação**. Santa Maria, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- LIN, B.S. *et al.* Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. **Building and Environment**, v. 67, p. 26-33, 2013.
- LIZ, D. G. S. de. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis**. Florianópolis, 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- MA, X. *et al.* Comprehensive evaluation of energy and environmental performances of an extensive green roof of a building in subtropical climate. **Journal of Architectural Engineering Technology**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2017.
- MACLVOR, J. S.; LUNDHOLM, J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 3, p. 407-417, 2011.
- MATHEUS, C. *et al.* Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n.1, p. 71-81, jan./mar. 2016.
- MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UNESP, 13., Bauru, 2006. **Anais [...] Bauru**, 2006.
- MOLINEUX, C. J.; FENTIMAN, C. H.; GANGE, A. C. Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 1507-1513, 2009.
- NARANJO, A. *et al.* Evaluation of semi-intensive green roofs with drainage layers made out of recycled and reused materials. **Coatings**, v. 10, n. 6, p. 525, 2020.
- NARDINI, A.; ANDRI, S.; CRASSO, M. Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants. **Urban Ecosystems**, v. 15, n. 3, p. 697-708, 2012.
- NORTON, B. A. *et al.* Planning for cooler cities: a framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 127-138, 2015.

- NOYA, M. G. *et al.* Substrates for cultivating herbaceous perennial plants in extensive green roofs. **Ecological Engineering**, v. 102, p. 662-669, 2017.
- OBERNDORFER, E. *et al.* Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. **BioScience**, v. 57, n. 10, p. 823-833, 2007.
- OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, p. 769-779, 1973.
- OKE, T. R. *et al.* **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- OULDBOUKHITINE, S.; BELARBI, R.; SAILOR, D. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. **Applied Energy**, n. 114, p. 273-282, 2014.
- PALMEIRA, A. N. **Balço de energia em telhado verde**. Santa Maria, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: a case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 1712-1722, 2011.
- PERSCH, C. G. **Efeito de escala em telhados verdes extensivos**. Santa Maria, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- PERSCH, C. G. *et al.* Assessing the scale dynamics of the rainfall retention of green roofs in a subtropical climate. **Journal of Environmental Engineering**, v. 147, n. 11, p. 04021054, 2021.
- PIMENTEL, F. C. **Efeito da composição do substrato e da presença da vegetação no comportamento térmico e hidrológico de telhados verdes**. Santa Maria, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.
- PIOVESAN, T. R. **Caracterização acústica de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros**. Santa Maria, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- QIN, X. *et al.* A green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore. **British Journal of Environment and Climate Change**, v. 2, n. 4, p. 410, 2012.
- R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing, r foudation for statistical computing. 2017. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 26 jul 2022.
- REYES, R. *et al.* Effect of substrate depth and roof layers on green roof temperature and water requirements in a semi-arid climate. **Ecological Engineering**, v. 97, p. 624-632, 2016.
- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Porto Alegre, 2011. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- SACHINDRA, D. A.; MUTHUKUMARAN, A. W. M. N. S.; PERERA, B. J. C. Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures: a case-study. **Royal Meteorological Society**, v. 142, n. 694, p. 172-186, 2015.
- SAILOR, D. J.; HAGOS, M. An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2298-2303, 2011.
- SAIZ, S. *et al.* Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 13, p. 4312-4316, 2006.
- SANDOVAL, V. *et al.* Porous media characterization to simulate water and heat transport through green roof substrates. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 4, p. 1-14, 2017.
- SCHADE, J.; LIDELÖW, S.; LÖNNQVIST, J. The thermal performance of a green roof on a highly insulated building in a sub-arctic climate. **Energy and Buildings**, v. 241, p. 110961, 2021.
- SCHWEITZER, O.; ERELL, E. Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 25-32, 2014.
- SIMMONS, M. T. Climates and microclimates: challenges for extensive green roof design in hot climates. In: SUTTON, R. **Green roof ecosystems**. Cham: Springer, 2015.

- SIMMONS, M. T. *et al.* Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 339-348, 2008.
- SKALA, V. *et al.* Hydrological and thermal regime of a thin green roof system evaluated by physically-based model. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 48, p. 126582, 2020.
- SNĚHOTA, M. *et al.* Water and thermal regime of extensive green roof test beds planted with sedum cuttings and sedum carpets. **Journal Soils Sediments**, v. 21, 2089–2101, 2021.
- SPEAK, A. F. *et al.* Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. **Urban Climate**, v. 3, p. 40-55, 2013.
- SUSCA, T; GAFFIN, S. R.; DELL'OSSO, G. R. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 2119-2126, 2011.
- TAKEBAYASHI, H.; MORIYAMA, M. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. **Building and Environment**, v. 42, p. 2971-2979, 2007.
- TANG, M.; ZHENG, X. Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days. **Applied Energy**, n. 424, p. 1010-1021, 2019.
- TANG, X.; QU, M. Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 165-175, 2016.
- TASSI, R. *et al.* Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014.
- TEEMUSK, A.; MANDER, U. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia. **Building and Environment**, v. 44, p. 643-650, 2009.
- UNITED NATIONS. **Global issues, population**. Disponível em: <https://www.un.org/en/global-issues/population>. Acesso em: 12 mar 2021.
- VANWOERT, N. D. *et al.* Watering regime and green roof substrate design affect Sedum plant growth. **HortScience**, v. 40, n. 3, p. 659-664, 2005.
- VARELA, A. *et al.* Evaluation of green roof structures and substrates for *Lactuca sativa* L. in tropical conditions. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 60, p. 127063, 2021.
- VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 740-752, 2016.
- VIJAYARAGHAVAN, K.; RAJA, F. D. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption. **Water Research**, v. 63, p. 94-101, 2014.
- VLAEV, L. T.; MARKOVSKA, I. G.; LYUBCHEV, L. A. Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk. **Thermochimica Acta**, v. 406, n. 1-2, p. 1-7, 2003.
- WANG, H. *et al.* Utilization of coconut shell residual in green roof: hydraulic and thermal properties of expansive soil amended with biochar and fibre including theoretical model. **Acta Geophysica**, v. 68, n. 6, p. 1803-1819, 2020.
- WONG, N. H. *et al.* Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, v. 38, n. 2, p. 261-270, 2003.
- XUE, M.; FARRELL, C. Use of organic wastes to create lightweight green roof substrates with increased plant-available water. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 48, p. 126569, 2020.
- YAGHOUBIAN, N.; SREBRIC, J. Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 1-13, 2015.
- YANG, Y; DAVIDSON, C. I.; ZHANG, J. Evaluation of thermal performance of green roofs via field measurements and hygrothermal simulations. **Energy and Buildings**, v. 237, p. 110800, 2021.
- YOUNG, T. *et al.* Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, p. 507-516, 2014.
- YU, H. *et al.* Uncertainty analysis of artificial intelligence modeling daily reference evapotranspiration in the northwest end of China. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 176, p. 105653, 2020.

ZHANG, K. *et al.* Thermal performance and energy consumption analysis of eight types of extensive green roofs in subtropical monsoon climate. **Building and Environment**, v. 216, p. 108982, 2022.

ZHAO, L. *et al.* Interactions between urban heat islands and heat waves. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 3, p. 034003, 2018.

ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 66-76, 2012.

ZÖLCH, T. *et al.* Using green infrastructure for urban climate-proofing: an evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 20, p. 305-316, 2016.

Fabiana Campos Pimentel

Conceitualização, curadoria de dados, análise de dados, pesquisa, metodologia, validação de dados e experimento, design da apresentação dos dados, redação do manuscrito original, redação, revisão e edição do manuscrito final.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental | Universidade Federal de Santa Maria | Av. Roraima, 1000, Centro de Tecnologia, Prédio INPE, Sala 2059, Cidade Universitária, Bairro Camobi | Santa Maria - RS - Brasil | CEP 97105-900 | Tel.: (55) 3220-8000 | E-mail: fabiana.pimentel@acad.ufsm.br

Rutineia Tassi

Supervisão, recebimento de financiamento, administração de projeto, disponibilização de ferramentas, conceitualização, metodologia, validação de dados e experimento, design da apresentação dos dados, redação do manuscrito original, redação, revisão e edição do manuscrito final.

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental | Universidade Federal de Santa Maria | E-mail: ruti@ufsm.br

Daniel Gustavo Allasia

Supervisão, recebimento de financiamento, administração de projeto, disponibilização de ferramentas.

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental | Universidade Federal de Santa Maria | E-mail: dallasia@gmail.com

Bruna Minetto

Curadoria de dados, análise de dados, validação de dados e experimento.

Engenheira Sanitarista e Ambiental | Av. Roraima, 1000, Centro de Tecnologia, Prédio INPE, Sala 2059, Cidade Universitária, Bairro Camobi | Santa Maria - RS - Brasil | CEP 97105-900 | Tel.: (55) 3220-8000 | E-mail: bruna_minetto@hotmail.com

Cristiano Gabriel Persch

Curadoria de dados, pesquisa e experimento.

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental | Universidade Federal do Mato Grosso | Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Bairro Boa Esperança | Cuiabá - MS - Brasil | CEP 78060-900 | Tel.: (65) 3615-8000 | E-mail: cristianopersch@gmail.com

Editor do artigo: **EneDir Ghisi**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.