

MATHEUS SCHMIDT

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NO DESEMPENHO
TÉRMICO DE TELHADOS VERDES

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO - 2020

MATHEUS SCHMIDT

**INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHADOS VERDES**

Trabalho apresentado à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura para obtenção do título de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO - 2020

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura e à CAPES por ter possibilitado a realização do curso de pós-graduação.

Aos meus pais, Luiz Schmidt e Maria de Fátima Schmidt, por sempre terem me apoiado (em todos os sentidos) e fazerem reconhecer a importância dos estudos. Sem o suporte de vocês, nada disso teria sido possível.

À minha noiva, Aline Snak, por todos os momentos de apoio emocional e amoroso, paciência, e imensurável auxílio durante o projeto, especialmente na aplicação prática do mesmo. Não fosse as inúmeras noites de sono perdidas, o resultado desta jornada provavelmente teria sido diferente. Aproveito para agradecer a seus pais, Terezinha Snak e Delcio Snak, por todo apoio e ajuda que também ofereceram, jamais esquecerei a contribuição de vocês.

Ao meu orientador, prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pelo incentivo ao tema, disponibilidade, críticas construtivas, contribuição intelectual e oportunidade de aprendizado, bem como a sugestão para prosseguir com a vida acadêmica. Ressalvas válidas também para meu coorientador, prof. Dr. Deonir Secco; e colega, Dr. Douglas Bassegio; cujas sugestões e informações inerentes à dissertação foram essenciais para a conclusão da mesma.

Ao meu colega, Diogo Giomo, pela imensa ajuda, dicas, ideias, conhecimentos e frustrações compartilhadas, bem como pela amizade oferecida.

Agradeço a todos que ajudaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, em especial aos técnicos da UNIOESTE; prof. Dr. Alfredo Petruski, prof. Dr. Anibal Mantovani Diniz, e obviamente, agradeço a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, sem a qual nada disso teria sido possível.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações e propriedades dos telhados verdes.....	8
Tabela 2 - Vantagens e Desvantagens de materiais usados em substratos.....	13
Tabela 3 - Capacidade Térmica Volumétrica de constituintes do solo (aos 10°C)	18
Tabela 4 - Condutividade Térmica de constituintes do solo (aos 10°C)	19
Tabela 5 - Granulometria e densidade aparente dos substratos.....	26
Tabela 6 - Médias de temperatura interna dos protótipos em relação ao período do dia.	32
Tabela 7 - Temperatura média dos substratos em função do período do dia.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapeamento Climático do Estado do Paraná para os próximos 25 anos, realizado pelo software Sistema de Vulnerabilidade Climática (SisVuClima).	5
Figura 2 - Localização de Cascavel no Paraná	5
Figura 3 - Composição do telhado verde	6
Figura 4 - Exemplos de telhado verde intensivo (A) e extensivo (B)	9
Figura 5 - Localização da instalação dos protótipos.....	21
Figura 6 - Dimensões e desenho técnico dos protótipos de telhado verde, incluindo vista lateral (A), vista posterior (B), corte da vista lateral (C), vista frontal (D), vista superior (E), e corte da vista posterior (F)	23
Figura 7 - Protótipos instalados no Campo experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná	24
Figura 8 - Camadas componentes do telhado verde.....	24
Figura 9 - Localização do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEA)	27
Figura 10 - Protótipos instalados no Campo experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, com sensores já implementados.....	28
Figura 11 - Circuito do nó (protótipo).....	30

SCHMIDT, Matheus. MSc. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2020. **Influência da composição do substrato no desempenho térmico de telhados verdes**. Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

RESUMO

Nas últimas décadas, os telhados verdes vêm se tornando um elemento chave na composição urbana em países desenvolvidos, especialmente pelo conforto térmico que promovem à edificação. A fim de obter um melhor desempenho térmico, deve-se adequar o substrato ideal ao clima no qual é instalado, em função de suas propriedades físicas. Almejou-se avaliar, neste trabalho, a utilização do telhado verde nas edificações com foco na eficiência energética e conforto térmico ambiental, por meio da análise de 7 protótipos, que configuram os tratamentos. Destes, 3 são protótipos de telhado verde com substrato e cobertura vegetal, 3 protótipos de telhado verde com substrato sem cobertura vegetal, e 1 é um protótipo com telhado convencional de telhas de barro (testemunha). Três tipos de substrato foram avaliados, um solo argiloso com leve teor de matéria orgânica (húmus, 5%), um substrato arenoso com leve teor de matéria orgânica (húmus, 5%), e um substrato integralmente composto por matéria orgânica (esterco bovino e matéria vegetal seca). A temperatura ambiente (interna e externa), e a temperatura dos substratos (variáveis resposta) foram monitoradas continuamente pelo período de um mês, por meio de sensor capacitivo digital AM2302-DHT22 e pelo sensor digital DS18B20, respectivamente, conectados ao microprocessador Arduino Mega. O melhor desempenho térmico foi observado no protótipo de substrato arenoso com vegetação, apresentando, nos horários mais quentes, temperatura interna ao menos 0,6 °C inferior em relação aos demais telhados verdes, 1,7 °C inferior à testemunha e 6,1 °C inferior à temperatura ambiente, presumivelmente pela elevada porosidade deste substrato. Conclui-se que, para que o substrato proporcione desempenho térmico ideal, este deve possuir capacidade de retenção de água apenas o suficiente para garantir desenvolvimento da vegetação, porém não excessiva a ponto de constantemente elevar a condutividade térmica em função da saturação do substrato.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

PALAVRAS-CHAVE: telhado ecológico; eficiência energética; propriedades do solo.

SCHMIDT, Matheus. MSc. State University of West Paraná, February 2020. **Influence of substrate composition on the thermal performance of green roofs.** Adviser: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

ABSTRACT

In the last decades, green roofs have become a key element in urban composition in developed countries, especially due to the thermal comfort they promote to the building. In order to obtain a better thermal performance, the ideal substrate must be adapted to the climate in which it is installed, depending on its physical properties. The aim of this work is to evaluate the use of the green roof in buildings with a focus on energy efficiency and environmental thermal comfort, through the analysis of 7 prototypes, which configure the treatments. 3 of these are green roof prototypes with substrate and vegetation cover, 3 are green roof prototypes with substrate without vegetation cover, and one is a prototype with conventional roof of clay tiles (control). Three types of substrate were evaluated, a clay soil with a slight organic matter content (humus, 5%), a sandy substrate with a light organic matter content (humus, 5%), and a substrate entirely composed of organic matter (bovine manure and dry vegetable matter). The ambient temperature (internal and external), and the temperature of the substrates (response variables) were continuously monitored for a period of one month, using the digital capacitive sensor AM2302-DHT22 and the digital sensor DS18B20, respectively, connected to the Arduino Mega microprocessor. The best thermal performance was observed in the prototype of sandy substrate with vegetation, presenting, in the hottest times, an internal temperature at least 0.6 ° C lower than the other green roofs, 1.7 ° C lower than the control and 6.1 ° C below room temperature, presumably due to the high porosity of this substrate. It is concluded that for the substrate to provide ideal thermal performance, it must have water retention capacity just enough to guarantee vegetation development, but not excessive enough to constantly increase thermal conductivity due to substrate saturation.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

KEYWORDS: ecologic roof; energy efficiency; soil properties.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.2. Objetivo geral	2
1.1.3. Objetivos Específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Telhados verdes.....	3
2.2. Telhado verde no clima subtropical.....	4
2.3. Estrutura e classificações de telhados verdes.....	6
2.3.1. Impermeabilização	7
2.3.2. Camada filtrante e anti-raíz	7
2.3.3. Drenagem.....	7
2.3.4. Substrato e Vegetação	7
2.3.5. Classificação dos telhados verdes	8
2.4. Desvantagens	9
2.5. Composição e desempenho térmico do telhado verde	10
2.5.1. Substrato em função da vegetação.....	12
2.5.2 Substrato em função do desempenho térmico	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Montagem dos Protótipos.....	21
3.2. Sensores de monitoramento	26
3.3. Análise estatística	28
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4. CONCLUSÃO	38
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

INTRODUÇÃO

Ao decorrer do desenvolvimento da história do homem, registra-se a busca da proteção em função das adversidades climáticas, e, nos períodos recentes, de condições de bem-estar e conforto físico satisfatórias e agradáveis. Desde as cavernas, as primeiras vestimentas e o fogo, até os dias atuais, com sistemas de climatização, a história deixa claro que o conforto térmico é, indiscutivelmente, um importante definidor do projeto e da construção da sua habitação.

Recentemente, porém, a sociedade tem se expressado espacialmente de forma cada vez mais urbana, e a necessidade de anular as distâncias, resulta na dispersão da população nas áreas metropolitanas e o surgimento dos grandes centros urbanos. As consequências da formação destes grandes conglomerados são visíveis, na forma de impactos ambientais e desequilíbrios termo climáticos, e criação de novos microclimas. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), cidades com mais de um milhão de pessoas podem ser até 12°C mais quentes que a zona rural circundante, sendo que Chicago, Nova York e Tóquio já registraram temperaturas no verão que são 14°C mais altas do que as áreas rurais adjacentes.

As temperaturas urbanas mais altas são devidas, principalmente, pela liberação de calor antropogênico, o excesso de armazenamento de radiação solar pelas estruturas da cidade, a falta de espaços verdes, a fraca circulação de ar em áreas urbanas e a capacidade reduzida da radiação infravermelha emitida para escapar na atmosfera. A ilha de calor urbano é um reflexo da totalidade das mudanças microclimáticas trazidas pelas alterações urbanas dos espaços abertos. Além disso, tem-se as mudanças nos padrões de aquecimento e precipitação, referenciadas pelo IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), que aponta um aumento nas temperaturas globais de superfície em torno de 1,1 e 6,4° entre 1990 e 2100.

Todo este conjunto de ações se reflete na busca do ser humano em adaptar seu conforto térmico em função do meio onde vive, e, nos dias de hoje, isto é claramente caracterizado pelo uso de aparelhos de condicionamento de ar. Não é ao caso que, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar no setor residencial mais que triplicou nos últimos 12 anos, e a compra de novos aparelhos por residências subiu 9% ao ano entre 2005 e 2017, duplicando o número de aparelhos na casa dos brasileiros. Apesar da

eficiência energética dos aparelhos estarem em melhoria contínua, é inevitável o maior consumo de energia ao longo dos anos em função do conforto térmico.

Uma das soluções ecologicamente corretas encontradas para o problema foi a implementação de telhados verdes (ou eco telhado), que consistem na sobreposição de diversas camadas sobre uma superfície estrutural, incorporando uma cobertura vegetal (ROSENZWEIG; GAFFI; PARSHALL, 2006). Além de reduzir o consumo energético, esta alternativa é uma opção sustentável para solucionar a questão do conforto térmico presente na sociedade atual. Para tal, bem como as diversas tecnologias de climatização de ar, esta também deve ser estudada de forma a proporcionar a maior eficácia com o menor custo possível, a fim de viabilizar a sua implantação.

1.1. Objetivos

1.1.2. Objetivo geral

Avaliar a utilização do telhado verde nas edificações, com foco na eficiência energética e conforto ambiental, bem como associar possíveis correlações entre diferentes substratos de protótipos verde, temperatura do substrato e temperatura interna das estruturas em função das propriedades físicas do substrato.

1.1.3. Objetivos Específicos

- a) Implementar sensores de temperatura a fim de realizar o monitoramento desta em diferentes protótipos de telhado verde;
- b) Demonstrar, experimentalmente, o comportamento de telhados verdes em comparação ao convencional, em se tratando de ganhos térmicos provenientes da variação de elementos e fatores climáticos do meio;
- c) Correlacionar os valores de temperatura monitorados com parâmetros físicos do substrato dos telhados verdes, com o intuito de se compreender o melhor funcionamento de trocas térmicas e a melhor seleção de materiais na construção de um telhado verde objetivando o conforto térmico e economia de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Telhados verdes

A tecnologia de telhado verde, como ferramenta arquitetônica, foi originada na Alemanha em meados de 1880, embora a história do telhado verde na forma de jardins de telhado tenha começado na Babilônia por volta de 500 a. C. (DIMITRIJEVIĆ, 2016). Embora seja uma técnica antiga, só recentemente deteve visibilidade no Brasil (LOPES, 2007). Essa visibilidade é por consequência das suas características sustentáveis e benefícios, como o aumento da área verde útil, controle do escoamento superficial, absorção do ruído e influência sobre a temperatura interior, diminuindo a perda de calor no inverno e diminuindo a temperatura no verão (VECCHIA, 2005). Dessa forma, além de ecologicamente sustentável, é método de racionalização de energia aplicável às edificações.

Atualmente, a cobertura verde em telhados na Alemanha está aumentando em cerca de 13,5 milhões de metros quadrados ao ano, sendo que aproximadamente 14% das construções já são beneficiadas por essa tecnologia. De acordo com a ADIVET (Associação francesa de empresas de coberturas verdes), ao menos 100.000 m² de telhados verdes foram implementados anualmente na França nos últimos 10 anos.

Os telhados verdes fornecem sombra e isolamento, resultando em economia de energia e mitigação do efeito de ilha de calor urbana. Segundo Getter e Rowe (2006), a combinação da profundidade do substrato, sombra do material vegetal e evapotranspiração em condições ideais podem reduzir o ganho de energia solar em até 90% em comparação com os edifícios não sombreados. Peck et al. (1999) verificaram que telhados verdes reduziram as temperaturas internas de 3 a 4 °C enquanto as temperaturas externas estavam entre 25 °C, sendo que cada decréscimo na temperatura interna do ar do edifício em 0,5 °C pode reduzir o consumo de eletricidade do condicionamento de ar em até 8 % (DUNNETT; KINGSBURY, 2008).

Em um estudo realizado por Wong et al. (2003), as temperaturas do ar acima do edifício com telhado vegetado mostraram-se 3 °C mais baixas quando vegetadas em comparação com um telhado convencional, resultando em até 15 % de economia anual no consumo de energia. Já em um estudo na Grécia, foi mostrado que os telhados verdes reduzem a energia utilizada para arrefecimento entre 2 e 48 %,

dependendo da área coberta pelo telhado verde, com uma redução interna da temperatura até 4 °C (NIACHOU et al., 2001). Além da eficiência térmica que promovem à edificação, são importantes dispositivos no amortecimento do escoamento superficial oriundo dos telhados, o que contribui para evitar enchentes e alagamentos (SANTOS et al., 2013; COSTA; COSTA; POLETO, 2012; SHAFIQUE; KIM; KYUNG-HO, 2018).

Existem, também, políticas públicas ambientais voltadas para telhados verdes, que promovem a implementação de incentivos em forma de subsídios, redução de taxas ou gratificações como estímulo para instalação de telhados verdes. Um exemplo destas políticas ocorre no Canadá, que apresenta como necessária a cobertura verde para novas construções acima de 2000 m² (TORONTO MUNICIPAL CODE, 2010). Desde quando foi aprovada na Câmara Municipal, resultou mais de 110 mil metros quadrados verdes em diferentes tipos de construções, assim como na economia de energia de mais de 1,5 milhões de kWh por ano (SETTA, 2017). No Brasil, ainda há poucas políticas públicas em andamento, sendo estas geralmente municipais e estando a maioria em pauta de aprovação, como, por exemplo, a nova Lei Complementar nº 1.174/2018 de Blumenau, que prevê que até 50 % da área permeável obrigatória no terreno possa ser transferida para o telhado verde, seja em laje ou cobertura. Assim, mais espaço do terreno pode ser usado na construção de imóveis.

2.2. Telhado verde no clima subtropical

Foi apurada pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) um aumento de 3,4% no consumo do mercado atendido por sua distribuidora em 2017, na comparação com o ano anterior, sendo que no último trimestre o aumento foi de quase 5%. Em cima disto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) aprovou, em junho de 2018, um aumento médio de 15,99% das tarifas da Copel Distribuição. Não obstante, O Projeto Vulnerabilidade à Mudança do Clima, realizado pelo Centro de Pesquisa René Rachou (2017), por meio do software SisVuClima, mapearam futuras mudanças climáticas no estado do Paraná, com certas regiões sofrendo possíveis incrementos de até 5,6°C nos próximos 25 anos, como ilustrado na Figura 1.

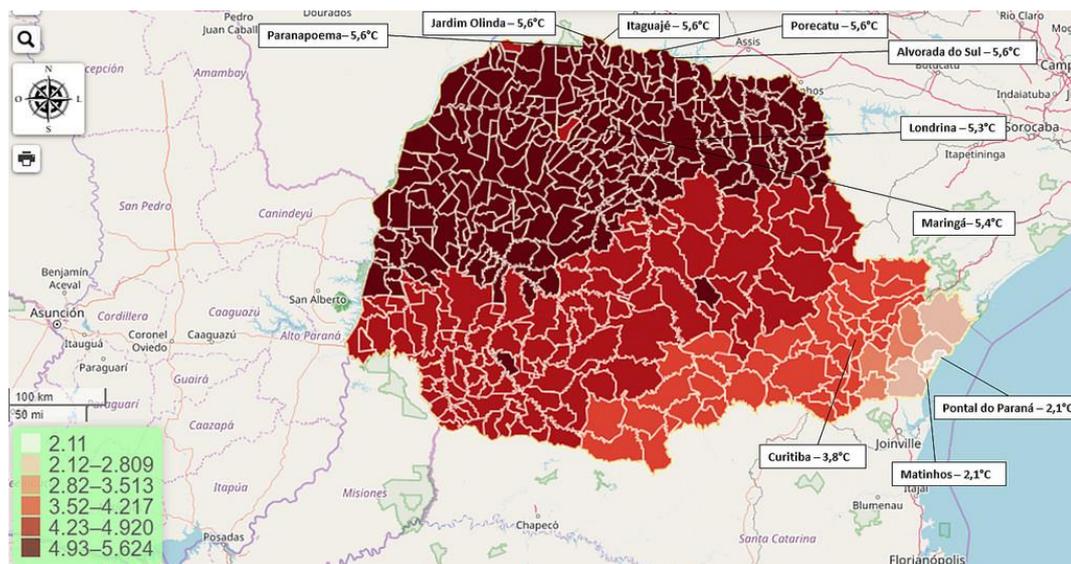


Figura 1 - Mapeamento Climático do Estado do Paraná para os próximos 25 anos, realizado pelo software Sistema de Vulnerabilidade Climática (SisVuClima).

Fonte: Centro de Pesquisa René Rachou (2017). Disponível em <<https://projeto Vulnerabilidade.fiocruz.br/noticias/104-seminario-24>>

Dentre essas regiões, encontra-se o município de Cascavel, com provável incremento de 4,2 a quase 5°C. Localizada na região oeste do Paraná, esta cidade apresenta clima predominantemente subtropical úmido – Cfa, tendendo ao clima temperado – Cfb (IBGE, 2002; ITCG, 2008; INDE, 2012). O verão é longo, morno e úmido; o inverno é curto e ameno. Ao longo do ano, em geral, a temperatura varia de 8°C a 28°C e raramente é inferior a 2°C ou superior a 32°C, com ventos que variam de 5 a 7km/h. O mapa do município e sua localidade no Paraná é indicado na Figura 2.

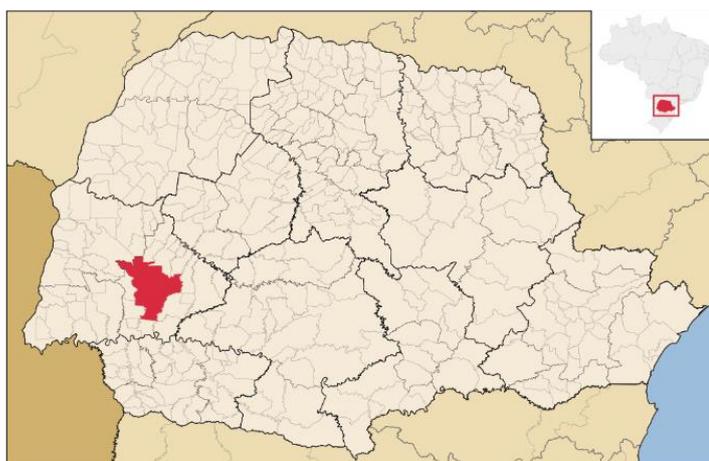


Figura 2 – Localização de Cascavel no Paraná.

Fonte: Portal do Município de Cascavel (2019).

Apesar das conhecidas vantagens em eficiência térmica proporcionadas pelo uso de telhados verdes, são relativamente escassos na literatura os estudos realizados sob climas tropicais e subtropicais que caracterizam a composição do substrato utilizado, sendo a maioria realizados sob climas frios e temperados (PECK et al., 1999; LIU; BASKARAN, 2003; BEATTIE; BERGHAGE, 2004; GETTER; ROWE, 2006; ROWE; MONTERUSSO; RUGH, 2006; SAILOR; HUTCHINSON; BOKOVOY, 2008; AMPIM et al., 2010; BERRETTA; POE; STOVIN, 2014; SANDOVAL et al., 2015; YAGHOUBIAN; SREBRIC, 2015; BEVILACQUA, 2016; DIMITRIJEVIC et al., 2016.). Destaca-se, portanto, o enfoque em materiais adicionados ao substrato que promovam maior conforto térmico nas circunstâncias impostas pelo clima característico dessa região, bem como a análise da influência destes materiais, seja por parâmetros físicos, químicos ou biológicos, no desempenho térmico dos telhados verdes.

2.3. Estrutura e classificações de telhados verdes

Apesar da grande amplitude de fatores e aspectos envolvidos na construção de telhados verdes, é possível sumarizar sua estrutura conforme Figura 3:

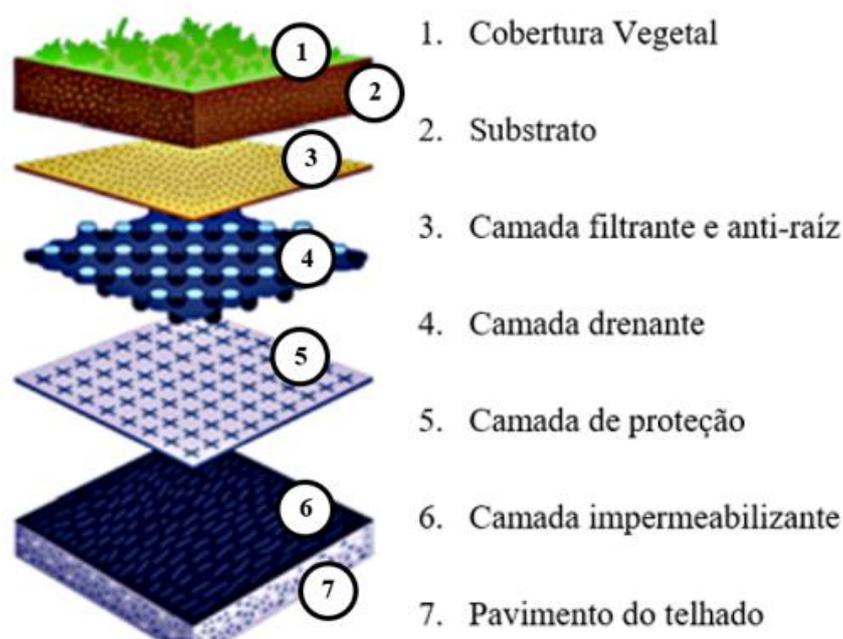


Figura 3 - Composição do telhado verde.
Fonte: Adaptado de Dimitrijevic et al. (2016).

2.3.1. Impermeabilização

A camada de impermeabilização é imprescindível por proteger a laje contra infiltrações, que diminuiria a vida útil da laje, além de causar desconfortos ao habitante, geralmente sendo aplicada na forma de manta asfáltica. Também pode ser empregada uma combinação de tecido em tela reforçado com asfalto quente e manta asfáltica, como recomendado pela National Roofing Contractors Association – NRCA (2015).

2.3.2. Camada filtrante e anti-raíz

A camada filtrante impede que as partículas componentes da cobertura verde sejam levadas pelas águas da chuva, além de impedir que as partículas finas do substrato obstruam a camada de drenagem. Também serve para evitar que a raiz penetre na impermeabilização e provoque vazamentos, de forma que seja crucial para evitar excessiva manutenção. Geralmente é utilizado um material sintético com o filtro geotêxtil, pelo fato de ser permeável, porém não permite a passagem do substrato, amplamente usado na construção civil (US National Park Service, 2018).

2.3.3. Drenagem

A drenagem da água pluvial é feita pela camada drenante, filtrando poluentes e dispensando o excesso de águas não absorvido pelo substrato por meio de material mineral granulado com grande permeabilidade, como a argila expandida (CANTOR, 2008).

2.3.4. Substrato e Vegetação

O solo e substrato funcionam como o suporte para as vegetações, e há uma enorme variedade de materiais a serem utilizados, de acordo com a finalidade do telhado verde, e clima da região. Quanto à vegetação, preferencialmente deve ser composta por espécies vegetais de baixa manutenção e resistentes às intempéries de cada região e que melhor se adapte a estrutura da edificação (CANTOR, 2008; SILVA,

2011). Porém, o substrato e a vegetação são fatores que podem grandemente variar de acordo com o tipo de telhado verde a ser implantado.

2.3.5. Classificação dos telhados verdes

Existem basicamente dois tipos de telhados verdes: os extensivos, com uma estrutura mais leve e substrato mais fino; e os intensivos, com maior camada de substrato para permitir raízes mais profundas de plantas como arbustos e árvores sobrevivam. Há também o termo semiextensivo, sendo basicamente um nível intermediário entre os dois tipos principais. A Tabela 1 a seguir apresenta as principais diferenças entre os modelos:

Tabela 1 - Classificações e propriedades dos telhados verdes

	Extensivo	Intensivo
Espessura do substrato (cm)	4 a 20	10 a 200+
Altura das plantas	5 a 30	30 a 90+
Inclinação dos telhados	≤ 30°	Mínimo ou plano
Contenção de águas pluviais	Baixa	Alta
Peso Geral (kg/m ²)	60-145	170-500+
Tipos de plantas	Plantas de baixo crescimento;	Mais variada, espécies maiores
Irrigação	Periódica a Nula	Regular

Fonte: Adaptado de Dimitrijević (2016).

Telhados extensivos requerem menor manutenção e seu custo-benefício torna-os adequados economicamente em edifícios públicos e comerciais. Já os intensivos, por possuírem uma grossa camada de solo, exigem um suporte estrutural maior, e geralmente são considerados mais pelo apelo paisagístico, ambiental e arquitetônico do que econômico (OLIVEIRA; SOARES; SANTOS, 2016). Na Figura 4 a seguir é possível observar a diferença entre ambos modelos.



Figura 4: Exemplos de telhado verde intensivo (A) e extensivo (B).

Fonte: Disponível em <<http://www.harvestpower.com/product/greenroof1/>>, acessado em 12/07/2019.

2.4. Desvantagens

A principal desvantagem dos telhados verdes é que o custo inicial de instalação pode chegar a ser o dobro de um telhado normal (GETTER; ROWE, 2006). Dependendo do tipo de telhado verde, os custos de manutenção podem ser maiores, apesar alguns tipos possuírem pouco ou nenhum custo contínuo. Outra desvantagem é que a vida selvagem que eles atraem pode incluir insetos que podem facilmente se infiltrar em um prédio residencial através de janelas abertas.

A massa adicional do substrato do solo e a água retida também sobrecarregam o suporte estrutural de um edifício, o que pode inviabilizar a implementação de telhados verdes intensivos devido à falta de edifícios que sejam capazes de suportar uma quantidade tão grande de peso adicional, bem como o custo adicional de reforçar os edifícios para suportar esse peso (CURRIE; BASS, 2008). Alguns tipos de telhados verdes têm padrões estruturais mais exigentes,

especialmente em regiões sísmicas do mundo. Alguns edifícios existentes não podem ser adaptados com certos tipos de telhado verde devido à carga de peso do substrato e a vegetação excede a carga estática permitida. A exemplo disto, o peso de um telhado verde causou o colapso de um grande telhado de um pavilhão esportivo em Hong Kong em 2016. (CHENG; CHEUNG, 2016). Na sequência do desastre, muitos outros telhados verdes foram removidos (TSANG, 2016).

Além disso, ainda em relação a telhados intensivos, telhados verdes podem requerer muito mais manutenção em comparação com um telhado padrão. A manutenção padrão inclui a remoção de detritos, controle de ervas daninhas, corte de árvores mortas, verificação dos níveis de umidade e a fertilização, além de fatores que podem variar de acordo como clima, intensidade da chuva, tipo de construção, tipo de vegetação e revestimentos externos (SAADASTIAN et al., 2013). O efeito mais significativo vem de chuvas escassas que aumentam a energia de manutenção devido à rega necessária. Por último, os componentes individuais de um telhado verde têm implicações de CO₂ durante o processo de fabricação e têm implicações adicionais em comparação com um telhado convencional (BOZORG CHENANI; LEHVAVIRTA; HAKKINEN, 2015).

Ainda assim, ressalta-se que estas desvantagens dizem mais respeito aos telhados intensivos que os extensivos, visto que o cerne destas envolve custos adicionais e sobrepeso do telhado, que são fatores menos impactantes nos telhados verdes do tipo extensivo.

2.5. Composição e desempenho térmico do telhado verde

Sistemas de telhados verdes não são padronizados, e há uma grande variação nos tipos em função da escolha dos materiais utilizados no substrato de cultivo, camada de drenagem e composição da planta, assim como a espessura dos diferentes componentes do verde telhados. Cada um desses componentes pode influenciar o potencial térmico dos telhados.

Além dos materiais que constituirão o telhado verde, o desempenho térmico de cada tipo ainda variará em função de diversos fatores. Pesquisas indicam que o desempenho térmico do telhado verde depende da zona climática, dos materiais da construção e da sazonalidade (LA ROCHE; CARBONNIER; HALSTEAD, 2012;

PIANELLA et al., 2016; BEVILACQUA et al., 2016; OLIVIERI et al., 2013; FIORETTI et al., 2010).

Como exemplo, em áreas de clima frio, Liu e Baskaran (2003) afirmam que um substrato de maior espessura aumenta o desempenho térmico em comparação com um substrato fino, enquanto que em áreas de clima quente e úmido, um substrato fino com 10cm de profundidade é suficiente para reduzir a temperatura interior do ambiente (JIM; TSANG, 2011). Para climas quentes e secos, a seleção adequada de plantas é essencial uma vez que telhados verdes precisam ser tolerantes à seca (SCHWEITZER; EREL, 2014).

A cobertura vegetal, por exemplo, afeta as propriedades de isolamento térmico através da quantidade de substrato em crescimento exposto à radiação solar, o que tem consequências no consumo de energia (YAGHOBIAN; SREBRIC, 2015). Além de seus efeitos no sombreamento das superfícies dos telhados, também são capazes de reduzir a temperatura através da evapotranspiração (ET), processo combinado de evaporação do solo e transpiração das plantas. A ET de telhados verdes é afetado por fatores como características do solo, teor de umidade do solo, tipo de plantas utilizadas (WADZUK et al, 2013; BERRETTA; POË; STOVIN, 2014), umidade do ar e velocidade do vento do ambiente (THEODOSIOU, 2003). Observa-se, portanto, a influência direta do substrato na eficiência energética da estrutura, e também no crescimento das plantas, que por sua vez também afetarão outros atributos relacionados ao conforto térmico.

À exemplo disso, Coutts et al (2013) sugere que as características hidrológicas do telhado verde são um aspecto crítico que influencia o balanço energético global da cobertura. Estas características hidrológicas, por sua vez, são determinadas pelas propriedades do substrato e dos elementos de drenagem dos sistemas de telhados verdes. Estas características influenciam a transmissão de calor através do telhado e são afetadas pela porosidade e profundidade do substrato (BARRIO, 1998). Brown (2014) ainda sugere a umidade do solo como o fator mais crítico para a ET da planta. Dessa forma, é nítida a relevância do substrato, suas propriedades e composição na eficiência térmica de telhados verdes.

2.5.1. Substrato em função da vegetação

Essa camada é considerada a camada crítica, uma vez que afeta diretamente o crescimento da planta; o sucesso de um telhado verde, a longo prazo, é diretamente associado a essa camada. Portanto, a seleção ideal deste meio de crescimento deve ser necessária para a eficácia de um telhado verde (SHAFIQUE; KIM; RAFIQ, 2018).

Antes de servir como isolante, o substrato tem que desempenhar o papel de um solo para o crescimento das plantas, fornecendo umidade, nutrientes e suporte físico para as plantas, além de ser leve, quimicamente estável, arejável e capaz de drenar a água livremente (FRIEDRICH, 2005). Essas características são vitais para a sobrevivência a longo prazo da vegetação de telhado verde e provisão dos benefícios (serviços) que os telhados verdes fornecem.

Segundo Ampim et al. (2010), a composição de um substrato pode variar dependendo do tipo do telhado, vegetação, condições climáticas e disponibilidade e custo dos componentes. Materiais leves e porosos, com alta capacidade de retenção e disponibilidade gradual de cátions e ânions são os mais ideais. Como exemplo disto, pode-se citar uma mistura de minerais naturais e artificiais (incluindo areia, vermiculita, argila, cascalho e xisto expandido ou argila expandida), reciclados ou resíduos (como tijolos ou telhas de barro triturado, telhas trituradas, concreto triturado ou aerado e subsolo), e matéria orgânica (cascas vegetais, turfas entre outros). Ocasionalmente, plásticos são incluídos para reduzir a densidade aparente do substrato, e fertilizantes de liberação lenta podem ser adicionados aos substratos para fornecer nutrientes e fomentar o estabelecimento da vegetação.

A Tabela 2 resume as vantagens e desvantagens dos materiais rotineiramente usados em telhados verdes, de acordo com Bunt (1988), Handreck e Black (1994), Miller (2003), Dunnett e Kingbury (2008) e Ampim et al. (2010).

Tabela 2 - Vantagens e Desvantagens de materiais usados em substratos

Material	Vantagens	Desvantagens
Areia	<ul style="list-style-type: none"> – Permite fácil disponibilidade de água às plantas; – Não provoca efeitos de pH na ausência de carbonatos e outros contaminantes. 	<ul style="list-style-type: none"> – Pode criar problemas de saturação ou não reter suficiente umidade; – Material pesado; – Dificilmente retém nutrientes.
Argila	<ul style="list-style-type: none"> – Boa retenção de água e nutrientes; – Alta capacidade de troca de cátions. 	<ul style="list-style-type: none"> – A perda gradual do meio pode obstruir as camadas de drenagem e membranas.
Cascalho	<ul style="list-style-type: none"> – Estável e fornece forte suporte para plantas; – Pode melhorar a drenagem. 	<ul style="list-style-type: none"> – Pesado comparado a outros minerais; – Fraca retenção de água e nutrientes.
Vermiculita	<ul style="list-style-type: none"> – Leve e porosa; – CTC relativamente alta; 	<ul style="list-style-type: none"> – Deteriora-se com o tempo; – Fraca retenção de água;
Turfa	<ul style="list-style-type: none"> – Alta CTC; – Baixa densidade aparente; – Alta capacidade de retenção de água. 	<ul style="list-style-type: none"> – Mal arejado quando molhado; – Dificil reidratação uma vez muito seco.
Húmus de Minhoca	<ul style="list-style-type: none"> – Níveis elevados de minerais essenciais; – Boa estrutura de agregados. 	<ul style="list-style-type: none"> – Possível toxicidade de zinco se o pH do meio cair abaixo de 5.

Fonte: Bunt (1988), Handreck e Black (1994), Miller (2003), Dunnett e Kingbury (2008) e Ampim et al. (2010).

Repara-se que, em se tratando da capacidade de retenção de água, essa característica é muito mais acentuada em solos argilosos que arenosos. Esta é uma característica importante não somente pela necessidade hídrica das plantas, como também pela proteção que a água fornece a vegetação. Al-Kayssi et al. (1990) constataram que a variação entre a temperatura do solo ao longo dia é significativamente reduzida com o aumento do teor de umidade do solo. Assim, o aumento do teor de umidade no solo fornece proteção para o sistema radicular contra as súbitas mudanças de temperatura do solo entre o dia e a noite, fator que, apesar

de aumentar a condutividade térmica do substrato, pode propiciar o desenvolvimento da vegetação de telhados verdes em regiões com grandes amplitudes térmicas.

Beattie e Berghage (2004) afirmam que em volume, a composição mineral pode variar de 80 a 100%, com matéria orgânica e pequenas quantidades de um fertilizante de liberação lenta contendo macro e micronutrientes que compõem os 0 a 20% restantes, especialmente em climas úmidos, por diversas razões. Este fato deve-se principalmente devido à vida útil relativamente curta da matéria orgânica, degradando-se ao longo do tempo, adquirindo baixa retenção de água e dificuldade de reidratar-se após seca. Além disso, a inclusão de altos níveis de matéria orgânica nos substratos de telhados verdes em crescimento também pode criar problemas de ervas daninhas, devido à maior disponibilidade de água e nutrientes (EMILSSON; ROLF, 2005). Ademais, de acordo com Friedrich (2005), o fino material resultante da degradação da matéria orgânica pode penetrar a membranas filtrante e drenante e sofrer ainda mais decomposição, arriscando a formar um lodo que pode inibir drenagem, afetar o crescimento das plantas e aumentar a carga estrutural.

Dunnet e Kingsbury (2008) e Getter e Rowe (2006) alegam que à medida que ocorre o aumento do nível de fertilidade no crescimento do substrato do telhado verde por meio da adição de grandes quantidades de matéria orgânica ou fertilizante, ocorre o aumento da biomassa vegetal, o que torna a planta mais suscetível a estresses ambientais abióticos, como calor e seca, bem como estresses bióticos como insetos, ácaros e doenças (REINERT, 2009). De maneira similar, Rowe, Monterusso e Rugh (2006) verificaram que a sobrevivência de três espécies vegetais foi maior sem fertilização, sugerindo que melhor tolerância à seca está associada a menor biomassa vegetal. A proporção ideal de material orgânico para adicionar a um substrato ainda é uma questão controversa, em parte devido à influência de diferentes climas locais. A decomposição da matéria orgânica procede em curto tempo em climas quentes e úmidos, em comparação à climas áridos e frios.

Apesar das peculiaridades envolvidas no uso excessivo da matéria orgânica, no Brasil, quantidades significativamente maiores (ao mínimo 60%) de matéria orgânica costumam ser utilizadas nas análises de Telhados verdes (PERUSSI; VECCHIA, 2016; MULLER, 2014; SAVI, 2014; SOUZA, 2016). Isto provavelmente deve-se ao clima tropical e subtropical brasileiro, em que se predominam temperaturas mais elevadas em relação aos países de outros estudos (geralmente europeus, de clima frio), o que conseqüentemente eleva a perda de água por

evaporação. A adição de matéria orgânica pode auxiliar a contornar esta adversidade, uma vez que a mesma apresenta alta capacidade de retenção de água (MINASNY; MCBRATNEY, 2018).

2.5.2 Substrato em função do desempenho térmico

Uma vez que o substrato de telhados verde costuma ser majoritariamente constituído por um ou mais tipos de solo, torna-se indispensável a análise das propriedades térmicas de solos para aferir o desempenho térmico geral do substrato.

Conforme menciona Hillel (2005), a temperatura do solo varia em função de mudanças a troca de energia radiante, térmica e latente, processos que ocorrem principalmente através da superfície do solo. Os efeitos desses fenômenos são propagados no perfil do solo através de uma série complexa de processos de transporte, cujas taxas são afetadas por propriedades do solo que variam em função do tempo e do espaço. Essa transmissão ou propagação de calor se dá por quatro modos distintos: condução, convecção, radiação e evaporação/condensação, os quais geralmente ocorrem de maneira simultânea. Estes são descritos a seguir, conforme Pessôa (2006).

2.5.2.1. Condução

Processo que ocorre no interior do meio, em todos os seus constituintes, via colisões entre partículas e ocasionando transferência de energia cinética. Apesar de presente tanto na parte sólida, líquida e gasosa, neste último, a condução pode ser considerada insignificante. Ao passo que aumenta a massa específica e a umidade do solo, a quantidade de calor transferida através de condução reage de maneira diretamente proporcional (Farouki, 1981), em função tanto pelo aumento do contato entre as partículas sólidas, quanto pela condutibilidade térmica da água ser maior que o ar expulso nos vazios do solo. Este mecanismo é o mais preponderantemente responsável pelas trocas de calor no solo.

2.5.2.2. *Convecção*

Ao contrário da condução, neste caso o calor se transmite por partículas do meio que se movimentam de um local para outro, não envolvendo transferência microscópica de calor por átomos ou moléculas, todavia por um movimento macroscópico, carregando partes da substância de uma região quente para uma região fria. Interocorre em líquidos e gases, entretanto, portanto geralmente desprezível em solos. Segundo Johansen (1975), os fenômenos de convecção com alguma relevância podem ser verificados em solos arenosos ou areias saturadas.

2.5.2.3. *Radiação*

Por meio desse processo, a transmissão de calor ocorre através de ondas eletromagnéticas, sem contato físico entre os corpos. De acordo com Farouki (1981), a radiação nesses casos é usualmente negligenciada, posto que seu efeito em certos tipos de solos, como os de texturas arenosas, é responsável por menos que 1% da transferência total de calor. Seu efeito pode ser notado, entretanto, em materiais de maior granulometria, como pedregulhos.

2.5.2.4. *Evaporação e Condensação*

O acréscimo da temperatura em solos não saturados provoca a evaporação da água, e subsequente aumento da pressão de vapor local. Este, por sua vez, se transporta para regiões de menor pressão de vapor através de difusão, se condensando. Através desse processo, uma quantidade significativa de calor pode ser transferida. Segundo Duarte (2004), a diminuição da densidade dos solos eleva a influência da difusão do vapor d'água, em virtude do maior número de vazios necessários nesse processo de transferência de calor.

Além dos processos de propagação de energia térmica, salienta-se a importância da análise das características térmicas do substrato. Segundo Dimitrijevic et al. (2016), para a definição do substrato de um telhado verde, as características térmicas mais importantes do solo são sua condutividade térmica, capacidade térmica, e albedo.

2.5.2.5 Albedo

O albedo, ou coeficiente de reflexão, é o poder de reflexão de uma superfície, e varia em função da cor básica do solo, a rugosidade da superfície e a inclinação da radiação incidente em relação à superfície. A curto prazo, o albedo também depende da mudança da umidade do solo exposto. Quanto mais seco, brilhante e mais suave a superfície do solo, maior o albedo e menor a temperatura da superfície, enquanto que os solos escuros absorvem mais calor do que os suaves de cor clara e, portanto, aquecem mais rápido (HILLEL, 2005).

Além disso, o albedo aumenta conforme o volume da biomassa no telhado verde. Verificando o albedo de diversas vegetações em telhados verdes, MacIvor e Lundholm (2011) aferiram que a cobertura vegetal mais eficiente aumentou o efeito de albedo em cerca de 22% em relação do controle com apenas o substrato, e mais de 200% em comparação ao telhado convencional, o que traduziu em uma diminuição de 16°C.

2.5.2.6 Capacidade Térmica ou Capacidade de Aquecimento Volumétrico

Esta propriedade é definida como a quantidade de calor que um corpo necessita receber ou ceder para que sua temperatura varie uma unidade. Resumidamente, materiais mais densos naturalmente possuem mais massa e, em razão disso, necessitam mais energia térmica para que a temperatura varie.

Para telhados verdes, geralmente, estuda-se a capacidade térmica volumétrica, ou inércia térmica, que varia principalmente em função da densidade da fase sólida do substrato, da densidade aparente e da umidade do solo (NIDAL; ABU-HAMDEH, 2003; HILLEL, 2005; SAILOR; HUTCHINSON; BOKOVOY, 2008). Sua unidade no Sistema Internacional (S.I.) é $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$, e seus respectivos valores para materiais geralmente presentes em substratos de telhados verdes são dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Capacidade Térmica Volumétrica de constituintes do solo (aos 10°C)

Material	$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Quartzo	$2,0 \times 10^6$
Outros minerais (média)	$2,0 \times 10^6$
Matéria Orgânica	$2,5 \times 10^6$
Água	$4,2 \times 10^6$
Ar	$1,25 \times 10^3$

Fonte: Hillel (1998) apud Hillel (2005, p. 158).

2.5.2.7. Condutividade Térmica

A condutividade térmica representa a quantidade de calor transferida através de uma área unitária do corpo condutor em unidade de tempo sob um gradiente de temperatura unitário. Seu inverso é a resistividade térmica, resistência apresentada pelo solo ao fluxo de calor. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a condutividade térmica é medida em unidades de watt por metro kelvin ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), e pode ser expressa conforme equação 1 a seguir.

$$\lambda = \frac{q}{A \times (\Delta T/l)} \quad (1)$$

No qual:

q – fluxo de calor (W ou J/s)

A – área da seção transversal (m^2)

ΔT – gradiente de temperatura (K ou °C)

l – distância percorrida (m)

λ - condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Ao contrário de outras propriedades térmicas como a capacidade de calor, a condutividade térmica é sensível não apenas à composição volumétrica de um solo, mas também aos tamanhos, formas e arranjos espaciais das partículas do solo (HILLEL, 2005). Além disso, a condutividade térmica de um solo depende particularmente do teor de umidade do solo, sendo a porosidade e a condutividade térmica da fração sólida também fatores determinantes (COSENZA; TABBAGH; GUÉRIN, 2003). Diversos autores (FAROUKI, 1981; TARNAWSKI; LEONG, 2000; COSENZA; TABBAGH; GUÉRIN, 2003; DUARTE, 2004; HILLEL, 2005; SANDOVAL

et al. 2015; DIMITRIJEVIC et al., 2016) atestam que a condutividade térmica do solo é diretamente proporcional ao teor de umidade do mesmo, o que se deve ao fato de a condutividade térmica do ar ser muito menor do que a da água ou matéria sólida (Tabela 4), portanto um alto teor de ar ou baixo teor de água corresponde a uma baixa condutividade térmica.

Ainda, as diferenças mineralógicas entre areia, silte e argila podem influenciar grandemente na condutividade térmica, devido à presença de quartzo nesses solos (em especial na areia), mineral de condutividade térmica consideravelmente alta, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Condutividade Térmica de constituintes do solo (aos 10°C)

Material	Wm⁻¹K⁻¹
Quartzo	8,8
Outros minerais (média)	2,9
Matéria Orgânica	0,25
Água	0,57
Ar	0,025
Solos em Geral	0,15 - 4,0
Solos Saturados	0,6 - 4,0
Areia Seca	0,15 - 0,25
Areia Úmida	0,25 - 2,0
Areia Saturada	2,0 - 4,0
Argila de Seca a Úmida	0,15 - 1,8
Argila Saturada	0,6 - 2,5
Solo Orgânico	0,15 - 2,0

Fonte: Modificado de Hillel (1998) apud Hillel (2005, p. 159); modificado de Hukseflux, (2005); modificado de Hamdhan e Clarke (2010).

Deve ser observado que, apesar de a areia saturada possuir a tendência de apresentar condutividade térmica superior em relação à argila, esta saturação é propensa a manter-se por menos tempo do que perduraria em solos argilosos, em função da alta porosidade e consequente baixa capacidade de retenção de água da areia.

Quanto à diferença da condutividade térmica entre os solos, Abu-Hamdeh e Reeder (2000) relataram que, mantendo uma umidade fixa, a condutividade térmica de um solo também é diretamente proporcional à sua densidade. Os autores também verificaram que, a partir de uma determinada densidade, o teor de água aumentou a condutividade térmica menos rapidamente no caso de argila em relação à areia, possivelmente pelo fato da água primeiramente preencher os vazios entre as

partículas de areia, que são maiores que as partículas de argila e silte, aumentando a área de contato entre as partículas. Os autores também verificaram que a condutividade térmica tende a diminuir com o acréscimo de matéria orgânica (musgo de turfa) no caso de solo franco argiloso. Ressalta-se que os autores não analisaram a umidade do solo acrescido de matéria orgânica, e, considerando a grande capacidade de retenção de água que a matéria orgânica proporciona ao solo, mais estudos associando a matéria orgânica com a condutividade térmica são necessários para confirmar a inter-relação desses atributos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental foi realizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus de Cascavel, localizada na Latitude de 24°98' Sul, Longitude 53°45' Oeste e altitude de, aproximadamente, 750 metros em relação ao nível do mar (Figura 5).



Figura 5 - Localização da instalação dos protótipos
Fonte: Google Maps (2019)

Foi realizado em três etapas: a primeira etapa foi o dimensionamento e montagem dos protótipos de telhado verde, bem como a determinação da composição de cada substrato. Essa etapa foi desenvolvida no campo experimental do Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia – CASA. A segunda etapa foi o desenvolvimento e teste de hardware e software dos sensores de monitoramento, para a aquisição de dados. A terceira etapa se trata da análise estatística dos dados monitorados, bem como a discussão dos mesmos com base em resultados e discussões similares na literatura científica.

3.1. Montagem dos Protótipos

Foi realizada a elaboração do projeto e execução de 7 protótipos, simulando residências convencionais. No total foram monitoradas as seguintes estruturas:

- 3 protótipos de telhado verde;
- 3 protótipos de telhado verde, porém sem cobertura vegetal;
- 1 protótipo de telhado convencional com telhas de barro;

O protótipo de telhado convencional com telhas de barro foi utilizado como testemunha, possibilitando a comparação da temperatura interna de estrutura com telhados verdes e com telhado convencional.

Quanto aos protótipos de telhado verde sem cobertura vegetal, estes foram desenvolvidos para eliminar o crescimento da vegetação como uma variável que influencie a temperatura interna do ambiente, uma vez que a cobertura vegetal pode ter crescimento, e conseqüentemente uma massa aérea e massa radicular diferente em cada tipo de substrato, potencialmente interferindo e mascarando os resultados. Além disto, a análise da temperatura destes permite a obtenção de mais dados das propriedades físicas do solo, sem a influência do fator vegetação.

A etapa construtiva dos protótipos ocorreu da seguinte maneira:

- Levantamento da estrutura de madeira;
- Inserção das telhas de barro (somente no protótipo testemunha);
- Aplicação de pintura externa na estrutura de madeira;
- Aplicação da camada impermeabilizante sobre a cobertura do protótipo de telhado verde;
- Instalação dos drenos de água na parte frontal do protótipo;
- Colocação da camada drenante sobre a camada de impermeabilização;
- Colocação da camada filtrante e anti-raíz sobre a camada drenante;
- Colocação do substrato;
- Inserção da cobertura Vegetal;

As estruturas dos mesmos foram construídas com tábuas e caibros de pinus e pregos. A superfície do protótipo possui um caimento de 10% para escoamento da água pluvial. Seu layout está ilustrado na Figura 6:

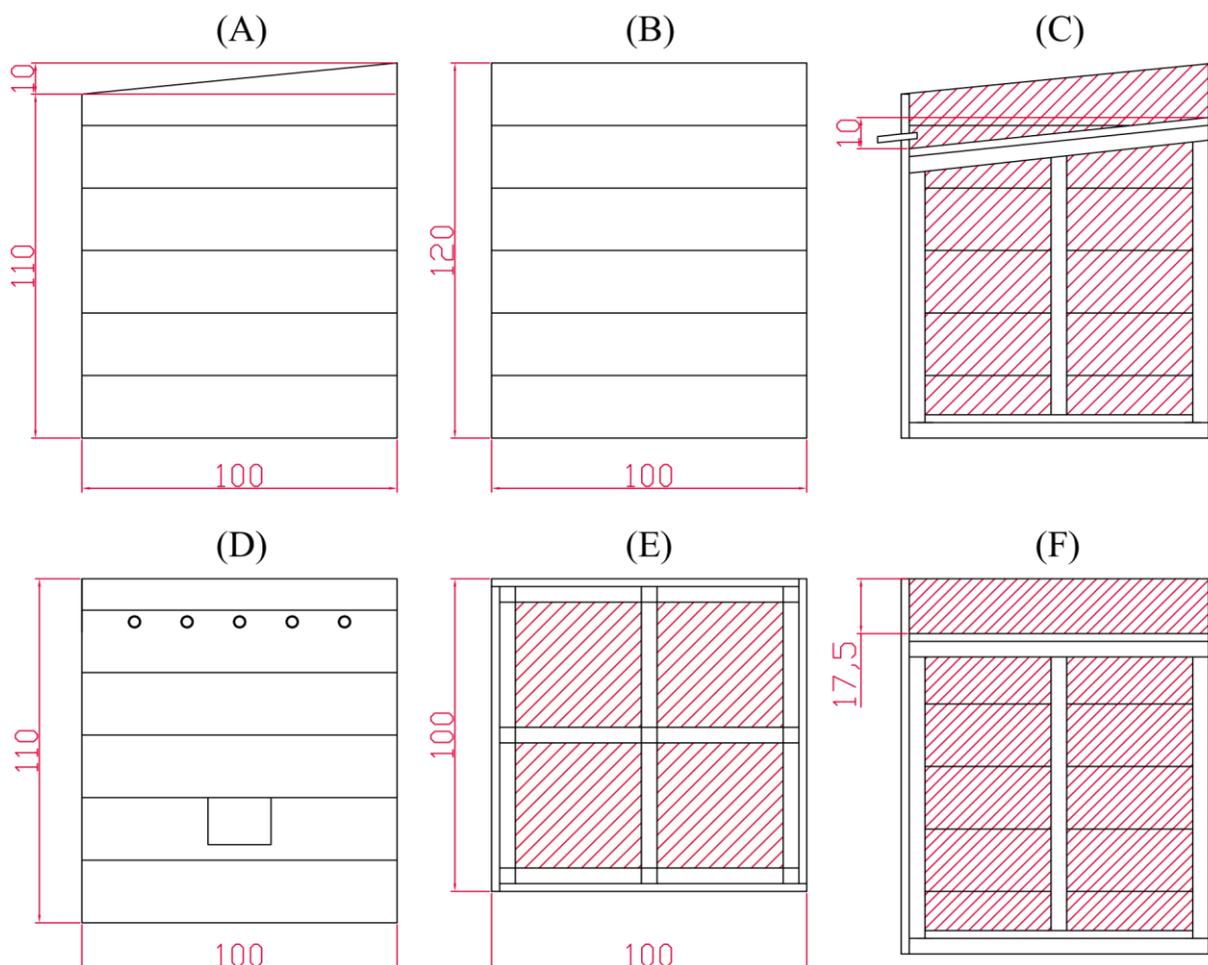


Figura 6 – Dimensões e desenho técnico dos protótipos de telhado verde, incluindo vista lateral (A), vista posterior (B), corte da vista lateral (C), vista frontal (D), vista superior (E), e corte da vista posterior (F).

Fonte: Imagem construída pelo autor utilizando o software AutoCAD 2018.

No caso do protótipo do telhado convencional com telhados de barro, a estrutura diferiu ligeiramente apenas pelo fato de os caibros de suporte se situarem exatamente no topo da estrutura para assentar as telhas, ao contrário dos protótipos de telhado verde, em que a base de suporte se situa a 17,5 cm abaixo do topo. Os protótipos construídos podem ser observados na Figura 7:



Figura 7: Protótipos instalados no Campo experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Fonte: O autor.

Foi aplicado externamente um fundo preparador à base de tinta óleo juntamente com tinta esmalte para afim de tornar a estrutura menos suscetível aos efeitos de sol, chuva, vento, outras intempéries e fungos. Em relação às camadas constituintes do telhado verde, foram instaladas conforme ilustrado na Figura 8:

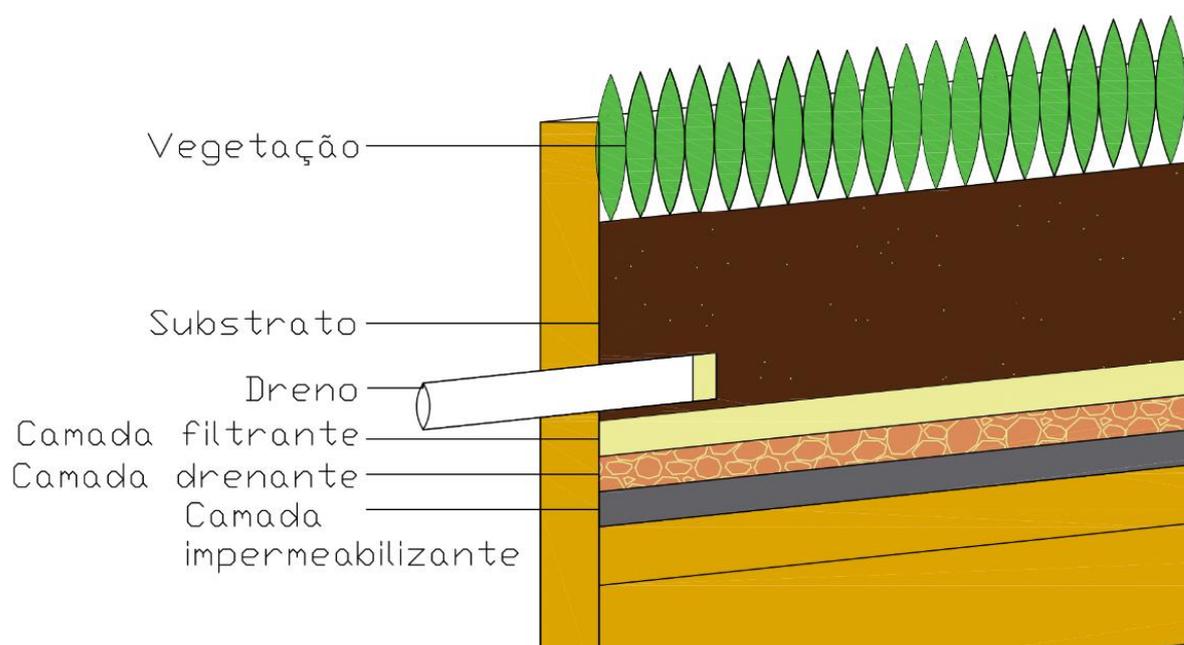


Figura 8: Camadas componentes do telhado verde.

Fonte: Imagem construída pelo autor utilizando o software AutoCAD 2018.

A camada impermeabilizante utilizada foi a manta asfáltica autoadesiva, comumente aplicada em lajes para esta finalidade. A camada drenante e filtrante são compostas por argila expandida e filtro geotêxtil, respectivamente. Além destas camadas, para escoar o excesso de água da chuva não absorvida pelo substrato, foram instalados drenos barbacã, usualmente instalados em muros de contenção, com a finalidade de permitir a passagem e evitar o acúmulo de água. Estes são feitos de tubo PVC de 20 mm por 10 cm de comprimento, instalados na parte frontal dos protótipos de telhado verde, e serão revestidos internamente com filtro geotêxtil para não permitir a passagem do substrato pelos mesmos. A espécie da cobertura vegetal escolhida foi a grama esmeralda (*Zoysia japônica*) por possuírem alta tolerância à seca e temperaturas baixas (CHRISTIANS, PATTON e LAW, 2016; CAI, YAMADA e KOLE, 2016), ideais ao clima de Cascavel-PR.

Quanto aos substratos, a diferença da textura entre estes é essencial para discernir a influência que cada tipo de solo promove no desempenho térmico dos telhados verde, uma vez que cada um apresenta características físicas e químicas bem distintas. Portanto, cada protótipo é um tratamento diferente, variando da seguinte maneira:

- P1: Protótipo com cobertura de telhas de barro (testemunha);
- P2: Protótipo de substrato argiloso COM vegetação;
- P3: Protótipo de substrato arenoso SEM vegetação;
- P4: Protótipo de substrato arenoso COM vegetação;
- P5: Protótipo de substrato de matéria orgânico (M.O.) SEM vegetação;
- P6: Protótipo de substrato argiloso SEM vegetação;
- P7: Protótipo de substrato de M.O. COM vegetação.

Nos substratos a base de solo foram realizados ensaios de granulometria e densidade afim de determinar com precisão o teor de argila, silte, areia, e massa específica deste solo, e também adicionado húmus até atingir um teor de matéria orgânica de aproximadamente 5% (em massa) para garantir condições adequadas à nutrição e sobrevivência da cobertura vegetal. Já no substrato de M.O., foi utilizado uma mistura de esterco bovino com matéria vegetal seca (galhos e folhas). A Tabela 5 a seguir esquematiza os dados obtidos para cada substrato:

Tabela 5 – Granulometria e densidade aparente dos substratos

Parâmetros	Substrato		
	<i>Argiloso</i>	<i>Arenoso</i>	<i>M.O.</i>
% areia	12,7 ¹	69,8 ¹	-
% argila	53,7 ¹	17,3 ¹	-
% silte	33,6 ¹	12,9 ¹	-
Densidade aparente (g/cm³)	1,09 ²	1,46 ³	0,29 ³

1 - Método do densímetro (BOUYOUCOS, 1927), 2 - Método do anel volumétrico (KIEHL, 1979); 3 - Método da proveta (EMBRAPA SOLOS, 2017).

Para o substrato arenoso, foi utilizado o mesmo solo do substrato argiloso como base, porém adicionada areia até alcançar teor predominantemente arenoso. Ressalta-se que, apesar de ser um substrato arenoso, não se equivale ao solo natural arenoso, vide que este passa por um longo processo de intemperização e possui diferentes características físicas e químicas. Dessa maneira, esse substrato foi desenvolvido com o intuito de simular as características similares ao solo arenoso natural, como por exemplo a capacidade de retenção de água inferior, em razão das dificuldades de se encontrar solo naturalmente arenoso na região.

Os protótipos tiveram sua temperatura interna e superficial (substrato) monitoradas 24 horas por dia durante um mês. Após realizada a coleta dos dados, os mesmos foram analisados e confrontados os dados com valores da literatura, afim de discutir e compreender os resultados obtidos.

3.2. Sensores de monitoramento

O Arduino é uma plataforma de hardware e software livre utilizada por diversos pesquisadores e pela indústria de automação. Seu custo comparativamente a outras plataformas é muito baixo e permite que o desenvolvedor não esteja preso a nenhum fabricante específico. Outra grande vantagem é a possibilidade de encontrar na internet todo tipo de exemplo de uso para a integração com outros equipamentos e sensores (DINIZ, 2017). Por estas razões, o hardware desenvolvido nesta pesquisa tem como base principal esta plataforma. O projeto tem na sua base um circuito Arduino integrado através de suas portas analógicas e/ou digital com os sensores, e como o equipamento precisou estar no campo, foi acondicionada em uma caixa apropriada isolando-o das intempéries.

Foi realizado o monitoramento da temperatura interna de todos os 7 protótipos, bem como a temperatura do substrato dos 6 protótipos de telhado verde. Ainda, foi monitorada a temperatura e umidade relativa ambiente, para possibilitar a correlação dos parâmetros do substrato em função das características do ambiente em que é instalado. Para tal, foram utilizados os seguintes componentes eletrônicos, com suas respectivas funções:

- Arduino Mega; como micro controlador para o nó da rede de sensores,
- Sensor de Umidade e temperatura do ar AM2302 DHT-22; capacitivo e digital, com precisão de 0,1 °C (AOSONG, 2013);
- Sensor de temperatura a prova d'água DS18B20; digital e com precisão de 0,5 °C (MAXIM INTEGRATED, 2015);
- Protoboard ou placa de ensaio, para permitir a inserção de vários componentes eletrônicos de forma organizada e sem necessidade de solda;
- Micro adaptador SD e cartão micro SD: Armazenar os dados coletados;
- Jumpers: Fios que conectam os dispositivos;

O esquema básico de configuração e alimentação dos sensores é representado na Figura 9:

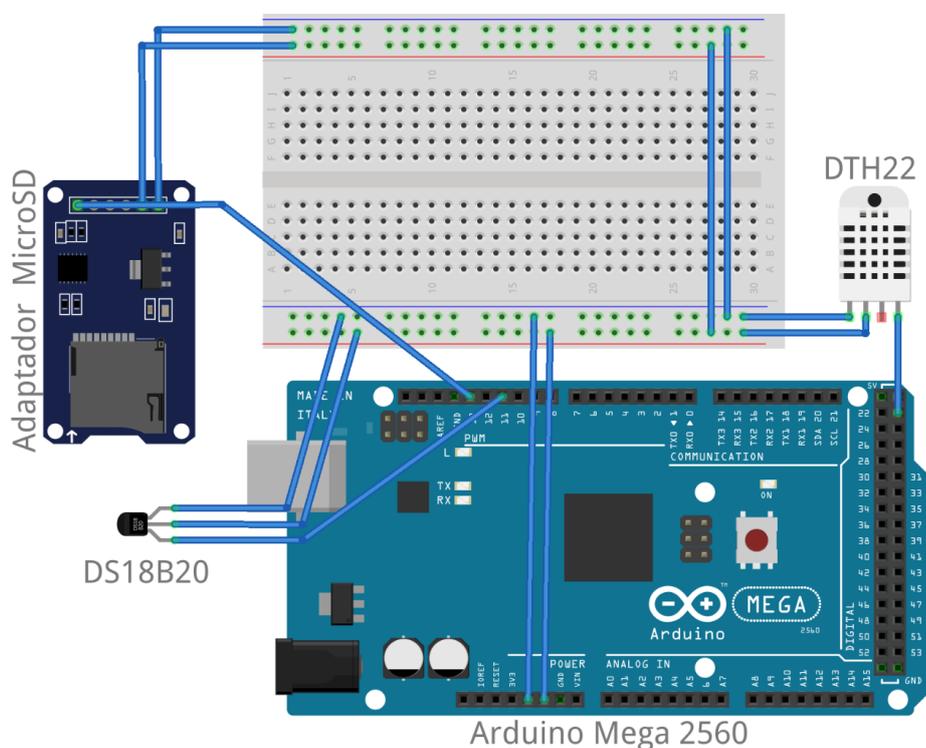


Figura 9: Circuito do nó (protótipo).

Fonte: Imagem elaborada pelo autor utilizando o software Fritzing.

Os dados eram registrados e armazenados a cada intervalo de 15 segundos para maior volume e confiança de informações, durante as 24 horas dos 30 dias monitorados. O resultado final da montagem dos protótipos e sensores pode ser observado na Figura 10 abaixo:



Figura 10: Protótipos instalados no Campo experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, com sensores já implementados.

Fonte: O autor.

3.3. Análise estatística

O delineamento experimental foi casualizado em blocos (DBC), no qual os tratamentos eram os diferentes protótipos: P1 a P7; as variáveis resposta eram a temperatura interna e superficial dos mesmos, e as repetições eram os diferentes dias monitorados ao longo do mês (30 repetições). Para que a variação térmica ao longo do dia não provocasse influência nos resultados, a análise estatística foi realizada para cada hora do dia, totalizando 24 análises estatísticas, com 30 repetições (dias) e 7 tratamentos (protótipos) cada.

O delineamento adotado foi o DBC em virtude de uma variável que obviamente ocorre a cada repetição: a variação térmica e climática dos diferentes dias. Como não há interesse no estudo em avaliar a diferença estatística entre os dias (é uma variável que, apesar de exercer influência, não havia interesse para ser

analisada, sendo o tempo, portanto, o bloco), este é um delineamento que se aplica otimamente. O posicionamento dos protótipos também foi realizado de maneira aleatória para minimizar interferências.

Salienta-se que o procedimento de análise a cada hora torna-se interessante também para possibilitar a visualização do desempenho térmico de cada protótipo em função da temperatura ambiente de cada momento, e não da temperatura média do dia inteiro, que implicaria em dados e conclusões mascaradas.

Após coletados os dados, os mesmos foram inseridos no software Sisvar 5.6, *software* gratuito de análises estatísticas e planejamentos experimentais (FERREIRA, 2014). Por meio do mesmo, os dados foram submetidos à uma análise de variância para verificar a necessidade de um teste de comparação de médias, sendo que se optou por utilizar o teste Tukey a 5% de probabilidade. Este teste foi escolhido por se mostrar adequado e rigoroso ao comparar tratamentos qualitativos (diferentes tipos de substratos) com variáveis resposta quantitativas (MEDEIROS, 2014).

Vale comentar que a coleta de dados ocorreu entre os dias 18 de novembro e 19 de dezembro. Esta data decorre no fim da primavera e se mostra interessante para avaliar resultados em um momento de temperaturas razoavelmente elevadas, o que não propicia a tendência dos dados para um extremo, como possivelmente ocorreria no verão ou inverno.

Desta maneira foi possível determinar com precisão o desempenho térmico de cada protótipo em função do componente do substrato, e por meio dos dados coletados de temperatura, correlacionar índices físicos como a condutividade e capacidade térmica e albedo com cada substrato, e determinar aquele mais apto a proporcionar o desempenho térmico ideal para ser utilizado em telhados verdes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura interna de cada protótipo, juntamente com a temperatura ambiente, variou ao longo do dia atingindo temperaturas máximas entre os horários de 14:00 e 16:00, e temperaturas mínimas entre as 05:00 e 06:00, como é possível observar na Figura 11 abaixo, que ilustra as temperaturas médias registradas em função do horário da coleta.

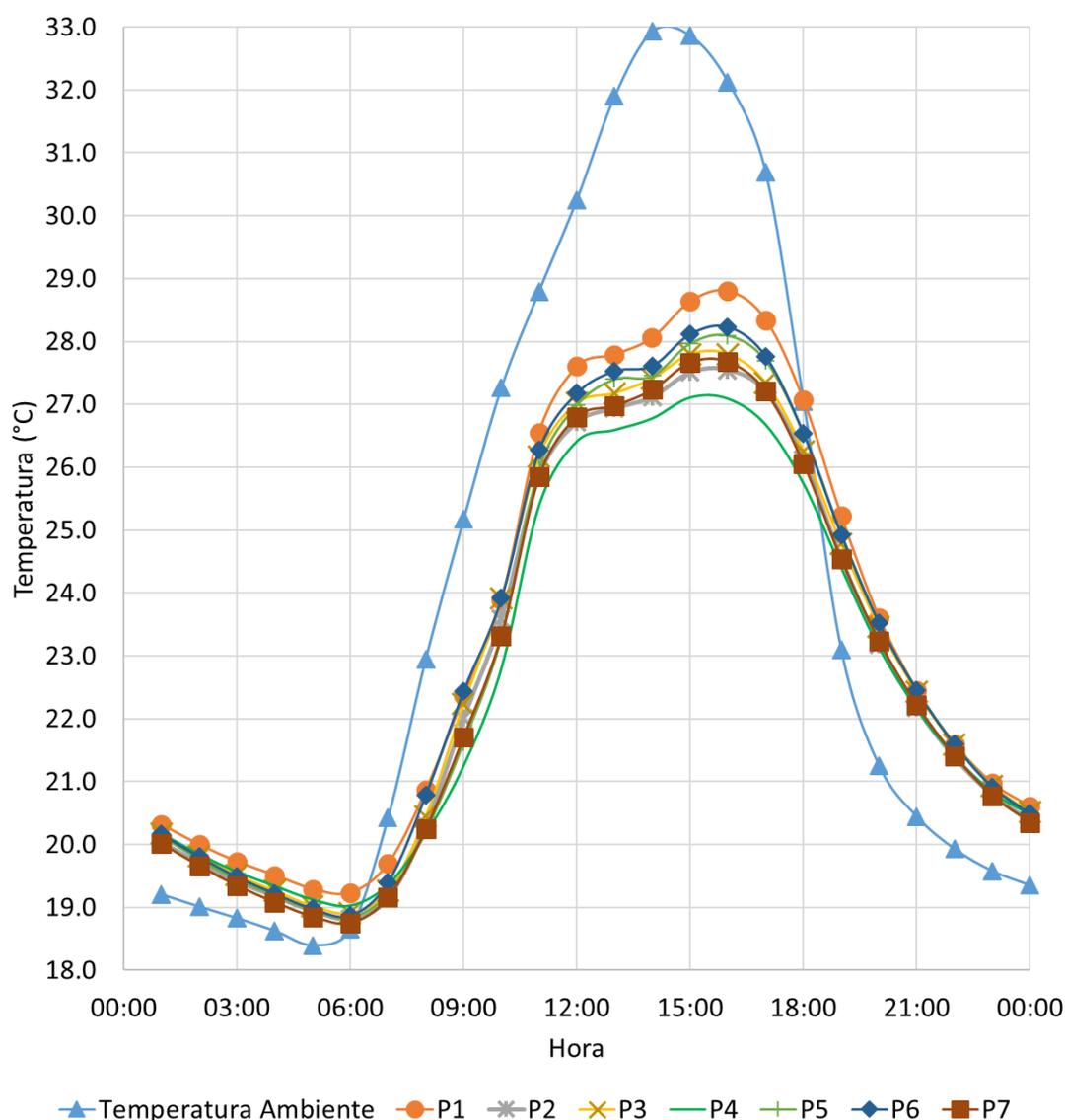


Figura 11: Temperaturas médias internas e ambiente.

Fonte: O autor (2020).

(P1 - protótipo testemunha com telhas de barro, P2 - protótipo de substrato argiloso com vegetação, P3 - protótipo de substrato arenoso sem vegetação, P4 - protótipo de substrato arenoso com vegetação, P5 - protótipo de substrato de matéria orgânica sem vegetação, P6 - protótipo de substrato argiloso sem vegetação, P7 - protótipo de substrato de matéria orgânica com vegetação).

Pela Figura 11 percebe-se que nos horários em que a temperatura está mais elevada, também elevou a discrepância entre as temperaturas internas dos protótipos, enquanto que em horários de temperaturas mais amenas, o desempenho térmico dos protótipos parece pouco diferir entre si. Entretanto, nota-se uma predominância visível do protótipo testemunha com telhas de barro (P1) como sendo o de temperatura mais elevada em relação aos demais, resultado esperado considerando a eficácia já consagrada do desempenho térmico de telhados verdes.

Na outra extremidade, o protótipo de substrato arenoso com vegetação (P4) se sobressaiu em reduzir a temperatura interna, chegando a ser em média 1,7°C mais frio que o protótipo testemunha nos horários mais quentes. No período mais quente do dia (entre 14:00 e 16:00), a média de temperaturas internas dos protótipos de telhado verde alcançou valor 5,5°C inferior em relação a temperatura ambiente, chegando a 6,1°C ao se analisar somente o P4.

Ainda analisando a Figura 11, percebe-se também a capacidade de todos os protótipos em reterem certa parte do calor nos períodos cuja temperatura é mais amena, de maneira a superarem a temperatura externa entre as 18:00 e 06:00. Este fator é importante quando se considera o desempenho térmico, uma vez que, apesar de relativo, o conceito desempenho basicamente se resume em reduzir temperaturas muito elevadas, bem como elevar temperaturas baixas, de modo a amenizar mudanças bruscas de temperaturas do meio externo por meio da inércia térmica.

Para que seja possível analisar com clareza quais protótipos possuem de fato desempenho térmico significativamente distintos entre si, deve-se analisar a Tabela 6 na página à seguir, na qual estão dispostos os resultados da análise estatística das temperaturas médias em função de cada hora do dia.

Tabela 6 – Médias de temperatura interna dos protótipos em relação ao período do dia.

Hora	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
00:00 - 01:00	20.48 C	20.22 A	20.36 B	20.35 B	20.34 B	20.35 B	20.2 A
01:00 - 02:00	20.15 D	19.86 AB	19.99 C	20.01 C	19.94 BC	19.98 C	19.82 A
02:00 - 03:00	19.84 D	19.55 AB	19.65 C	19.69 C	19.59 BC	19.63 BC	19.49 A
03:00 - 04:00	19.61 D	19.28 AB	19.37 BC	19.45 C	19.31 B	19.34 B	19.19 A
04:00 - 05:00	19.41 D	19.07 B	19.15 BC	19.24 C	19.07 B	19.1 B	18.96 A
05:00 - 06:00	19.17 D	18.82 AB	18.89 B	19.02 C	18.85 B	18.86 B	18.74 A
06:00 - 07:00	19.29 D	18.82 AB	18.92 B	19.05 C	18.84 AB	18.88 B	18.75 A
07:00 - 08:00	20.1 D	19.48 A	19.61 AB	19.69 B	19.6 AB	19.92 C	19.56 AB
08:00 - 09:00	21.63 D	21.14 BC	21.29 C	20.67 A	20.84 A	21.66 D	20.93 AB
09:00 - 10:00	23.09 C	22.88 C	23.19 C	21.85 A	22.42 B	23.22 C	22.49 B
10:00 - 11:00	24.69 C	24.31 B	24.65 C	23.77 A	24.17 B	24.61 C	24.15 B
11:00 - 12:00	28.4 E	27.42 B	27.69 BCD	27.03 A	27.8 CD	27.93 D	27.55 BC
12:00 - 13:00	26.8 E	26 AB	26.35 CD	25.8 A	26.18 BC	26.42 D	26.05 B
13:00 - 14:00	27.72 E	26.81 B	27.14 CD	26.53 A	27.1 CD	27.29 D	26.91 BC
14:00 - 15:00	28.4 E	27.42 B	27.69 BCD	27.03 A	27.8 CD	27.93 D	27.55 BC
15:00 - 16:00	28.87 E	27.59 B	27.91 BC	27.19 A	28.14 CD	28.3 D	27.78 B
16:00 - 17:00	28.73 E	27.5 B	27.69 BC	26.99 A	28.05 CD	28.16 D	27.57 B
17:00 - 18:00	27.95 E	26.89 B	26.99 BC	26.36 A	27.34 CD	27.36 D	26.84 B
18:00 - 19:00	26.18 D	25.35 AB	25.52 BC	25.12 A	25.75 C	25.72 C	25.27 AB
19:00 - 20:00	24.27 C	23.75 A	24.04 B	23.68 A	24.13 BC	24.13 BC	23.8 A
20:00 - 21:00	22.95 B	22.61 A	22.89 B	22.59 A	22.93 B	22.92 B	22.67 A
21:00 - 22:00	21.96 B	21.73 A	21.96 B	21.74 A	21.99 B	21.98 B	21.77 A
22:00 - 23:00	21.23 B	21.04 A	21.21 B	21.08 A	21.22 B	21.2 B	21.05 A
23:00 - 00:00	20.72 D	20.54 AB	20.66 CD	20.6 BC	20.65 CD	20.63 BCD	20.5 A
Média Diária	23.40 A	21.75 A	23.03 A	22.69 A	23.00 A	23.15 A	22.82 A

Fonte O autor (2020).

(P1 - protótipo testemunha com telhas de barro, P2 - protótipo de substrato argiloso com vegetação, P3 - protótipo de substrato arenoso sem vegetação, P4 - protótipo de substrato arenoso com vegetação, P5 - protótipo de substrato de matéria orgânica sem vegetação, P6 - protótipo de substrato argiloso sem vegetação, P7 - protótipo de substrato de matéria orgânica com vegetação). Médias seguidas de letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Por meio desta, primeiramente, pode-se confirmar a ineficiência térmica do protótipo testemunha (P1) em relação aos demais, ao mesmo tempo que se constata o oposto referente ao protótipo de substrato arenoso com vegetação (P4), uma vez que este se apresentou adequado em reduzir as temperaturas externas nos momentos de maior incidência de calor, ao passo que mantém o calor no protótipo nos períodos mais frios do dia. Isto explica-se em função o fenômeno da inércia térmica, no qual se requer um tempo para que ocorram trocas de energia térmica entre o meio interno e externo, explicando o calor absorvido durante o dia ser liberado ao longo da noite.

Através da Tabela 6, é possível observar também que os protótipos de substrato argiloso e arenoso com vegetação (P2, P4) predominam-se em faixas de temperaturas menos elevadas em relação aos seus similares sem vegetação (P3, P5), o que pode ser facilmente explicado pelos benefícios oriundos da camada vegetal acima do substrato - reduz a temperatura através da evapotranspiração, eleva a inércia térmica pelo acréscimo de massa vegetal, diminui a condutividade térmica geral do sistema em função do ar presente dentro a vegetação, gera sombreamento e conseqüente redução da exposição direta do substrato à exposição solar, o que aumenta significativamente o albedo da estrutura (HILLEL, 2005; MACLVOR; LUNDHOLM, 2011). Observa-se, ainda, que não somente os protótipos de substrato sem vegetação apresentaram desempenho térmico inferior, como quase atingiram temperaturas similares ao protótipo testemunha com telhas de barro (P1), o que supostamente ocorre em função da cor escura desses substratos, levando ao decréscimo do albedo.

Entretanto, uma exceção ocorre nos protótipos de substrato de matéria orgânica, cujas temperaturas pouco variam entre si, independente da presença de vegetação ou não. Isto pode ser esclarecido pelo fato de a vegetação não ter se desenvolvido bem no protótipo de substrato de matéria orgânica, uma vez que este visivelmente apresentou baixíssima capacidade de retenção de água, o que é um resultado contraditório, considerando as expectativas sobre as propriedades da matéria orgânica, dentre as quais incluem alta capacidade de retenção de água. Ressalta-se, entretanto, que este substrato foi composto majoritariamente por esterco bovino, cujo período de decomposição e estabilização não foi monitorado. Levando-se em conta que a estabilidade, ou maturidade, é característica importante de qualidade para um adubo orgânico (WU; MA, 2001), a fermentação desta matéria

orgânica, também conhecida como “curtida”, pode não ter ocorrido de maneira correta e/ou por tempo o bastante para que se atinjam as propriedades físicas e químicas desejadas, tal como a adequada retenção de água neste trabalho.

Em se tratando de solos com textura argilosa, sabe-se que a capacidade de retenção de água destes costuma ser elevada. Visto que, em função da inércia térmica, é necessário mais calor para aquecer um solo úmido do que seco, leva-se a crer que os substratos de textura argilosa apresentariam maior isolamento de fontes térmicas externas. Entretanto, isso não foi exatamente observado (Tabela 6), dado que nos períodos de maior incidência solar, o protótipo de substrato argiloso com vegetação (P2) esteve em média 0,6 °C mais elevado internamente que o protótipo de substrato arenoso com vegetação (P4), de capacidade de retenção de água consideravelmente inferior. Tal fato pode ser explicado primeiramente em função da densidade aparente naturalmente inferior do substrato argiloso (1,09 g/cm³) em comparação ao substrato arenoso (1,47 g/cm³), o que promove redução inicial da inércia térmica do sistema (HILLEL, 2005; SAILOR, HUTCHINSON e BOKOVOY, 2008).

A razão principal, no entanto, encontra-se ao associar outra propriedade física - a condutividade térmica. Uma vez que a entrada de água nos poros do solo tende a ocupar o espaço previamente preenchido pelo ar, o qual é um isolante térmico mais eficaz que a água, a condutividade térmica média do solo tende a aumentar, sobrepondo os benefícios obtidos pela inércia térmica. À exemplo disso, Sailor, Hutchinson e Bokovoy (2008) descobriram que, para solos saturados, a capacidade térmica e condutividade térmica aumenta em 40 % e 100 % respectivamente, quando comparado ao solo seco. Constatando-se o resultado desses autores e relacionando aos resultados do presente trabalho, sugere-se que solos com alta capacidade de retenção de água não são os mais ideais para o isolamento térmico, uma vez que, conforme ocorre o aumento da umidade nestes solos, o aumento da condutividade térmica, que é um fator indesejável no isolamento térmico, aumenta à uma taxa 2,5x mais rápida do que a inércia térmica. Desta forma, a alta porosidade do solo arenoso, ao permitir que este não retenha água (e conseqüentemente aumente sua condutividade térmica) por longos períodos, é um dos fatores que mais explica seu alto desempenho térmico.

Visto que a alta capacidade de retenção de água é um fator parcialmente indesejável para o isolamento térmico, supõe-se que o protótipo de substrato

composto por matéria orgânica com vegetação (P7) apresentaria resultados similares ou superiores aos demais, uma vez que este substrato apresenta a menor das capacidades de retenção hídrica. Observa-se, porém, que este apresenta temperaturas similares ou superiores até mesmo em relação ao protótipo de textura argilosa, de alta capacidade de retenção hídrica. Além do fato de a vegetação não ter se desenvolvida similarmente aos outros protótipos, isto também pode ser explicado pela baixíssima densidade aparente deste substrato ($0,29 \text{ g/cm}^3$), o que conseqüentemente promove a menor das capacidades térmicas dentre os substratos utilizados.

Este resultado corrobora em parte com os obtidos por Sandoval et al. (2015), que, ao analisarem diferentes modelos de protótipos com substratos sem vegetação superficial, notaram que o substrato argiloso com tijolos moídos foi o que apresentou não somente a menor capacidade de retenção de água, como também o menor acréscimo de condutividade térmica quando saturado. Apesar disso, o substrato composto por perlita e turfa, que além de apresentar maior capacidade de retenção de água, possuía maior aumento de condutividade térmica, foi o que mais atenuou a temperatura externa. Conforme mencionado por estes autores, estes resultados sugerem que o comportamento térmico do telhado verde depende da associação das propriedades térmicas do substrato com as propriedades relacionadas ao seu comportamento hidráulico, bem como a interação de ambas.

Analisando os três substratos em função da capacidade de retenção de água, entende-se que valores muito elevados e valores muito inferiores são igualmente indesejáveis em se tratando do desempenho térmico. É imprescindível que haja certa retenção, tanto para ganhos moderados de capacidade térmica, como para disponibilidade hídrica às plantas, porém não a ponto de elevar significativamente a condutividade térmica (quanto úmido) e obstruir os demais benefícios.

Ao se analisar a última linha da Tabela 6, verifica-se que a média diária de todos os protótipos se encontra estatisticamente na mesma faixa de temperatura, ou seja, embora exista uma variação visível nos valores médios, estatisticamente não há diferenças significativas entre si. Considerando todas as diferenças observadas e discutidas entre os protótipos, ressalta-se a importância da análise da temperatura a cada período do dia, pela qual é possível identificar o comportamento térmico de cada substrato sob diferentes condições climáticas. Como as temperaturas internas e externa possuem a tendência de inverter do dia para a noite, a média destas ocultaria

as individualidades de cada substrato. Esta inversão térmica pode ser bem elucidada na Tabela 7 na página seguinte, na qual estão esquematizadas as temperaturas médias do substrato de cada protótipo ao longo do dia.

Tabela 7 – Temperatura média dos substratos em função do período do dia

Hora	P2	P3	P4	P5	P6	P7
00:00 - 01:00	24.27 C	21.1 A	23.47 BC	23.87 BC	21.17 A	23.07 B
01:00 - 02:00	23.95 D	20.32 A	23.18 BC	23.57 CD	20.44 A	22.45 B
02:00 - 03:00	23.57 D	19.7 A	22.86 C	23.23 CD	19.71 A	21.93 B
03:00 - 04:00	23.31 D	19.18 A	22.42 C	22.86 CD	19.14 A	21.39 B
04:00 - 05:00	23 D	18.76 A	22.16 C	22.59 CD	18.6 A	20.98 B
05:00 - 06:00	22.67 D	18.35 A	21.8 C	22.24 CD	18.19 A	20.55 B
06:00 - 07:00	22.42 D	18.05 A	21.55 C	21.99 CD	17.82 A	20.23 B
07:00 - 08:00	22.24 D	18.25 A	21.32 C	21.78 CD	17.97 A	20.03 B
08:00 - 09:00	22.71 D	19.27 A	21.26 C	21.99 CD	18.83 A	20.12 B
09:00 - 10:00	22.65 D	20.88 AB	21.33 BC	21.99 CD	20.33 A	20.63 AB
10:00 - 11:00	22.93 BC	23.06 C	22.11 AB	22.52 BC	22.28 ABC	21.39 A
11:00 - 12:00	23.72 BC	25.22 D	22.9 AB	23.3 AB	24.37 CD	22.5 A
12:00 - 13:00	24.98 B	27.33 C	23.6 A	24.3 AB	26.47 C	23.87 AB
13:00 - 14:00	25.18 A	29.32 B	24.25 A	24.72 A	28.35 B	25.02 A
14:00 - 15:00	25.45 A	30.66 B	24.85 A	25.15 A	29.83 B	26 A
15:00 - 16:00	25.66 AB	25.65 AB	25.35 A	25.5 A	30.49 C	26.74 B
16:00 - 17:00	25.8 AB	30.76 C	25.37 A	25.59 A	30.51 C	27.04 B
17:00 - 18:00	26.09 AB	29.87 C	25.39 A	25.74 AB	29.77 C	27.13 B
18:00 - 19:00	25.89 AB	28.37 C	25.27 A	25.58 AB	28.53 C	26.8 B
19:00 - 20:00	25.44 AB	26.67 BC	25.2 A	25.32 AB	26.94 C	26.26 ABC
20:00 - 21:00	25.34 A	25.17 A	24.86 A	25.11 A	25.45 A	25.61 A
21:00 - 22:00	25.1 B	23.88 A	24.53 AB	24.82 AB	24.15 AB	25.01 AB
22:00 - 23:00	24.79 B	22.65 A	24.17 B	24.48 B	22.93 A	24.22 B
23:00 - 00:00	24.49 B	21.69 A	23.86 B	24.17 B	21.88 A	23.57 B

Fonte O autor (2020).

(P2 - protótipo de substrato argiloso com vegetação, P3 - protótipo de substrato arenoso sem vegetação, P4 - protótipo de substrato arenoso com vegetação, P5 - protótipo de substrato de matéria orgânica sem vegetação, P6 - protótipo de substrato argiloso sem vegetação, P7 - protótipo de substrato de matéria orgânica com vegetação). Médias seguidas de letras iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se, na Tabela 7, certa similaridade com a Tabela 6, na qual os protótipos cujo desempenho térmico havia sido superior, paralelamente apresentou temperaturas do substrato inferiores nos períodos mais quentes, bem como temperaturas superiores em períodos mais frios do dia. Há uma exceção notável, porém, no protótipo de substrato de M.O. sem vegetação (P5), o qual havia apresentado desempenho térmico relativamente baixo em relação aos demais. Quando se analisa a temperatura do substrato, este tende a apresentar, juntamente com o substrato arenoso com vegetação (P4), as menores temperaturas durante períodos mais ensolarados, ocorrendo inversão térmica na madrugada. Esta baixa temperatura provavelmente não se converte em redução da temperatura interna do protótipo em função da baixa condutividade térmica natural que a matéria orgânica fornece ao solo (ABU-HAMDEH; REEDER; 2000), o que significa que a mesma não possui tendência de reter o calor. Entretanto, devido à densidade quase irrisória da matéria orgânica, esta não oferece muita proteção a irradiação e calor solar.

Nota-se, ainda (Tabela 7), que as variações térmicas entre o período vespertino e noturno tende a ser mais visível nos protótipos em que a vegetação se desenvolveu de maneira adequada (P2, P4), enquanto nos protótipos sem vegetação a discrepância é amenizada (P3, P6). O efeito da cobertura na temperatura do solo é determinado principalmente pela alteração no balanço energético, a qual a cobertura vegetal intercepta a radiação solar antes desta atingir o solo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Dessa forma, o calor é mais facilmente dissipado pelas plantas, visto que as mesmas possuem mecanismos fisiológicos de defesa, como a transpiração, que evitam o superaquecimento e as mantêm arrefecidas.

É de suma importância destacar que, por razões construtivas, os protótipos foram dimensionados e executados com dimensões de apenas 1 x 1 x 1 m, de modo que a incidência solar atuante nas paredes (lateral) dos protótipos seja similar ou possivelmente maior (em certos horários) do que a mesma que ocorre na cobertura (superficial). Conforme a incidência solar superficial for maior que a incidência lateral, a perspectiva é que os efeitos da cobertura verde se acentuem, de maneira a apresentar resultados cada vez mais expressivos e notórios.

4. CONCLUSÃO

- Os protótipos com resultados mais expressivos em se tratando de melhor desempenho térmico e potencial econômico-energético foram, em ordem decrescente: o de substrato arenoso com vegetação (P4); substrato argiloso com vegetação (P2); substrato de matéria orgânica com vegetação (P7); substrato arenoso sem vegetação (P3); substrato de matéria orgânica sem vegetação (P5); substrato argiloso sem vegetação (P6); protótipo testemunha com telhas de barro (P1).
- A condutividade térmica aparenta ser um fator mais relevante do que a capacidade térmica volumétrica (inércia térmica), em se tratando das trocas de calor em substratos de telhado verde; com exceção nos quais a densidade inicial do substrato for demasiadamente inferior às demais;
- O albedo é um fator igualmente importante no arrefecimento interno de estruturas, porém, em se tratando de telhados verdes com vegetações igualmente desenvolvidas, não aparenta exercer influência considerável;
- Para que o substrato apresente desempenho térmico ideal, este deve possuir capacidade de retenção de água apenas o suficiente para garantir desenvolvimento da vegetação, porém não excessivo a ponto de constantemente elevar a condutividade térmica em função da saturação do substrato.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-HAMDEH, N. H.; REEDER, R. C. Soil Thermal Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 64, n. 4, p. 1285-1290, 2000. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>

ADIVET - **Association Française des Toitures et Façades Végétales**, 2018
Disponível em: < <http://www.adivet.net>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

AL-KAYSSI, A. W.; KARAGHOULI, A. A.; HASSON, A. M.; BEKER, S. A. Influence of Soil Moisture Content on Soil Temperature and Heat Storage under Greenhouse Conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [S.l.], v. 45, p.241-252, 1990.

AMPIM, P. A. Y., SLOAN, J. J., CABRERA, R. I., HARP, D. A., JABER, F. H. Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties. **Journal of Environmental Horticulture**, Dallas, v. 28, n. 4, p. 244-252, 2010.

AOSONG. **Temperature and humidity module**: AM2302 Product Manual. 2013.
Disponível em:
<https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT22_AM2302.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, p. 12. 2016.

BARBIERI, J. C. **Gestão Ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. São Paulo: Saraiva, 2007.

BARRIO, E. P. D. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 2, p. 179-193, 1998.

BEATTIE, D. and R. BERGHAGE. 2004. Green roof media characteristics: The basics. p. 411–416. In: Proc. of the 2nd North American Green Roof Conference: **Greening**

Rooftops for Sustainable Communities, Portland, OR. June 2–4, 2004. The Cardinal Group, Toronto, Canada.

BERRETTA, C., POË, S., & STOVIN, V. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 374-386, 2014.

BEVILACQUA, P.; MAZZEO, D.; BRUNO, R.; ARCURI, N. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. **Energy and Buildings**, v. 122, p. 63–79, 2016.

BLUMENAU. **Lei Municipal Complementar n.1174, de 2018**. Regularização de telhado verde nas edificações. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sc/b/blumenau/lei-complementar/2018/117/1174/lei-complementar-n-1174-2018-acrescenta-secao-xxi-com-artigos-63-a-63-b-63-c-63-d-e-63-e-ao-capitulo-vi-da-lei-complementar-n-1030-de-18-de-dezembro-de-2015-para-regular-a-utilizacao-de-telhado-verde-nas-edificacoes>>. Acesso em: 12 jul. 2019.

BOUYOUCOS, G. J. Estimation of the Colloidal Materials in Soils. **Science**, Philadelphia, v. 64, p. 362-364, 1927.

BRASIL. Projeto de Lei nº 1794, de 2 de junho de 2015. **PL 1794/2015**. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=1301758>>. Acesso em 23 jun. 2019.

BROWN, P. Basics of Evaporation and Evapotranspiration. Arizona: College of Agriculture and Life Sciences (The University of Arizona). **Cooperative extension**, n. 1, p. 1-4, 2014.

BUNT, A. C. **Media and Mixes for Container-grown Plants**. Unwin Hyman. London, 1988.

CAI, H; YAMADA, T.; KOLE, C. **Genetics, Genomics and Breeding of Forage Crops**. 1 ed, CRC Press. 322p, 2016.

CANTOR, Steven L. **Green Roofs in Sustainable Landscape Design**. W. W. Norton & Company, New York – London, 2008.

CENTRO DE PESQUISA RENÉ RACHOU. **SisVuClima**. 2017. Disponível em: <<http://www.cpqrr.fiocruz.br/pg/ferramenta-mapeia-municipios-do-parana-mais-vulneraveis-a-mudanca-do-clima/>>. Acesso em: 8 abr. 2018.

CHENANI, S. B.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p.153-162, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.070>.

CHENG, K.; CHEUNG, K. **Roof collapses at City University Sports centre, three injured**. Hong Kong Free Press, 2016.

CHRISTIANS, N. E.; PATTON, A. J.; LAW, Q. D. **Fundamentals of Turfgrass Management**. 5 ed. John Willey & Sons, 2016.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Alterações Tarifárias**. 2018. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F04afb43850ca33c503257488005939b7>>. Acesso em: 8 abr. 2018.

COSENZA, P.; GUERIN, R.; TABBAGH, A. Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. **European Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 54, n. 3, p.581-588, set. 2003. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00539.x>.

COSTA, J.; COSTA, A.; POLETO, C. Telhado verde: redução e retardo do escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais**, [S.l.], v. 14, n. 2, p.49-55, 2012.

COUTTS, A. M; DALY E.; BERINGER J.; TAPPER N. J. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. **Building and Environment**, v. 70, p. 266-276, 2013.

CURRIE, B. A.; BASS, B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p.409-422, 17 abr. 2008. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11252-008-0054-y>.

DIMITRIJEVIĆ, D. G.; ŽIVKOVI P. M.; STOJILJKOVI M. M.; TODOROVI M. N.; SPASIDJORDJEVI S. Z. Green Living Roof Implementation and Influences of the soil layer on its properties. **Thermal science**, v. 20, n. 1, p. 511 – 520, 2016.

DINIZ, A. M. **SISTEMA AUTOMATIZADO DE AQUISIÇÃO, EM TEMPO REAL, DE UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO NA IRRIGAÇÃO**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017.

DUNNETT, N., KINGBURY N. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Timber Press Inc. Portland, OR. 2008.

EMILSSON, T. e ROLF K. Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. **Urban Forestry and Urban Greening** 3:103–111, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006, 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa solos, 2017. 577 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo de energia por ar condicionado triplica**. 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/consumo-de-energia-por-ar-condicionado-triplica>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

EPA - United States Environmental Protection Agency, **Heat Island Effect 2018**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/heat-islands>>. Acesso em: 03 mai. 2018.

FAROUKI, O. T. **Thermal properties of soils**. Hanover, N.H: U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research And Engineering Laboratory, 136 p. Series on rock and soil mechanics, v. 11, 1981.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia [online]**. 2014, vol.38, n.2, pp. 109-112. Disponível em: ISSN 1413-7054. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

FIORETTI, R.; PALLA, A.; LANZA, L.G.; PRINCIPI, P. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building and Environment**, v. 45, p. 1890–1904, 2010.

FRIEDRICH, C. R. 2005. Principles for selecting the proper components for a green roof growing media. p. 262–273. In: **Proc. of the 3rd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities**, Washington, DC. May 4–6, 2005. The Cardinal Group, Toronto, Canada.

DUARTE, A.P.L., **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**. Rio de Janeiro, 2004, 290p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The role of extensive green roofs in sustainable development. **HortScience**, East Lansing, v. 41, n. 5, p.1276-1285, ago. 2006.

HAMDHAN, I. N.; CLARKE, B. G. Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils. In: PROCEEDINGS WORLD GEOTHERMAL CONGRESS, 2010, Bali, Indonesia. **Proceedings...**, 2010. 7p.

HANDRECK, K. A., BLACK N. D. **Growing Media for Ornamental Plants and Turf**. University of New South Wales Press (UNSWP). Randwick, Australia, 1994.

HERMAN, R. Green Roofs in Germany: Yesterday, Today and Tomorrow. In 1st North American Green Roof conference: Greening rooftops for sustainable communities, 2003. Chicago. **Anais...** p. 41 – 45, 2003.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. Academic Press, Waltham, 1998.

_____. **Thermal properties and processes**. In Encyclopedia of Soils in the Environment. HILLEL, D.; HATFIELD, J. H.; POWLSON, D. S.; ROSENZWEIG, C.; SCOW, K. M.; SINGER, M. J.; SPARKS, D. L. Eds., vol. 4. Elsevier/Academic Press, p. 156-163, 2005.

HUKSEFLUX THERMAL SENSORS. **Thermal Conductivity Science**. Disponível em <<http://www.hukseflux.com/thermal%20conductivity/thermal.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS. **Geoserviços**: visualizador de mapas. 2012. Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br/>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Clima do Brasil**. 2002. Disponível em: <http://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIAS E GEOSCIÊNCIAS. **Clima - Estado do Paraná**. 2008. Disponível em: <http://www.itcg.pr.gov.br/arquivos/File/Produtos_DGEO/Mapas_ITCG/PDF/Mapa_Climas_A3.pdf> 2008. Acesso em: 30 dez. 2018.

IPCC. **Scenarios of the 21st Century**. Disponível em <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=29>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

JIM, C. Y.; TSANG, S. W. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. **Building and Environment**, v. 46, p. 1263–1274, 2011.

JOHANSEN, O., **Thermal Conductivity of Soils**, 1975, Ph.D. Thesis, Norway. Traduzida por USA Corps of Engineers ADA044002.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1979. 262p.

LA ROCHE, P.; BERARDI, U. Comfort and energy savings with active green roofs. **Energy and Buildings**, v. 82, 492–504, 2014.

LA ROCHE, P.; CARBONNIER, E.; HALSTEAD, C. **Smart green roofs**: Cooling with variable insulation. In Proceedings of the PLEA2012-28th Conference, Opportunities, Limits & Needs towards an Environmentally Responsible Architecture, Lima, Peru, p. 7–9 November 2012.

LIENHARD, J. H. IV; LIENHARD, J. H. V. **A Heat Transfer Textbook**. 3 ed. Mineola, NY: Dover Pub. p. 3. 2019.

LIU K., BASKARAN B. **Thermal Performance of Green roofs through Field Evaluation—Ottawa**. Ottawa (Canada): National Research Council Canada, Institute for Research in Construction. Report no. NRCC-46412, 2003.

LOPES, D. A. R. **Avaliação do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Leves (CVLs) aplicadas aos Climas Tropicais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2007.

MACLVOR, J. S.; LUNDHOLM, J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. **Ecological Engineering**, [S.l.], v. 37, n. 3, p.407-417, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>.

MAXIM INTEGRATED. **DS18B20**: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. 2014. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2019.

MEDEIROS, Luiz. **Modelos de Probabilidade e Inferência Estatística**: Análise de Variância – Parte 2. Departamento de Estatística da Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <<http://www.de.ufpb.br/~tarciana/MPIE/Aula19.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2019.

MILLER, C. Moisture management in green roofs. p. 177–182. In: Proc. of the 1st North American Green Roof Conference: **Greening Rooftops for Sustainable**

Communities, Chicago, IL. May 29–30, 2003. The Cardinal Group, Toronto, Canada, 2003.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 69, n. 1, p.39-47, 6 out. 2017. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12475>.

MULLER, A. P. **Coberturas verdes: comportamento de substrato para coberturas verdes extensivas em Curitiba** - PR. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

National Park Service – NPS. **Green Roofs**. US Department of the Interior, disponível em: <<https://www.nps.gov/tps/sustainability/new-technology/green-roofs/define.htm>>. Acesso em 12 jul. 2019.

NIACHOU A, PAPAKONSTANTINO K, SANTAMOURIS M, TSANGRASSOULIS A, MIHALAKAKOU G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings**, v.33, p.719–29, 2001

NRCA, National Roofing Contractors Association (EUA) – **NRCA Green Roof Systems Manual**. 2007. Disponível em <<http://docserver.nrca.net/technical/9164.pdf>>. Acesso em 12 jun. 2019.

OLIVEIRA, P. L.; SOARES, R. G.; SANTOS, S. X. Desempenho térmico das edificações: estudo comparativo entre o telhado verde e outros tipos de coberturas. **Revista Petra**, v. 2, n. 1, p. 36-55, 2016.

OLIVIERI, F.; DI PERNA, C.; D’ORAZIO, M.; OLIVIERI, L.; NEILA, J. Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 1–14, 2013.

PECK, S. W.; CALLAGHAN, C.; KUHN M. E.; e BASS B. Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada. **Canada mortgage and Housing Corporation**, Ottawa, Canada, 1999.

PERUSSI, R.; VECCHIA, F. A. S. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. **Parc Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [S.l.], v. 7, n. 4, p.225-236, 31 dez. 2016. Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647932>.

PESSÔA, Tânia Oliveira Américo. **Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUCRJ - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

PIANELLA, A.; BUSH, J.; CHEN, Z.; WILLIAMS, N.S.G.; AYE, L. **Green roofs in Australia**: Review of thermal performance and associated policy development. In Proceedings of the Architectural Science Association Conference, Adelaide, Australia; ZUO, J., DANIEL, L., SOEBARTO.; p. 795–804, 2016.

REINERT, J. Personal communication. Professor of Entomology. **Texas AgriLife Research**. Texas A&M University System, 2009.

ROSENZWEIG C., GAFF S., PARSHALL L. Introduction and study methods. In: **Green roofs in the New York metropolitan region** - research report. New York (NY): Columbia University, Center for Climate Systems research, NASA Goddard Institute for Space Studies. 2006.

ROWE, D. B.; MONTERUSSO, M. A.; RUGH C. L. Assessment of heat-expanded slate and fertility requirements in green roof substrates. **HortTechnology**, 16:471–477, 2006.

SAADATIAN, O.; SOPIAN, K.; SALLEH, E.; LIM, C. H.; RIFFAT, S.; SAADATIAN, E.; TOUDESCHI, A.; SULAIMAN, M. Y. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 23, p.155-168, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>.

SAILOR, D. J.; HUTCHINSON, D.; BOKOVOY, L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 40, n. 7, p.1246-1251, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.11.004>.

SANDOVAL, V.; SUÁREZ, F.; VERA, S.; PINTO, C.; VITORERO, F.; BONILLA, C.; GIRONÁS, J.; BUSTAMENTE, W.; ROJAS, V.; PASTÉN, P. Impact of the Properties of a Green Roof Substrate on its Hydraulic and Thermal Behavior. **Energy Procedia**, [S.l.], v. 78, p.1177-1182, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.097>.

SANTOS, P. T. S.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S.; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 31, n. 1, p.161-174, 2013.

SAVI, A. C. **Telhados Verdes: uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

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.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; KYUNG-HO, K. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. **Sustainability**, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 584-597, 26 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10030584>.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 90, p.757-773, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>.

SILVA, N. D. C. **Telhado Verde: Sistema Construtivo de Maior Eficiência e Menos Impacto Ambiental**. 2011. Monografia (especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

SOUZA, C. R. B. **Telhado Verde e sua contribuição para a redução da temperatura ambiente em construções para Cascavel-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

TARNAWSKI, V. R.; LEONG, W. H. Thermal Conductivity of Soils at Very Low Moisture Content and Moderate Temperatures. **Transport in Porous Media**, [S.l.], v. 41, n. 2, p.137-147, 2000. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1006738727206>.

THEODOSIOU, T G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy Build**, v. 35, p. 909 - 917, 2003.

TORONTO MUNICIPAL CODE. Green Roofs, Chapter 492, Article III, 2017.

TSANG, E. **Chinese University of Hong Kong to remove green roofs**: Buildings Department issues new guidelines for immediate safety checks. South China Morning Post, 2016.

VECCHIA, F. **Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental**. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC) E IV ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 6. 2005. Maceió. **Anais...** Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2005.

WADZUK, B. M.; SHNEIDER D.; FELLER M.; TRAVER R. G. Evapotranspiration from a Green Roof Storm-Water Control Measure. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 995- 1003, 2013.

WONG, N. H.; CHEN. Y.; ONG L. e SIA A. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, v. 38, p. 261-270, 2003.

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.

YOUNG, T.; CAMERON D. D.; SORRILL J.; EDWARDS T.; PHOENIX G. K. Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. **Urban Forestry & Urban Greening**, [S.l.], v. 13, n. 3, p.507-516, 2014.