

WELLINGTON SOUZA SILVA

DESEMPENHO DO SISTEMA DE TELHADO VERDE COMO ESTRATÉGIA DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO

ORIENTADOR:
RICARDO VÍCTOR R. BARBOSA

COORIENTADORA:
SIMONE CARNAÚBA TORRES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

MACEIÓ, 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

WELLINGTON SOUZA SILVA

**DESEMPENHO DO SISTEMA DE TELHADO VERDE COMO ESTRATÉGIA DE
CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO**

Maceió

2020

WELLINGTON SOUZA SILVA

**DESEMPENHO DO SISTEMA DE TELHADO VERDE COMO ESTRATÉGIA DE
CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, área de concentração em Dinâmicas do Espaço Habitado, como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues
Barbosa

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Simone Carnáuba
Torres

Maceió

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586d Silva, Wellington Souza.

Desempenho do sistema de telhado verde como estratégia de condicionamento térmico passivo no semiárido alagoano / Wellington Souza Silva. – 2020.
204 f. : il. color.

Orientador: Ricardo Victor Rodrigues Barbosa.

Co-orientadora: Simone Carnáuba Torres.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 144-154.

Apêndices: f. 155-196.

Anexos: f. 197-204.

1. Telhado verde. 2. Coberturas - Desempenho térmico. 3. Vegetação. 4. Irrigação. I. Título.

CDU: 72:624.024(813.5)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

WELLINGTON SOUZA SILVA

**DESEMPENHO DO SISTEMA DE TELHADO VERDE COMO ESTRATÉGIA DE
CONDICIONAMENTO TÉRMICO PASSIVO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

APROVADO em: 03 / 06 / 2020

BANCA EXAMINADORA

Ricardo Victor

Prof. Dr. Ricardo Víctor Rodrigues Barbosa (Orientador)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL

Simone Carnaúba Torres

Prof^a. Dr^a. Simone Carnaúba Torres (Coorientadora)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL

Juliana Oliveira Batista

Prof^a. Dr^a. Juliana Oliveira Batista (Examinadora Interna)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL

Dilson Batista

Prof. Dr. Dilson Batista Ferreira (Examinador Interno)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL

Eduardo Leite Krüger

Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger (Examinador Externo)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Gabriel Castañeda Nolasco

Prof. Dr. Gabriel Castañeda Nolasco (Examinador Externo)
Universidad Autónoma de Chiapas – UNACH (México)

A Deus,
razão de todas as minhas conquistas!

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pois a Ele devo toda a minha vida. À minha família, meus pais, irmãos e sobrinhos, por todo apoio concedido para a concretização desse sonho. Ao Movimento Treinamento de Liderança Cristã (TLC), por me mostrar como é gratificante ser pescador de homens e confiar todos os sonhos, vontades, medos e anseios à Sua divina providência. Aos tlcistas, em especial os membros coordenação paroquial 2018-2020, por todo o aprendizado espiritual e pessoal nesses últimos dois anos de jornada dupla.

Aos professores Tobyas Maia (Zootecnia), Lidiane (Física) e Daniela Lopes (Agronomia) do *Campus* Arapiraca; Odair Morais (Engenharia Civil) do *Campus* do Sertão; e Gianna Barbirato (Arquitetura e Urbanismo) do *Campus* A. C. Simões, pelo fornecimento de equipamentos, materiais e conhecimento para a realização desta pesquisa. Aos meus orientadores, Ricardo Victor, por toda paciência, confiança e apoio nestes últimos cinco anos; e Simone Torres, pela disposição, envolvimento com trabalho e por ter acreditado em mim no início de tudo. Aos professores Gabriel Nolasco, Eduardo Krüger, Leonardo Bittencourt, Juliana Batista e Dilson Ferreira pelas contribuições. À CAPES e ao CNPQ pelo apoio através da concessão de bolsa de estudos. A todos os professores e servidores do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, pelos ensinamentos, contribuições e disposição em ajudar, assim como os servidores dos setores de transporte, segurança, manutenção e limpeza da UFAL *Campus* Arapiraca, pelo apoio em todas as etapas da pesquisa.

Aos meus amigos, em especial Lenoyll Nunes, pelas palavras de apoio, e Samyla Fernanda, a Arquiteta Dr.^a DoRéMi sempre disponível a ouvir e compartilhar momentos tristes e felizes e disposta a “virar” noites coletando dados. Aos companheiros pesquisadores do GATU (Grupo de Estudos em Atmosfera Climática Urbana), em especial Eduardo Vieira, Eduardo Cadete, Limber, Rafael e Ruan por todo companheirismo e apoio braçal nesta pesquisa. Ao senhor Cícero pela ajuda na execução e montagem das coberturas. À Mônica Ferreira, pelo fornecimento dos dados climatológicos de Arapiraca. À Francismary pelo apoio agrônômico no início de tudo. A Danilo Oliveira pelo auxílio no monitoramento dos dados. Aos meus colegas da turma 2018 do DEHA, em especial Lara, a rainha da iluminação; Luana, a mestra no ENVI-met; Jéssica, companheira dos estudos do “mato”; e Ana Maria, tradutora dos manuais e parceira de equipamentos, pela ajuda nas disciplinas do curso, contribuição no monitoramento dos dados, amizade e momentos ímpares vividos. Agradeço a todos!

Apesar deste trabalho levar o meu nome, essa dissertação é NOSSA! Muito Obrigado!

“Sua identidade. Sua história, feitos e situação. Use-as para moldar a sua criação, e você produzirá algo único. Seja lá o que for fazer, baseie no que lhe é mais importante. Só então terá profundidade e significado, e só dessa maneira repercutirá nas outras pessoas.”

(Christopher Paolini, escritor norte-americano)¹

¹ PAOLINI, Christopher. *Eldest: a herança*, livro dois. Tradução: Heitor Pitombo, Laura van Boekel Cheola. Rio de Janeiro: Rocco Jovens Leitores, 2006. (Ciclo A herança, 2). p. 434.

RESUMO

Em países tropicais como o Brasil, a cobertura é responsável por parte do calor transferido para o ambiente interno, devido à grande quantidade de radiação solar que incide sobre ela. Controlar essa radiação incidente através das características dos materiais empregados na cobertura poderá favorecer melhores condições de conforto ao usuário. Nesse contexto, os telhados verdes se apresentam como uma alternativa, pois parte da radiação é utilizada pelas plantas e não diretamente no aquecimento da estrutura. Além disso, eles promovem inércia térmica e resfriamento evaporativo para as edificações, estratégias bioclimáticas indicadas para construções na cidade de Arapiraca, Alagoas. Assim, o objetivo desta dissertação foi analisar o desempenho do sistema de telhado verde como uma estratégia de condicionamento térmico passivo para Arapiraca (semiárido brasileiro), estudando os seguintes aspectos: desempenho térmico do telhado verde e de uma cobertura composta apenas por solo nu, frente a sistemas convencionais (laje, telha cerâmica e fibrocimento); influência da espécie vegetal e da presença/ausência de vegetação nesse desempenho; e os impactos da irrigação no comportamento higrotérmico do telhado verde. Como método foi utilizado o monitoramento de dados horários de temperatura e umidade, internos e superficiais de coberturas em células teste. Os resultados apresentaram o telhado verde com amplitudes térmicas menores que o solo nu e que as coberturas convencionais, além de maiores valores de umidade superficial externa e umidade relativa do ar interno, principalmente no período diurno. Solo nu e telhado verde apresentaram comportamentos semelhantes nas variáveis monitoradas devido seus valores de transmitância térmica serem próximos. Eles chegaram a reduzir aproximadamente 5,0°C na temperatura superficial interna, quando comparados à laje impermeabilizada. A ausência de vegetação no telhado verde permitiu maiores amplitudes térmicas nas temperaturas superficiais, chegando a ser 4,0°C maior que a amplitude da temperatura superficial externa encontrada nos telhados verdes. Comparando as espécies *Zoysia japonica*, *Callisia repens* e *Desmodium triflorum*, não foram encontradas diferenças significativas na temperatura e umidade relativa do ar interno. Quanto a frequência de irrigação, as diferenças no comportamento higrotérmico das células teste com irrigação diária, semanal e suspensão total da irrigação foram pequenas e próximas à precisão do equipamento. Para o clima semiárido da cidade em estudo, o telhado verde foi eficiente em evitar a amplitude térmica elevada no ambiente interno, aspecto importante para obtenção de conforto térmico, podendo ser utilizado em edificações com funcionamento diurno. Sobretudo, pode-se destacar a influência do solo/substrato no comportamento térmico do telhado verde, não sofrendo muita influência da espécie vegetal ou da frequência de irrigação adotada.

Palavras-chave: Telhado verde. Semiárido. Desempenho térmico. Vegetação. Irrigação.

ABSTRACT

*In tropical countries such as Brazil, the roofing is responsible for part of the heat transferred to the internal environment, due to the large amount of solar radiation that falls on it. Controlling this incident radiation through the characteristics of the materials used in the roof may favor better conditions of comfort to the user. In this context, green roofs are an alternative, because part of the radiation is used by plants and not directly in the heating of the structure. In addition, they promote thermal inertia and evaporative cooling for buildings, bioclimatic strategies indicated for constructions in the city of Arapiraca, Alagoas. Thus, the objective of this dissertation was to analyze the performance of green roofs system as a passive thermal conditioning strategy for Arapiraca (Brazilian semi-arid), studying the following aspects: the thermal performance of the green roof and a cover composed only of bare soil compared of conventional systems (slab, ceramic tile and fiber cement); the influence of the plant species and the presence/absence of vegetation in this performance; and the impacts of irrigation on the hygrothermal performance of the green roof. The method used was the monitoring in test cells of hourly data from temperature and humidity, internal and surface. The results showed the green roof with thermal amplitudes is lower than the bare soil and the conventional roofs, furthermore, higher values of external surface moisture and relative humidity of the internal air, especially in the daytime. Bare soil and green roof showed similar performance in the monitored variables due to their thermal transmittance values being close. They even reduced approximately 5.0°C in the internal surface temperature, when they were compared to the waterproofed slab. The absence of vegetation on the green roof allowed greater thermal amplitudes in surface temperatures, reaching 4.0°C higher than the amplitude of the external surface temperature founded in the green roofs. Comparing the species *Zoysia japonica*, *Callisia repens* and *Desmodium triflorum*, no significant differences in temperature and relative humidity of the indoor air were found. Regarding irrigation frequency, the differences in the hygrothermal performance of the test cells with daily, weekly irrigation and total suspension of irrigation were small and close to the precision of the equipment. For the semi-arid climate of the city under study, the green roof was efficient in avoiding the high thermal amplitude in the internal environment, an important aspect for obtaining thermal comfort. Above all, these structures could be used in buildings with daytime operation. Beyond that, the influence of the soil/substrate on the thermal performance of the green roof can be highlighted not suffering much influence from the plant species or the frequency of irrigation adopted.*

Keywords: *Green roof. Semi-Arid. Thermal performance. Vegetation. Irrigation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edificação com telhado verde em <i>Newfoundland</i> , Canadá.....	23
Figura 2 - Cobertura verde no <i>Punggol Roof Garden</i> , em Cingapura.....	23
Figura 3 - Vista do terraço do Palácio Gustavo Capanema em Rio de Janeiro.....	24
Figura 4 – Vista do telhado verde do edifício <i>Information Technology Business Center (ITBC)</i> em Recife – PE.....	24
Figura 5 - Sobreposição das camadas de uma cobertura verde extensiva.....	26
Figura 6 - Balanço de energia em um (a) telhado convencional e em um (b) telhado verde ...	28
Figura 7 - Análise da temperatura superficial a partir de imagens termográficas de(a) e (b) nove espécies vegetais, (c) e (d) das espécies <i>Bryophyllum pinnatum</i> em diferentes alturas e (e) e (f) da <i>Ipomoea batata</i> em diferentes cores (a variação com folhas verdes apresentou temperatura superficial média menor 0,7°C que a variação com folhas roxas).....	30
Figura 8 - Diagrama mostrando os principais tópicos das 109 publicações analisadas por Mechelen, Dutoit e Hermy (2015)	31
Figura 9 - Gráfico do perfil de temperatura no telhado verde	33
Figura 10 – (a) Unidade Experimental de Telhado Verde (UETV); (b) Vegetação (<i>Melocactus bahiensis</i>) usada no telhado verde	34
Figura 11 - (a) Localização da região Nordeste; (b) Localização do estado de Alagoas; (c) Localização do município de Arapiraca.....	36
Figura 12 – Mapas de (a) Relevo e (b) Solo de Arapiraca	37
Figura 13 - Mapa de vegetação do estado de Alagoas	37
Figura 14 – Mapas de (a) Clima e (b) Localização de Arapiraca no Semiárido brasileiro	38
Figura 15 - Carta Bioclimática de Arapiraca com dados do ano de 2010 (TRY)	40
Figura 16 - Sistemas de telhado verde possíveis de serem aplicados em coberturas com telha já instalada: (a) e (b) Bandejas de alumínio comerciais com substrato e vegetação; (c) e (d) Módulos fabricados a partir de concreto e flocos de isopor (poliestireno)	43
Figura 17 – (a) Localização do Complexo de Ciências Médicas e Enfermagem (CCME) da Universidade Federal de Alagoas, <i>Campus</i> Arapiraca e (b) vista do telhado verde na cobertura da lanchonete do CCME	43
Figura 18 - Fluxograma metodológico	45
Figura 19 – Localização do canteiro experimental (células teste) na UFAL <i>Campus</i> Arapiraca	46
Figura 20 - Células teste no canteiro experimental, com destaque (números) aquelas utilizadas nesta pesquisa.....	47
Figura 21 - Projeto das células teste	48
Figura 22 - Implantação das células teste no canteiro experimental	48
Figura 23 - Estudo de insolação das células teste.....	49

Figura 24 - Instalação da laje cerâmica nas células teste	51
Figura 25 – Aplicação da manta líquida impermeabilizante SikaFill® Rápido.....	52
Figura 26 – (a) Antes e (b) depois da instalação do “caixote vazado” de madeira	53
Figura 27 - (a) Localização da trincheira; (b) Retirada do solo da trincheira e (c) depósito do solo na cobertura	53
Figura 28 – Instalação da camada de (a) drenagem, (b) filtro, (c) substrato e (d) vegetação nas células teste	55
Figura 29 - (a) Embalagem comercial da (b) argila expandida tipo 3222 (graúda)	56
Figura 30- (a) Localização e (b) vista da trincheira.....	57
Figura 31 - (a) e (b) Mistura do solo, areia e esterco para a preparação do substrato e (c) aplicação na célula teste	57
Figura 32 – <i>Zoysia japonica</i> : (a) detalhe das folhas e (b) exemplar de herbário (exsicata) da planta.....	59
Figura 33 - Sequência de instalação da <i>Zoysia japonica</i> na célula teste	59
Figura 34 – <i>Callisia repens</i> : (a) detalhe das folhas e (b) exemplar de herbário (exsicata) da planta.....	60
Figura 35 - (a) Mudanças de <i>Callisia repens</i> ; (b) substrato preparado; (c) pré-plantio da espécie e (d) <i>Callisia repens</i> após 30 dias do pré-plantio	61
Figura 36 - Sequência de instalação da <i>Callisia repens</i> na célula teste	61
Figura 37 - <i>Desmodium triflorum</i> : (a) detalhe das folhas e (b) exemplar de herbário (exsicata) da planta	62
Figura 38 - (a) Mudanças de <i>Desmodium triflorum</i> : (b) substrato preparado; (c) pré-plantio da espécie e (d) <i>Desmodium triflorum</i> após 30 dias do pré-plantio.....	63
Figura 39 - Sequência de instalação da <i>Desmodium triflorum</i> na célula teste	63
Figura 40 - Corte esquemático dos sistemas de cobertura com a localização das variáveis coletadas.....	65
Figura 41 - <i>Data logger</i> HOBO® UX100-003	65
Figura 42 - (a) <i>Data logger</i> instalado para a coleta de dados; (b) e (c) posicionamento do equipamento em corte e planta baixa; (d) esquema volumétrico da célula teste com HOBO® UX100-003 no interior	67
Figura 43 - (a) <i>Data logger</i> instalado para a coleta de dados; (b) e (c) posicionamento do equipamento em corte e planta baixa; (d) esquema volumétrico da célula teste com HOBO® UX100-003 na superfície da cobertura.....	68
Figura 44 - Vistas da câmera termográfica FLIR i7	70
Figura 45 - (a) e (b) Posicionamento do equipamento para o registro termográfico interno; (c) ângulo entre o eixo central da câmera termográfica e a reta normal a cobertura; (d) área média da cobertura a ser fotografada	71
Figura 46 - (a) e (b) Posicionamento do equipamento para o registro termográfico externo; (c) ângulo entre o eixo central da câmera termográfica e a reta normal a cobertura; (d) área média da cobertura a ser fotografada	72

Figura 47 - Gráfico da emissividade em função do ângulo de visão.....	72
Figura 48 - Antes e depois do tratamento das imagens termográficas	73
Figura 49 – Medidor de umidade FLIR® MR176	74
Figura 50 – Posicionamento e esquema volumétrico do medidor de umidade FLIR MR176 na face externa das coberturas	75
Figura 51 - Posicionamento e esquema volumétrico do medidor de umidade FLIR MR176 na face interna das coberturas	75
Figura 52 – (a) Localização da estação meteorológica e do console; (b) Estação Davis® Vantage Pro2™ instalada; (c) console instalado	76
Figura 53 – (a) Câmera com lente olho de peixe instalada; (b) Localização do equipamento no canteiro experimental.....	78
Figura 54 - Gráficos esquemáticos dos parâmetros atraso, amplitude, amortecimento térmico e variação de umidade.....	78
Figura 55 – Ilustração da Etapa 01 – Avaliação do desempenho térmico do telhado verde	80
Figura 56 – Ilustração da Etapa 02 – Avaliação da influência da espécie vegetal no desempenho térmico do telhado verde.....	81
Figura 57 – Ilustração da Etapa 03 – Avaliação da influência da vegetação no desempenho térmico do telhado verde.....	82
Figura 58 - Esquema dos tratamentos de irrigação dos telhados verdes na Etapa 04	83
Figura 59 – Ilustração da Etapa 04 – Avaliação da influência da irrigação no desempenho térmico do telhado verde.....	84
Figura 60 – Linha do tempo dos procedimentos metodológicos.....	85
Figura 61 - Gráfico do comportamento da Ta.ex e Ua.ex no dia 17/07/2019 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de julho, de acordo com Silva (2019)	86
Figura 62 - Gráfico do comportamento da pluviosidade no dia 17/07/2019.....	87
Figura 63 - Gráfico do comportamento da velocidade média do ar no dia 17/07/2019	87
Figura 64 - Gráfico do comportamento da radiação solar global no dia 17/07/2019.....	88
Figura 65 - Gráfico do comportamento da Ts.ex nas coberturas no dia 17/07/2019	89
Figura 66 - Gráfico do comportamento da Ts.in nas coberturas no dia 17/07/2019	91
Figura 67 - Gráfico do comportamento da Ta.sup nas células teste no dia 17/07/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado.....	93
Figura 68 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste no dia 17/07/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado.....	95
Figura 69 - Gráfico do comportamento da Us.ex nas coberturas no dia 17/07/2019	98
Figura 70 - Gráfico do comportamento da Us.in nas coberturas no dia 17/07/2019.....	100
Figura 71 - Gráfico do comportamento da Ua.sup nas coberturas no dia 17/07/2019	101
Figura 72 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas no dia 17/07/2019	103

Figura 73 - Gráfico do comportamento da Ta.ex e Ua.ex no dia 29/08/2019 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diária para o mês de agosto, de acordo com Silva (2019)	105
Figura 74 - Gráfico do comportamento da velocidade média do ar no dia 29/08/2019	106
Figura 75 - Gráfico do comportamento da radiação solar global no dia 29/08/2019	106
Figura 76 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste no dia 29/08/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado	107
Figura 77 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com telhado verde e a Ta.ex, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 0,21^{\circ}\text{C}$) no gráfico do TV-zj	107
Figura 78 - Aparência dos telhados verdes com (a) <i>Desmodium triflorum</i> , (b) <i>Callisia repens</i> e (c) <i>Zoysia japonica</i>	108
Figura 79 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas no dia 29/08/2019	110
Figura 80 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com telhado verde e a Ua.ex, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$) no gráfico do TV-zj	111
Figura 81 - Gráfico do comportamento da Ta.ex e Ua.ex no dia 14/11/2019 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diária para o mês de novembro, de acordo com Silva (2019)	113
Figura 82 - Gráfico do comportamento da velocidade média do ar no dia 14/11/2019	114
Figura 83 - Gráfico do comportamento da radiação solar global no dia 14/11/2019	114
Figura 84 - Gráfico do comportamento da Ts.ex nas coberturas no dia 14/11/2019	115
Figura 85 - Gráfico do comportamento da Ts.in nas coberturas no dia 14/11/2019	117
Figura 86 - Gráfico do comportamento da Ta.sup nas células teste no dia 14/11/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado	119
Figura 87 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste no dia 14/11/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado	120
Figura 88 - Gráfico do comportamento da Us.ex nas coberturas no dia 14/11/2019	121
Figura 89 - Gráfico do comportamento da Us.in nas coberturas no dia 14/11/2019	123
Figura 90 - Gráfico do comportamento da Ua.sup nas coberturas no dia 14/11/2019	124
Figura 91 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas no dia 14/11/2019	125
Figura 92 - Gráfico do comportamento da Ta.ex de 26/01/2020 a 23/02/2020 e média das temperaturas mínimas e máximas diárias para os meses de janeiro e fevereiro, de acordo com Silva (2019)	128
Figura 93 - Gráfico do comportamento da Ua.ex de 26/01/2020 a 23/02/2020 e média das umidades relativas mínimas e máximas diárias para os meses de janeiro e fevereiro, de acordo com Silva (2019)	128
Figura 94 - Gráfico do comportamento da pluviosidade de 26/01/2020 a 23/02/2020	128
Figura 95 - Gráfico do comportamento da radiação solar global de 26/01/2020 a 23/02/2020	130

Figura 96 - Gráficos do comportamento da radiação solar global nos dias (a) 26/01/2020, (b) 11/02/2020 e (c) 23/02/2020	130
Figura 97 - Período de monitoramento da Etapa 04 com destaque para os tratamentos de irrigação e a ocorrência de precipitação.....	131
Figura 98 - Gráfico do comportamento da Ta.in no telhado verde Sem irrigação no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	133
Figura 99 - Gráfico do comportamento da Ta.in no telhado verde com Irrigação semanal no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	133
Figura 100 - Gráfico do comportamento da Ta.in no telhado verde com Irrigação diária no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	133
Figura 101 - Gráficos do comportamento da Ta.in (cor verde) nas células teste com os três tratamentos de irrigação nos dias 26/01/2020, 11 e 23/02/2020, comparada a Ta.ex (cor cinza) e a zona de conforto para o respectivo dia (tarja verde)	134
Figura 102 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ta.ex do dia 23/02/2020, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 0,21^{\circ}\text{C}$) no gráfico do telhado verde com IRRG. DIÁRIA	135
Figura 103 - Gráfico do comportamento da Ua.in no telhado verde com Sem irrigação no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	137
Figura 104 - Gráfico do comportamento da Ua.in no telhado verde com Irrigação semanal no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	137
Figura 105 - Gráfico do comportamento da Ua.in no telhado verde com Irrigação diária no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	137
Figura 106 - Gráficos do comportamento da Ua.in (cor verde) nas células teste com os três tratamentos de irrigação nos dias 26/01/2020, 11 e 23/02/2020, comparada a Ua.ex (cor cinza)	138
Figura 107 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ua.ex do dia 23/02/2020, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$) no gráfico do telhado verde com IRRG. DIÁRIA	139
Figura 108 - Posicionamento da FLIR i7 para o registro das imagens termográficas internas (a) e externas (b)	156
Figura 109 - Gráfico do comportamento da temperatura do ar e umidade relativa do ar no dia 06/12/2018 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de dezembro, de acordo com Silva (2019)	157
Figura 110 - Gráfico do comportamento da Ts.ex nas células teste, valores máximos e mínimos da Ts.ex e amplitude térmica das coberturas no dia 06/12/2018	159
Figura 111 - Gráfico do comportamento da Ts.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ts.in e amplitude térmica das coberturas no dia 06/12/2018.....	161
Figura 112 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ta.in, amplitude, amortecimento e atraso térmico das coberturas no dia 06/12/2018	161

Figura 113 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ua.in e variação de umidade relativa do ar nas coberturas no dia 06/12/2018	162
Figura 114 - Gráfico do comportamento da Ta.in e da Ua.in monitoradas nas células teste de 19 a 21/06/2019.....	168
Figura 115 - Gráfico do comportamento da Ta.in e da Ua.in corrigidas nas células teste de 19 a 21/06/2019.....	168
Figura 116 – Comportamento gráfico da T _{pmo} e dos limites da zona de conforto para o período de 23/01/2020 a 23/02/2020	171
Figura 117 - (a) <i>Datalogger</i> Hobo® U23-003003 posicionado na cobertura com telha de fibrocimento; (b) Equipamento retirado para os registros termográficos; (c) e (d) Imagens termográficas externa e interna da cobertura com telha de fibrocimento às 12h.....	181
Figura 118 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas coberturas com telhado verde no período de 26/01/2020 a 23/02/2020.....	194
Figura 119 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas coberturas com telha no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	194
Figura 120 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas com telhado verde no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	195
Figura 121 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas com telha no período de 26/01/2020 a 23/02/2020	195
Figura 122 - Mapa de climas do estado de Alagoas	197
Figura 123 - Mapa de relevo do estado de Alagoas	198
Figura 124 - Mapa de solos do estado de Alagoas	199
Figura 125 - Mapa de delimitação do Semiárido brasileiro no estado de Alagoas	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados climatológicos da cidade de Arapiraca (2009-2018)	39
Tabela 2 - Estratégias bioclimáticas indicadas pela Carta de Givoni para Arapiraca-AL	40
Tabela 3 - Materiais e custos para a instalação de um telhado verde (1,3m ²) na cidade de Arapiraca-AL	44
Tabela 4 - Composição física e química do substrato	57
Tabela 5 - Resultado da aferição dos equipamentos de medição	67
Tabela 6 - Fator de conversão dos dados de Ta.in e Ua.in para as CT 01 e CT 02.....	69
Tabela 7 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática no dia 17/07/2019	87
Tabela 8 - Ts.ex máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 17/07/2019	90
Tabela 9 - Ts.in máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 17/07/2019.....	92
Tabela 10 - Ta.sup máxima, Ta.sup mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 17/07/2019.....	94
Tabela 11 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 17/07/2019	97
Tabela 12 – Us.ex máxima, Us.ex mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019.....	99
Tabela 13 - Us.in máxima, Us.in mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019.....	101
Tabela 14 - Ua.sup máxima, Ua.sup mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019	102
Tabela 15 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019	103
Tabela 16 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática no dia 29/08/2019	105
Tabela 17 - Diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com telhado verde e a Ta.ex	107
Tabela 18 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 29/08/2019	109
Tabela 19 - Diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com telhado verde e a Ua.ex	111
Tabela 20 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade no dia 29/08/2019	111
Tabela 21 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática no dia 14/11/2019	113
Tabela 22 - Ts.ex máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 14/11/2019.....	116
Tabela 23 - Ts.in máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 14/11/2019.....	118
Tabela 24 - Ta.sup máxima, Ta.sup mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 14/11/2019.....	119
Tabela 25 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 14/11/2019	121

Tabela 26 - Us.ex máxima, Us.ex mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019	122
Tabela 27 - Us.in máxima, Us.in mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019.....	123
Tabela 28 – Ua.sup máxima, Ua.sup mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019.....	125
Tabela 29 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019	126
Tabela 30 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020	129
Tabela 31 - Diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ta.ex do dia 23/02/2020.....	134
Tabela 32 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020	136
Tabela 33 - Diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ua.ex do dia 23/02/2020.....	138
Tabela 34 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020	140
Tabela 35 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática do INMET (A353) no dia 06/12/2018	157
Tabela 36 - Dados monitorados e corrigidos do monitoramento das células teste nos dias 19, 20 e 21 de julho de 2019	166
Tabela 37 - Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 23/01/2020 a 23/02/2020	171
Tabela 38 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020 (todas as coberturas).....	196
Tabela 39 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020 (todas as coberturas)	196

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Algumas políticas públicas implantadas internacionalmente e no Brasil	25
Quadro 2 - Características dos telhados verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos	26
Quadro 3 - Local, clima e principais resultados de alguns estudos com telhados verdes	34
Quadro 4 - Estratégias construtivas para condicionamento térmico passivo a partir da inércia térmica e resfriamento evaporativo	41
Quadro 5 – Diferentes células teste utilizadas em pesquisas com sistemas de telhados verdes	48
Quadro 6 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura TC	50
Quadro 7 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura FI	51
Quadro 8 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura LI	52
Quadro 9 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura SO	54
Quadro 10 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura com telhado verde	58
Quadro 11 - Distribuição geográfica da espécie <i>Callisia repens</i> (ocorrências confirmadas) ..	60
Quadro 12 - Distribuição geográfica da espécie <i>Desmodium triflorum</i> (ocorrências confirmadas).....	62
Quadro 13 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura SV	64
Quadro 14 - Alguns dados técnicos do <i>data logger</i> HOBO® UX100-003	66
Quadro 15 - Resultado da aferição das células teste	68
Quadro 16 - Resultado da aferição das células teste após a aplicação do fator de correção nos dados das CT 01 e 02	69
Quadro 17 - Alguns dados técnicos da câmera termográfica FLIR i7	70
Quadro 18 - Relação entre distância do objeto e o campo de visão do equipamento	71
Quadro 19 - Alguns dados técnicos do medidor de umidade FLIR MR176	74
Quadro 20 - Alguns dados técnicos do ISS <i>wireless</i>	77
Quadro 21 - Alguns dados técnicos da câmera com lente olho de peixe	77
Quadro 22 – Classificação do tipo de céu e fotos hemisféricas da abóbada celeste das 6h às 17h.....	88
Quadro 23 - Classificação do tipo de céu e fotos hemisféricas da abóbada celeste das 6h às 17h.....	114
Quadro 24 – Aparência inicial (27/01/2020) e final (27/02/2020) da cobertura vegetal nas células teste durante o período de monitoramento da Etapa 04 (irrigação)	132
Quadro 25 - Hobo® UX100-003 e Hobo® U23-003003	155
Quadro 26 - Câmera termográfica FLIR i7	156
Quadro 27 - Imagens termográficas externas das coberturas às 3h, 9h, 15h e 21h no dia 06/12/2018	158

Quadro 28 - Imagens termográficas internas das coberturas às 3h, 9h, 15h e 21h no dia 06/12/2018	160
Quadro 29 - Propriedades térmicas utilizadas no cálculo da transmitância nas coberturas SO, SV e telhados verdes	164
Quadro 30 – Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 10 a 17/07/2019 e seu comportamento gráfico	170
Quadro 31 – Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 23 a 29/08/2019 e seu comportamento gráfico	170
Quadro 32 – Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 07 a 14/11/2019 e seu comportamento gráfico	170
Quadro 33 - Imagens termográficas da face externa das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.ex (°C)	172
Quadro 34 - Imagens termográficas da face interna das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.in (°C).....	177
Quadro 35 - Imagens termográficas da face externa das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.ex (°C)	182
Quadro 36 - Imagens termográficas da face interna das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.in (°C).....	187
Quadro 37 – Evolução da cobertura vegetal nas células teste durante o período de monitoramento da Etapa 04 (irrigação)	192
Quadro 38 - Espécies vegetais recomendadas para a utilização em telhados verdes no Brasil	201

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CT	Célula Teste
FI	Cobertura com Telha de fibrocimento
LI	Cobertura com Laje Impermeabilizada
Máx.	Máximo
Mín.	Mínimo
N	Norte
Plu	Pluviosidade
QS	Quente e Seco
QU	Quente e Úmido
Rad	Radiação
SO	Cobertura com Laje Impermeabilizada com Solo Nu
SV	Sistema de Telhado Verde sem Cobertura Vegetal
Ta.ex	Temperatura do Ar Externo Média
Ta.in	Temperatura do Ar Interno
Ta.sup	Temperatura do Ar próximo a Superfície Interna
TC	Cobertura com Telha Cerâmica tipo Colonial Capa e Canal
Temp.	Temperatura
Ts.ex	Temperatura Superficial Externa
Ts.in	Temperatura Superficial Interna
TV	Cobertura com Sistema de Telhado Verde
TV-cr	Telhado verde com <i>Callisia repens</i> (dinheiro-em-penca)
TV-dt	Telhado verde com <i>Desmodium triflorum</i> (amor-do-campo)
TV-zj	Telhado verde com <i>Zoysia japonica</i> (grama-esmeralda)
U	Conteúdo de Umidade
Ua.ex	Umidade Relativa do Ar Externo
Ua.in	Umidade Relativa do Ar Interno
Ua.sup	Umidade Relativa do Ar próximo a Superfície Interna
UR	Umidade Relativa do Ar
Us.ex	Umidade Superficial Externa
Us.in	Umidade Superficial Interna
Vm	Velocidade Média do Ar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos.....	21
1.2 Estrutura do trabalho.....	22
2. TELHADOS VERDES	23
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
3.1 Estratégias bioclimáticas	39
3.2 Considerações sobre o emprego de telhados verdes em Arapiraca	42
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	45
4.1 Células teste	46
4.2 Sistemas de cobertura estudados	49
4.2.1 Cobertura com telha cerâmica (TC)	50
4.2.2 Cobertura com telha de fibrocimento (FI).....	50
4.2.3 Laje impermeabilizada (LI)	51
4.2.4 Laje impermeabilizada com solo nu (SO)	53
4.2.5 Laje impermeabilizada com telhado verde	54
4.2.5.1 <i>Telhado verde com Zoysia japonica (TV-zj)</i>	58
4.2.5.2 <i>Telhado verde com Callisia repens (TV-cr)</i>	59
4.2.5.3 <i>Telhado verde com Desmodium triflorum (TV-dt)</i>	61
4.2.6 Laje impermeabilizada com telhado verde sem vegetação (SV).....	63
4.3 Monitoramento nas células teste.....	64
4.3.1 Temperatura do ar e umidade relativa do ar	65
4.3.2 Temperatura superficial	69
4.3.3 Umidade superficial.....	73
4.4 Monitoramento das variáveis climáticas	75
4.5 Parâmetros de análise	78
4.6 Etapa 01 - Avaliação do desempenho térmico do telhado verde.....	79
4.7 Etapa 02 - Avaliação da influência da espécie vegetal.....	80
4.8 Etapa 03 - Avaliação da influência da vegetação	81
4.9 Etapa 04 - Avaliação da influência da irrigação	83
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
5.1 Etapa 01 - Desempenho térmico do telhado verde	86
5.1.1 Comportamento climático	86

5.1.2	Temperaturas (Ts.ex, Ts.in, Ta.sup e Ta.in).....	89
5.1.3	Umidades (Us.ex, Us.in, Ua.sup e Ua.in).....	97
5.1.4	Considerações sobre os resultados da Etapa 01.....	103
5.2	Etapa 02 - Influência da espécie vegetal.....	104
5.2.1	Comportamento climático	105
5.2.2	Temperatura do ar interno (Ta.in)	106
5.2.3	Umidade relativa do ar interno (Ua.in).....	109
5.2.4	Considerações sobre os resultados da Etapa 02.....	112
5.3	Etapa 03 – Influência da vegetação	112
5.3.1	Comportamento climático	112
5.3.2	Temperaturas (Ts.ex, Ts.in, Ta.sup e Ta.in).....	115
5.3.3	Umidades (Us.ex, Us.in, Ua.sup e Ua.in).....	121
5.3.4	Considerações sobre os resultados da Etapa 03.....	126
5.4	Etapa 04 – Influência da irrigação	127
5.4.1	Comportamento climático	127
5.4.2	Temperatura do ar interno (Ta.in)	132
5.4.3	Umidade relativa do ar interno (Ua.in).....	136
5.4.4	Considerações sobre os resultados da Etapa 04.....	140
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
	REFERÊNCIAS	144
	APÊNDICE A – Pré-teste - 06/12/2018.....	155
	APÊNDICE B – Memorial de cálculo das transmitâncias	163
	APÊNDICE C – Teste do fator de conversão	166
	APÊNDICE D – Cálculo da Zona de Conforto.....	169
	APÊNDICE E – Imagens termográficas - 17/07/2019	172
	APÊNDICE F – Imagens termográficas - 14/11/2019.....	182
	APÊNDICE G – Evolução da cobertura vegetal na Etapa 04.....	192
	APÊNDICE H – Ta.in e Ua.in das células teste na Etapa 04.....	194
	ANEXO A – Mapas de Alagoas	197
	ANEXO B – Espécies vegetais para telhados verdes no Brasil.....	201

I. INTRODUÇÃO

Graves problemas ambientais da atualidade, como poluição atmosférica, escassez de água e o fenômeno da ilha de calor, têm acentuado a busca por estratégias sustentáveis em diversos campos da indústria, ciência e tecnologia, dentre eles o da construção civil. Uma dessas estratégias é a utilização de coberturas vegetadas, que consistem em um telhado com vegetação. Esses tetos verdes não são novidades na arquitetura, pois já vem sendo utilizados desde a Antiguidade com os povos da Mesopotâmia, mas ganharam importância atualmente devido à sua capacidade de regulação da temperatura interna das edificações, atuando diretamente na troca de calor entre o ambiente externo e o interior da edificação (PECK et. al.,1999).

Em climas quentes, as coberturas devem absorver a menor quantidade possível de radiação solar, oferecer maior resistência ao fluxo de calor, possuir inércia térmica para reduzir as flutuações de temperatura e emitir a menor quantidade possível de energia para o ambiente interno (OSUNA-MOTTA, HERRERA-CÁCERES, LÓPEZ-BERNAL, 2017). Em países tropicais como o Brasil, a radiação solar é alta devido à angulação de incidência dos raios solares (LIZ, 2016). Essa radiação solar que atinge a cobertura é responsável por grande parte do calor que é transferido para o interior de uma residência, chegando a produzir mais de um terço do ganho térmico interno (OSUNA-MOTTA, HERRERA-CÁCERES, LÓPEZ-BERNAL, 2017). Dessa maneira, controlar a radiação incidente na cobertura irá possibilitar melhores condições de conforto no ambiente interno.

Lopes (2007) cita que as características dos materiais empregados no fechamento da edificação podem ser utilizadas de forma favorável para melhorar as condições térmicas, visto que, pela inércia térmica, o calor ganho durante o dia é armazenado na massa dos elementos da envoltória e parte dele é transmitido para o interior dos ambientes. A inércia térmica pode atuar tanto para aquecimento como para resfriamento, pois promove uma redução da amplitude térmica nos ambientes, mantendo o interior da edificação com temperatura menor que o ambiente externo durante o dia e com temperatura maior durante a noite. Segundo Givoni (1992), a energia necessária no processo de evaporação da água pode ser utilizada para resfriar de maneira passiva a edificação por meio do resfriamento evaporativo direto do ar externo ou indireto. Nesse último, estruturas sombreadas da edificação em contato direto com água são resfriadas (cobertura com reservatório de água, por exemplo), haja vista que a água consome o calor da

cobertura em seu processo de evaporação, transformando assim a cobertura em um elemento bastante efetivo no resfriamento passivo do ambiente interno (GIVONI, 1992).

No balanço de energia dos telhados verdes, pode ser verificado o efeito conjunto dessas estratégias: enquanto o solo e a estrutura da cobertura, geralmente uma laje impermeabilizada, evitam a ocorrência de altas temperaturas por possuírem mais massa térmica que telhados convencionais (telhas cerâmica, por exemplo), a inércia térmica atrasa a condução do calor para a face interna da cobertura, afetando, por conseguinte, a emissão de calor por radiação para o ambiente interno; a vegetação bloqueia a radiação solar que incidiria sobre a cobertura, diminuindo sua temperatura superficial; a transpiração da planta reduz a temperatura da vegetação e de seus arredores imediatos; e a umidade do solo retira calor da cobertura por evaporação.

Tanto o resfriamento evaporativo como a inércia térmica para resfriamento são estratégias bioclimáticas indicadas por Silva (2019), utilizando como método a Carta Bioclimática, para o perfil climático de Arapiraca, Alagoas, área de estudo deste trabalho, que integra a região Semiárida do Brasil com outros 1261 municípios (SUDENE, 2020). Dessa maneira, os telhados verdes surgem como uma possibilidade de cobertura que permite o condicionamento térmico passivo para edificações na cidade em estudo, embora medições experimentais sejam necessárias para a comprovação de sua eficiência, já que elas continuam sendo a maneira mais confiável para avaliar e prever o comportamento térmico dos telhados verdes em determinadas condições climáticas (OSUNA-MOTTA, HERRERA-CÁCERES, LÓPEZ-BERNAL, 2017).

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi analisar o desempenho do sistema de telhado verde como estratégia de condicionamento térmico passivo para o clima semiárido da cidade de Arapiraca, Alagoas, durante os períodos de inverno (quente e úmido) e verão (quente e seco).

Para tanto, os objetivos específicos foram:

- a) Comparar o desempenho do telhado verde e do solo nu com os sistemas de cobertura convencionais da cidade: laje impermeabilizada, telha cerâmica e telha de fibrocimento;
- b) Analisar a influência da vegetação no comportamento térmico do telhado verde;
- c) Analisar a influência de três espécies vegetais (*Zoysia japonica*, *Callisia repens*, *Desmodium triflorum*) no comportamento térmico do sistema de telhado verde;

- d) Verificar a influência da frequência de irrigação no desempenho térmico do telhado verde.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O primeiro deles aborda uma breve introdução ao tema e os objetivos do trabalho. O segundo apresenta o referencial teórico sobre o sistema de cobertura em telhado verde, discorrendo sobre o conceito, classificação, elementos, vantagens, desvantagens, propriedades dos materiais componentes do sistema, influência do substrato, vegetação e irrigação (umidade) no comportamento térmico, e alguns estudos do comportamento desse sistema no Brasil e ao redor do mundo. O terceiro capítulo aborda a caracterização climática da área de estudo, a cidade de Arapiraca, localizada no agreste alagoano, citando também as estratégias bioclimáticas indicadas para a cidade, obtidas a partir do estudo do clima local, e considerações sobre a utilização de coberturas vegetadas nesse contexto. No quarto capítulo, são apresentados os procedimentos metodológicos da pesquisa, explicando os sistemas de cobertura a serem analisados, variáveis monitoradas, equipamentos, parâmetros de análise e as etapas da pesquisa. No capítulo seguinte, encontra-se a análise dos resultados obtidos, para os estudos de desempenho térmico, comparação das espécies vegetais, impacto da presença/ausência de vegetação e influência da frequência de irrigação no desempenho térmico do telhado verde, agrupados nas etapas de monitoramento. Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as considerações finais da pesquisa e logo após, as referências utilizadas, apêndices elaborados e anexos consultados.

2. TELHADOS VERDES

Definidos por Parizotto Filho (2010, p. 89) como “sistemas de cobertura constituídos por camadas especiais que proporcionam a sobrevivência e integridade física de uma massa de vegetação sobre a superfície superior da edificação”, os telhados verdes não são uma novidade arquitetônica do século XXI. Essas cobertas “são conhecidas há muitos séculos, tanto nos climas frios da Islândia, Escandinávia, USA [Estados Unidos da América] e Canadá, como no clima quente da Tanzânia” (MINK, 2003, p. 7, tradução nossa²). Conforme Saadatian et. al. (2013), cobrir o telhado com solo, irrigá-lo e proteger a superfície com sombreamento são práticas históricas de resfriamento passivo para climas quente e secos. Nas Figuras 1 e 2 estão alguns exemplos de edificações com telhados verdes aplicados.

Figura 1 - Edificação com telhado verde em Newfoundland, Canadá



Fonte: HURSTWIC, 2019

Figura 2 - Cobertura verde no Punggol Roof Garden, em Cingapura.



Fonte: SEE, 2009

Considerado um elemento de arquitetura vernácula até a metade do século XX, por volta da década de 70, na Alemanha e Suíça, a aplicação de telhados verdes adquire técnicas de instalação modernas que permitiram difundir essa prática construtiva ao redor do mundo (PECK et. al., 1999; LOPES, 2007). O projeto pioneiro de telhado verde no Brasil foi realizado pelo arquiteto e paisagista Roberto Burle Marx, em 1936, no terraço do Palácio Gustavo Capanema no Rio de Janeiro (Figura 3), sendo seguido por diversos outros projetos do mesmo gênero (BEATRICE, 2011). Cerca de 200 mil m² de telhados verdes são instalados por ano no Brasil (ROCHA, 2016). Um exemplo de aplicação no Nordeste brasileiro é a cobertura verde do edifício *Information Technology Business Center* (ITBC) em Recife, Pernambuco (Figura 4).

² “Los techos verdes son conocidos hace siglos, tanto en los climas fríos de Islandia, Escandinavia, USA y Canadá, como en los climas cálidos de Tanzania”.

Figura 3 - Vista do terraço do Palácio Gustavo Capanema em Rio de Janeiro.



Fonte: BARATTO, 2016

Figura 4 – Vista do telhado verde do edifício *Information Technology Business Center (ITBC)* em Recife – PE



Fonte: KOZMHINSKY, 2018

Apesar desses avanços, o telhado verde ainda carece conquistar mais espaço na construção civil. Lopes, Vitalli e Vecchia (2007) apontam iniciativas de pesquisa para o desenvolvimento das coberturas verdes em países europeus e norte-americanos, como a conferência *Coberturas Verdes para Cidades Saudáveis (Green Roofs for Healthy Cities)* sediada inicialmente na cidade de Vancouver, no Canadá, para a qual aumentar a percepção ambiental, social e econômica dos benefícios dessa técnica foi um dos objetivos. Devido ao crescente interesse por esse ramo da construção, em 2006 foi oficializada a Rede Mundial de Infraestrutura para Coberturas Verdes (*The World Green Roof Infrastructure Network*), com o objetivo de promover uma cooperação internacional para a pesquisa sobre telhados verdes.

Segundo Rosseti, Nogueira e Nogueira (2011) apenas nas regiões temperadas do hemisfério norte ocorreu uma grande expansão na utilização dos telhados verdes. Em locais ainda não familiarizados com esse elemento, ainda existem muitas barreiras a serem superadas. As políticas públicas são elementos essenciais nesse processo de desenvolvimento, pois podem maximizar os efeitos coletivos do telhado verde, visando à melhoria do microclima local. Cidades como Chicago, Vancouver, Portland, Londres, Nova York e Basel (Suíça) são destaques em políticas de implementação de coberturas verdes (LOPES, VITALLI, VECCHIA, 2007). Setta (2017) realizou um estudo sobre os telhados verdes como políticas públicas ambientais para o município de Volta Redonda no Rio de Janeiro, e apresenta um apanhado de políticas públicas nacionais e internacionais nesse campo, como apresenta o Quadro 1. Segundo o autor, as primeiras políticas públicas nacionais surgiram apenas na primeira década do século XXI, bem depois do que ocorreu nos países desenvolvidos.

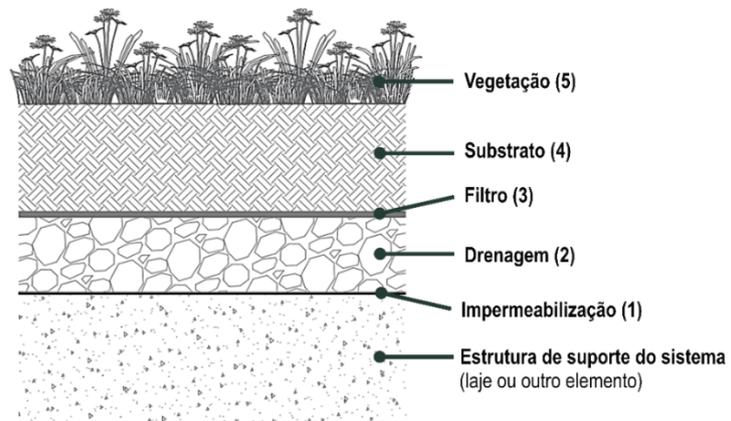
Quadro 1 - Algumas políticas públicas implantadas internacionalmente e no Brasil

Pais	Cidade / Estado	Descrição da política
Canadá	Toronto	Apresenta como necessária a cobertura verde para novas construções acima de 200 m ² . Desde quando foi aprovada na Câmara Municipal resultou em mais de 1,2 milhões de metros quadrados verdes instalados em diferentes tipos de construções, atingindo uma economia de energia de mais de 1,5 milhões de kWh por ano para os proprietários dessas edificações.
Alemanha	-	Foi o primeiro país a adotar a política de telhados verdes em padrões nacionais na década de 1970. Em 2001, a área de telhados verdes na Alemanha já chegava a 13,5 milhões de metros quadrados, chegando a cobrir 14% de todos os telhados do país.
Estados Unidos	Nashville	Uma medida prevê redução de US\$ 10,00 nas taxas de esgoto para cada metro quadrado de telhado verde.
	Nova Iorque	A Lei Estadual concede crédito fiscal de um ano de US\$ 4,50/m ² para quem tem telhado verde em pelo menos 50% da cobertura.
	Chicago	Oferece até 50% do custo ou até US\$ 100.000 para a instalação de telhados verdes que cubram 50% ou mais do espaço na cobertura.
Holanda	Amsterdã	As leis, benefícios e/ou incentivos fiscais são reguladas pelos próprios municípios. Em média, o subsídio fica entre €25,00 e €50,00 por m ² , sendo limitado, na maioria dos casos, a metade do custo total de sua implantação. O objetivo da cidade é ter um total de 800.000 m ² de telhados verdes até o ano de 2030.
Dinamarca	Copenhague	Estabeleceu como meta para ser neutra em carbono até 2050 e vê os telhados verdes como uma ferramenta chave para atingir esta meta. Todos os novos telhados com menos de 30 graus de inclinação necessitam ter telhados verdes.
Brasil	Santa Catarina	A Lei Estadual nº 14.243/2007 criou o Programa Estadual de Incentivo à Adoção de Telhados Verdes em espaços urbanos densamente povoados, que definiu em seu art. 2º que para fazer parte do programa, a implantação dos sistemas vegetados não poderia ser inferior a 40% da área total do imóvel, responsabilizando o Poder Executivo, no art. 3º, a criar parcerias, incentivos fiscais e financeiros aos municípios partícipes do Programa.
	São Paulo (SP)	Aprovado o projeto Lei nº 115/09, extensivo a todos os prédios com mais de três andares, porém, e até o presente momento, este não voltou a ser apreciado pelos parlamentares.
	Rio de Janeiro (RJ)	A Lei Estadual nº 6.349/2012 torna a obrigatoriedade de instalação de telhados verdes nos prédios públicos, autarquias e fundações do Estado do Rio de Janeiro, para prédios que fossem projetados a partir da promulgação da lei.
	Niterói (RJ)	Aprovado o projeto de Lei nº 090/2013 que dispõe sobre a instalação de telhados verdes em projetos de edificações residenciais ou não, que tiverem mais de três andares agrupados verticalmente, e os respectivos incentivos fiscais e financeiros aos que adotarem o telhado verde.
	Recife (PE)	Foi aprovada a Lei nº 18.112/15, que exige aos projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400m ² de área de cobertura, a implantação de telhado verde para sua aprovação.
	Paraíba	Lei Estadual nº 10.047/13 dispõe a obrigatoriedade aos projetos de condomínios edificados, residenciais ou não, com mais de 3 (três) unidades agrupadas verticalmente, a implantação de telhados verdes.

Fonte: Adaptado de SETTA, 2017

Os elementos básicos desse sistema construtivo são distribuídos em cinco camadas (Figura 5): (1) impermeabilização da estrutura de suporte, para garantir a estanqueidade da construção; (2) camada de drenagem, destinada a escoar, drenar e armazenar água para futuras necessidades do sistema; (3) camada de filtragem, para reter as partículas do solo e permitir que ocorra a circulação livre de ar e água na camada inferior (drenagem); (4) substrato, que providencia os nutrientes e a estrutura de suporte às plantas; e (5) vegetação, com espécies adequadas à tipologia do telhado verde (RAPOSO, 2013; KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016).

Figura 5 - Sobreposição das camadas de uma cobertura verde extensiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Classificados principalmente pela (1) espessura do substrato (Quadro 2), os telhados verdes podem ser: extensivos, quando possuírem pequenas espessuras de solo (0,05m a 0,15m), que implicam em baixo peso (72,6kg/m² a 169,4kg/m²) e baixa variedade vegetal (plantas rústicas ou rasteiras); intensivos, quando a profundidade do substrato é entre 0,20m e 1,20m, em consequência maior peso (290,0kg/m² a 967,7kg/m²) e grande variedade de espécies (gramíneas, arbusto e árvores); e semi-extensivos ou semi-intensivos, um meio termo entre os dois tipos descritos anteriormente (PECK et. al., 1999; MINK, 2003; LOPES, 2007; BEATRICE, 2011; FERRAZ, 2012; KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016).

Quadro 2 - Características dos telhados verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos

Característica	Telhado verde extensivo	Telhado verde semi-intensivo	Telhado verde intensivo
Manutenção	Baixo	Periodicamente	Alto
Irrigação	Não	Periodicamente	Regularmente
Plantas	Musgo, ervas e gramíneas	Grama, ervas e arbustos	Gramado, arbustos e árvores
Altura de acumulação do sistema	60 - 200 mm	120 - 250 mm	150 - 400 mm
Peso	60 - 150 kg / m ²	120 - 200 kg / m ²	180 - 500 kg / m ²
Custos	Baixo	Médio	Alto
Usar	Camada de proteção ecológica	Telhado verde projetado	Parque como jardim

Fonte: Adaptado de IGRA, 2020; BESIR, CUCE, 2018

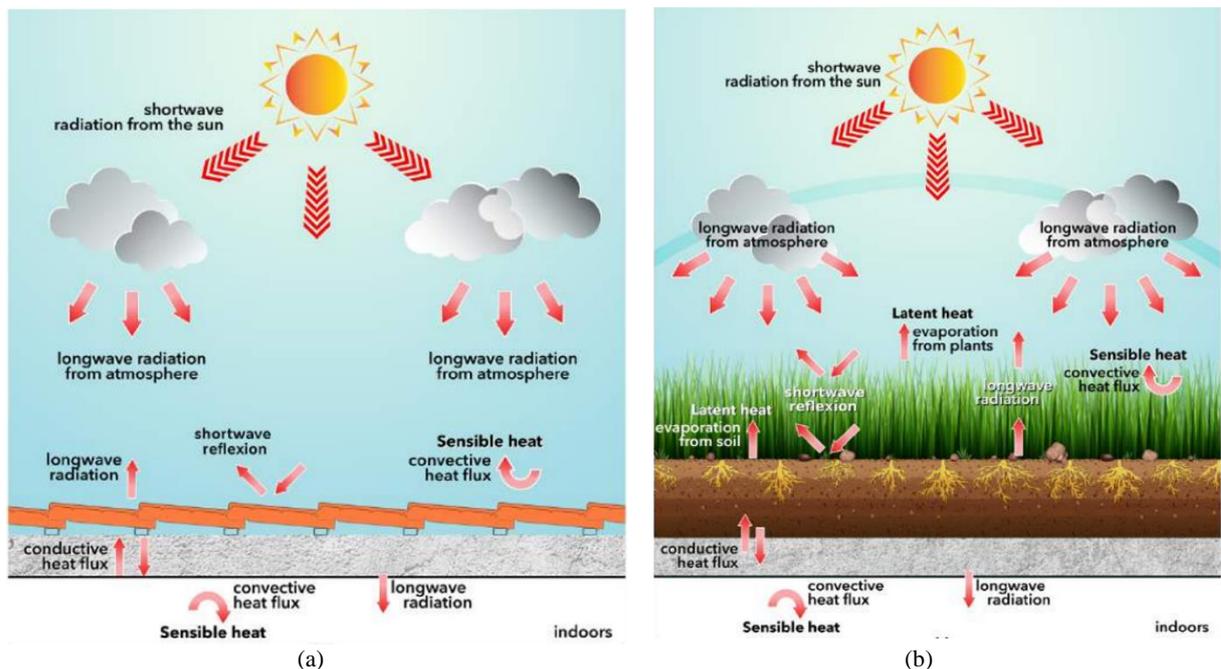
Outras formas de classificação consideram a (2) declividade da cobertura: tetos planos (inclinação menor que 3°), tetos com leve inclinação (entre 3° e 20°), tetos com forte inclinação (entre 20° e 40°) e telhados íngremes (inclinação maior que 40°); a (3) acessibilidade: acessíveis (livre circulação de pessoas) e inacessíveis (acesso apenas para manutenção); a (4) biodiversidade: monoespecíficos (apenas uma espécie vegetal) e poliespecíficos (várias espécies), podendo ter espécies nativas ou endógenas ou espécies exóticas; e a (5) sucessão ecológica das espécies vegetais: espontâneos (formação natural por meio do acúmulo natural de sedimentos, matéria orgânica, sementes e brotos), ecológicos (espécies nativas) e paisagísticos (criados obedecendo critérios de estética) (PECK et. al., 1999; MINK, 2003; LOPES, 2007; KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016).

O sistema de cobertura com telhado verde pode ser moldado *in loco*, com a instalação direta sobre a estrutura de suporte, ou ser inserido sobre a cobertura utilizando módulos pré-fabricados. Além de funcionar como elemento estético, eles aumentam a vida útil da estrutura da coberta, ajudam na proteção contra incêndios, retêm águas pluviais, contribuem para a redução da poluição do ar e para a eficiência energética, ajudando a reduzir a temperatura interna das edificações e externas na cidade, podendo também suprir a falta de áreas vegetadas em centros urbanos consolidados, pois os jardins são transferidos para os telhados das edificações, e assim diminuir as ilhas de calor (LOPES, 2007; SILVA, 2011; KOZMHINSKY, PINHEIRO, EL-DEIR, 2016; GARTLAND, 2010). Diante de tantas qualidades, a principal barreira para o amplo uso dos telhados verdes é econômica. Entretanto, o seu alto custo de implantação pode ser considerado investimento, pois eles reduzem em 14,5% o consumo anual de energia de um edifício (LOPES, 2007).

Todas as coberturas verdes necessitam de alguma manutenção, seja ela poda ou irrigação. Essa última irá se adequar às necessidades da espécie vegetal adotada, podendo ser utilizado até águas cinzas (águas residuais de processos domésticos como lavar louça, roupa e tomar banho) para essa finalidade (SUN, BOU-ZEID, NI, 2014; LOPES, 2007). A irrigação tem seus custos mas Sun, Bou-Zeid e Ni (2014) citam que o valor investido em ar condicionado para ambientes com telhados não irrigados é comparável ao valor utilizado para irrigar um telhado verde, além dos benefícios térmicos advindos desse sistema. Além do custo, os fatores climáticos locais devem ser analisados para verificar a utilidade dessa estratégia, assim como orientar a escolha dos materiais componentes do telhado verde, principalmente da vegetação, fundamental para o sucesso do sistema, pois sem a cobertura vegetal o solo atua como acumulador de energia térmica, transferindo-a rapidamente para a edificação (PERUSSI, VECCHIA, 2016).

O balanço de energia de um telhado convencional é simples, comparado ao de um telhado verde, e não envolve a interação entre fluxos de calor do solo e da vegetação (Figura 6). O cálculo em um telhado convencional leva em consideração fatores como a radiação de onda curta emitida pelo sol, sua absorção (relação com albedo³ do material), a troca de radiação de onda longa entre o telhado e a atmosfera, trocas de calor por convecção com o ambiente externo e interno, e por condução com o ambiente interno (KREBS, 2018). Assim como nos telhados convencionais, o balanço de energia nos telhados verdes é dominado pela radiação solar, que é balanceada com os fluxos de calor sensível e latente do solo e das plantas, combinado com a condução do calor pelo substrato e a radiação de onda longa emitida do solo para a superfície das folhas (SAILOR, 2008). O calor transferido em um telhado verde começa a se diferenciar do convencional nas camadas externas, nas quais a cobertura vegetal determina a porcentagem de radiação que atingirá o solo. A vegetação também fornece sombreamento, responsável pelo primeiro efeito de resfriamento no telhado verde. Nesse processo, a evapotranspiração das plantas e do solo são cruciais do fluxo térmico dos telhados verdes (KREBS, 2018).

Figura 6 - Balanço de energia em um (a) telhado convencional e em um (b) telhado verde



Fonte: KREBS, 2018

Parizotto Filho (2010) destaca que os telhados verdes não são isolantes térmicos e sim dispositivos armazenadores de calor, e sua eficiência é devido à alta capacidade térmica associada a grandes trocas de calor latente, nas quais os materiais componentes de cada camada permitem efeitos específicos no processo do balanço de energia. Segundo Tang e Zheng (2019)

³ O albedo representa a refletividade de uma superfície à radiação solar incidente sobre ela (SAILOR, 2008).

a base do telhado verde, ou seja, a estrutura de suporte, funciona como uma fonte de resfriamento da cobertura, que absorve o calor que vem de cima (camadas do telhado verde) e do ambiente interno. A camada de drenagem é menos densa e apresenta um maior potencial de isolamento, aliado a sua função de armazenar água (PARIZOTTO, LAMBERTS, 2011). Parâmetros importantes a serem considerados no substrato são a condutividade térmica, capacidade de calor, densidade e espessura (VERA et. al., 2017; SAILOR, 2008). Durhman, Rowe e Rugh (2007) afirmam que substratos mais profundos podem promover melhor sobrevivência e crescimento para quase todas as espécies. A partir de 10,0cm de substrato, há uma redução do fluxo de calor da cobertura, e essa mesma espessura permite bom desenvolvimento da maioria das espécies vegetais (BEATRICE, 2011; LIZ, MIZGIER, GÜTHS, 2016).

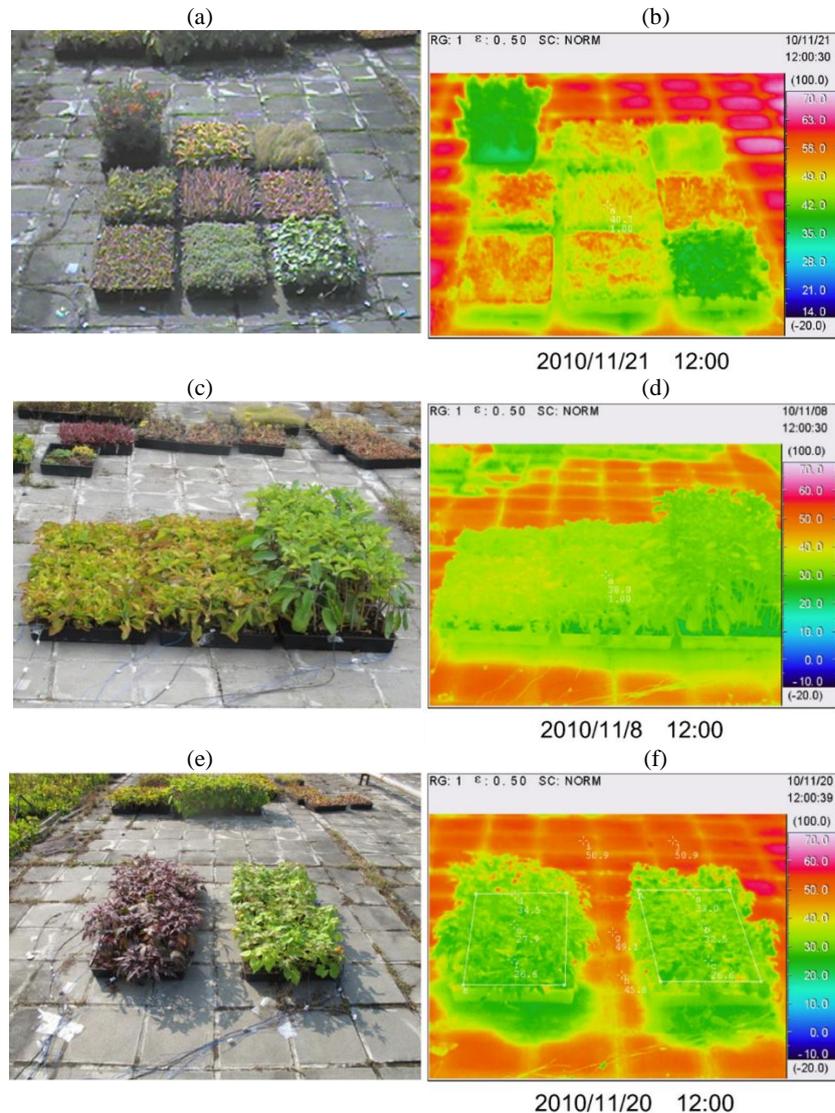
Sailor (2008) destaca os parâmetros índice de área foliar (LAI – *leaf area index*)⁴, fração de cobertura do substrato⁵, albedo e resistência estomática⁶ como fatores importantes da vegetação no desempenho térmico de telhados verdes. Saadatian et. al. (2013) ainda acrescentam a altura da planta como variável a ser considerada. Plantas com maior adensamento são desejáveis para telhados verdes, pois ocorre maior retenção de energia radiante com uma cobertura vegetal mais densa (CARVALHO, TONELLO, MIRANDA, 2018). O sombreamento reduz a taxa de calor que é transferido para a laje, diminuindo as temperaturas no dossel (copa) e no substrato (LIZ, MIZGIER, GÜTHS, 2016). Liu et. al. (2012) encontraram diferentes comportamentos de temperaturas superficiais entre espécies vegetais, sobretudo valores menores em plantas com maior altura, resultado do efeito da quantidade de folhas que sombreiam a própria planta. Os autores também identificaram que folhas na coloração verde são mais eficazes no isolamento térmico do telhado (Figura 7). Outro fenômeno da vegetação é citado por Parizotto e Lamberts (2011) e está relacionado à camada de ar gerada pela copa da vegetação. Segundo os autores, ela evita grandes perdas de calor e grandes aquecimentos que possam ser originados a partir da ação dos ventos. A vegetação também é capaz de receber grandes quantidades de radiação solar direta e aproveitá-la para transformar e assimilar seus nutrientes por meio da fotossíntese, transmitindo apenas a energia excedente para as camadas abaixo (OSUNAMOTTA, HERRERA-CÁCERES, LÓPEZ-BERNAL, 2017).

⁴ Segundo Sailor (2008), o Índice de Área Foliar (LAI) corresponde a representação da área de cobertura plana das folhas. Por exemplo, se a parcela média da cobertura do telhado está abaixo de duas folhas, o LAI corresponde a 2. O autor apresenta valores do LAI para telhados verdes entre 0,5 e 5,0, apesar de depender muito do tipo de planta utilizada.

⁵ Fração de cobertura é a fração da superfície do telhado que é diretamente coberta por pelo menos uma folha da planta (SAILOR, 2008).

⁶ Resistência estomática pode ser definida como o parâmetro biofísico que controla a taxa de transpiração de umidade da planta através do estômatos (estruturas intercelulares na superfície das folhas) dado uma determinada condição meteorológica (SAILOR, 2008).

Figura 7 - Análise da temperatura superficial a partir de imagens termográficas de (a) e (b) nove espécies vegetais, (c) e (d) das espécies *Bryophyllum pinnatum* em diferentes alturas e (e) e (f) da *Ipomoea batata* em diferentes cores (a variação com folhas verdes apresentou temperatura superficial média menor 0,7°C que a variação com folhas roxas)

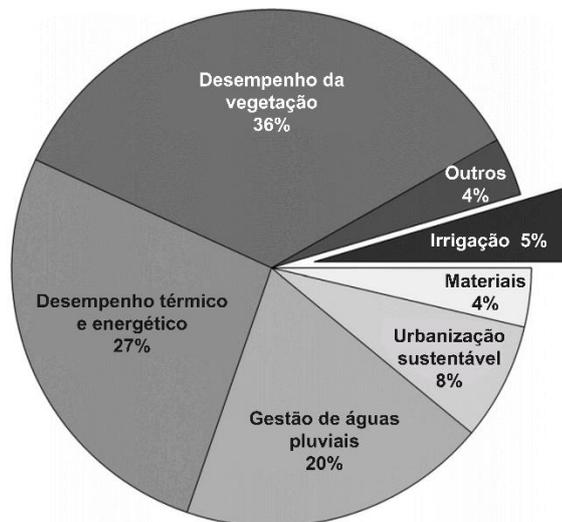


Fonte: LIU et. al., 2012

Jim e Peng (2012) citam que a quantidade de umidade no substrato é mais influente em ajustar o comportamento térmico do substrato do que na evapotranspiração e no resfriamento. Os mesmos autores ainda sugerem que o estudo dos efeitos da umidade no solo podem informar tratamentos de irrigação sustentáveis para os telhados verdes. Mechelen, Dutoit e Hermy (2015) apontam que apenas 5% dos estudos de sua revisão de literatura abordam a irrigação (Figura 8), e apenas um deles foi realizado na América Latina, sobretudo no Brasil (VIEIRA et. al., 2013). Segundo os autores, a precipitação em regiões áridas e semiáridas é imprevisível e esporádica, além da água ser rapidamente perdida pela evaporação e escoamento. Para telhados verdes nessas realidades climáticas (tipos BSk – árido quente de estepe e BSh – árido frio de estepe, classificação climática de Köppen) a irrigação é necessária para a sobrevivência da vegetação. Na fase de estabelecimento é recomendado irrigar a vegetação independentemente do

clima local, depois ela apenas é necessária em climas áridos e nos períodos secos dos climas temperados (MECHELEN, DUTOIT, HERMY, 2015). Enquanto Sailor (2008) recomenda um nível de irrigação de 6,0mm/dia (telhado verde com 10,0cm de substrato) durante o ano inteiro nos períodos em que a umidade relativa for abaixo de 40%, Mechelen, Dutoit e Hermy (2015) citam a limitação da irrigação aos períodos mais sensíveis à seca (estabelecimento e crescimento) e à delimitação do volume de água (abaixo da taxa de evapotranspiração) como estratégias de otimização do tratamento de irrigação. Wang et. al. (2017) corroboram com ambos ao citar que a irrigação oportuna (realizada em dias e horários adequados às necessidades das plantas) pode melhorar o isolamento térmico, além disso, esse efeito de isolamento apresenta resultados mais perceptíveis nas primeiras duas horas após o evento de irrigação. Uma possibilidade apontada no estudo de Mechelen, Dutoit e Hermy (2015) é deixar o telhado verde sem vegetação e irrigar apenas o substrato. Sem a vegetação, a irrigação para manutenção da planta é resolvida e a função de sombreamento proporcionada por ela pode ser substituída por outros materiais de cobertura do substrato.

Figura 8 - Diagrama mostrando os principais tópicos das 109 publicações analisadas por Mechelen, Dutoit e Hermy (2015)



Fonte: Adaptado de MECHELEN, DUTOIT E HERMY, 2015

Muitos estudos são realizados a partir de experimentos práticos e simulações computacionais, para verificar e quantificar os benefícios dos telhados verdes em diferentes realidades climáticas. Vecchia (2005) realizou um estudo empírico sobre o comportamento do sistema de cobertura verde leve (CVL) frente a outros sistemas de cobertura no clima da cidade de São Carlos, São Paulo. Os dados coletados em protótipos mostraram que o CVL conferiu um atraso térmico de 4h e uma menor amplitude térmica dentre os sistemas analisados (cerâmica, fibro-

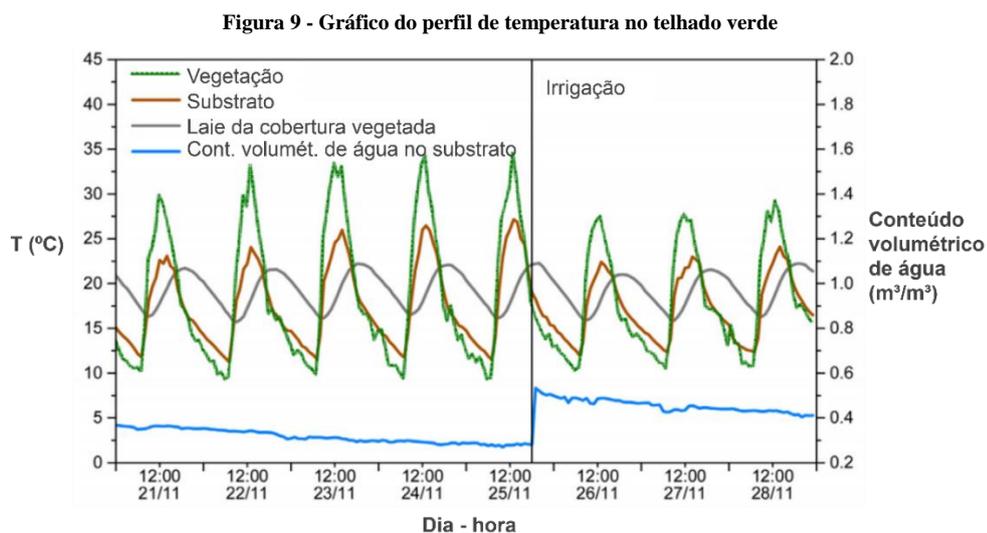
cimento, aço galvanizado e laje pré-moldada cerâmica). Comportamento semelhante desse sistema foi encontrado por Lopes (2007) no mesmo contexto climático. Já Santos (2016) estudou dois sistemas de telhado verde com variação de espécies vegetais (babosa e cacto coroa-de-frade) e o sistema tradicional de cobertura. Os resultados mostraram um melhor desempenho do telhado verde em comparação à telha cerâmica frente ao clima semiárido da cidade de Caruaru, Pernambuco, se mostrando mais eficiente quando a temperatura externa ultrapassa os 34°C. Saadatian et. al. (2013) destacam que os telhados verdes apresentam diferentes eficácias conforme a estação do ano, mas a sua máxima eficiência é encontrada no período de verão.

Parizotto e Lamberts (2011) investigaram o desempenho térmico de um telhado verde extensivo aplicado a uma edificação residencial em Florianópolis, região Sul do Brasil, clima temperado sub-quento. Três ambientes com diferentes coberturas (telha cerâmica, telhado metálico e telhado verde com *Bulbine frutescens*) tiveram temperaturas superficiais e internas, além da temperatura do substrato, da camada de drenagem e o conteúdo volumétrico de água, monitorados nos períodos de verão e inverno. Como resultados, a amplitude térmica da temperatura superficial externa foi reduzida, devido a parte da radiação solar ser dissipada no processo de evapotranspiração, e a amplitude da temperatura superficial interna chegou a ser 2,0°C menor que na telha cerâmica. O comportamento do substrato e da drenagem apresentam-se mais relacionados à umidade, durante o dia, e à temperatura, durante a noite. A amplitude térmica da camada de drenagem foi maior que na camada de substrato, pois ela é menos densa e possui alta capacidade de armazenar água. A temperatura do ar interno permaneceu entre 0,5°C e 1,0°C menor no telhado verde que nas outras coberturas monitorados durante a semana mais quente. Sobre os ganhos de calor, no telhado verde foram sempre contrários aos das outras coberturas e, no período quente, o telhado verde chegou a reduzir em 92% esse ganho, enquanto no inverno aumentou a perda de calor em 49%. Fatores como a baixa taxa de evapotranspiração, sombreamento, isolamento e massa térmica contribuíram para esse comportamento no período quente. A massa térmica aparenta ser a mais importante propriedade dos telhados verdes, pois contribui na absorção de grandes quantidade de calor e atrasa sua transferência.

A fim de identificar a influência das espécies vegetais no desempenho térmico de telhados verdes na cidade de Curitiba, Paraná (clima temperado úmido ou subtropical), Savi (2015) avaliou a temperatura superficial, retenção de água da chuva e qualidade da água escoada, em cinco telhados verdes (variação apenas da espécie) e três coberturas convencionais (laje, telha de fibrocimento e telha cerâmica). O monitoramento permitiu observar que a altura da vegeta-

ção e o sombreamento do substrato reduziram a incidência solar direta e a capacidade de retenção de água nas folhas e raízes, proporcionando baixas temperaturas superficiais diurnas, como ocorrido na espécie *Bulbine frutescens*. A radiação solar em espécies com menor densidade permitiu temperaturas superficiais próximas aos valores encontrados na laje exposta. É o caso da espécie *Zoysia tenuifolia*, que apresentou picos de temperatura maiores que as outras espécies em até 10,0°C. Além disso, folhas escuras como das espécies *Tradescantia zebrina* e *Calisia repens* podem absorver mais calor e elevar a temperatura da superfície. De maneira geral, a autora aponta variações significativas no desempenho dos telhados verdes oriundas das espécies vegetais, embora não tenha sido possível encontrar um padrão de comportamento.

Chagolla-Aranda et. al. (2017) realizaram um estudo experimental na cidade de Cuernavaca, México, sobre os efeitos da irrigação no desempenho térmico de telhados verdes em clima semi-quente. Esses efeitos foram avaliados a partir do monitoramento da temperatura superficial e do fluxo de calor em duas células teste, uma com laje de concreto e outra com telhado verde utilizando a espécie *Aeonium subplanum*, planta que tolerou a maior quantidade de dias sem irrigação (9 dias) mantendo sua aparência saudável, dentre as cinco espécies avaliadas. Após o evento de irrigação, a temperatura máxima nos componentes do telhado verde foi reduzida: 6,4°C na vegetação, 4,8°C no substrato e 1,3°C na laje, demonstrando a importância do conteúdo volumétrico de água como regulador da temperatura no telhado verde, como ilustra o gráfico da Figura 9. Além disso, os autores apresentam uma redução de 1,3kWh no consumo acumulado de eletricidade, em comparação a um telhado convencional.



Fonte: Adaptado de CHAGOLLA-ARANDA et. al., 2017

Santos et. al. (2019) avaliaram a possibilidade de utilização dos telhados verdes como elementos amenizadores das altas temperaturas internas e na captação de águas pluviais para uso

potável, em climas semiáridos. O estudo foi realizado na cidade de Caruaru, estado de Pernambuco, utilizando monitoramento de dados em uma Unidade Experimental de Telhado Verde (UETV) com cobertura convencional (telha cerâmica) e cobertura verde com *Melocactus bahiensis* (Figura 10). Os resultados mostraram que nos horários de altas temperaturas do ar (13 às 18h), o telhado verde reduziu em 2,2°C os valores encontrados no protótipo com telha cerâmica, enquanto aqueceu em 1,3°C o ambiente interno nos horários de mínimas externas. Na região Nordeste do Brasil, sobretudo no semiárido, a coleta e armazenamento da água da chuva são comuns devido à irregularidade da precipitação. O estudo realizado por Santos et. al. (2019) indica que os telhados verdes podem ser utilizados sem grande impacto nessa coleta da água da chuva, pois apenas 18,64% é reduzido do volume total escoado, um valor pequeno quando comparado aos ganhos em conforto térmico proporcionados pelo sistema.

Figura 10 – (a) Unidade Experimental de Telhado Verde (UETV); (b) Vegetação (*Melocactus bahiensis*) usada no telhado verde



Fonte: SANTOS et. al., 2019

Além dessas pesquisas, outras foram realizadas no Brasil e no mundo, enfatizando diferentes aspectos dos telhados verdes (Quadro 3), tais como: propriedades das plantas; diferentes espécies vegetais; espessura, componentes e propriedades do substrato; efeitos da quantidade de umidade; eficiência energética; e aplicação em diferentes realidades climáticas.

Quadro 3 - Local, clima e principais resultados de alguns estudos com telhados verdes

Referência	Local	Clima	Principais resultados
Beatrice (2011)	Itaparina (SP)	Tropical altamente úmido e seco	Telhados verdes com 10cm de substrato apresentaram melhores resultados, com ou sem vegetação. Solos mais profundos favorecem maior cobertura horizontal do solo. <i>Ophiopogon japonicus</i> e <i>Paspalum notatum</i> foram mais tolerantes a profundidade e a irrigação.
Farrell et. al. (2012)	Melbourne (Austrália)	Quente e seco	Espécies do gênero <i>Sedum</i> são mais indicadas para telhados verdes devido sua cobertura vegetal e tolerância a seca, resultado da suculência foliar e metabolismo CAM (Metabolismo do Ácido das Crassuláceas). Para maximizar sobrevivência, telhado verdes anuais ou sazonais em climas quente e secos devem ser plantados com espécies que tenham alta suculência da folha, baixo uso de água e em substratos com alta capacidade de armazenar água.
Jim e Peng (2012)	Hong Kong (China)	Subtropical úmido	Forte relação entre a umidade do substrato e a temperatura abaixo da superfície. Solos mais espessos e camadas de lâ de rocha podem permitir aumento do efeito de massa térmica, redução da penetração da radiação no substrato e, em consequência, amenizar a evapotranspiração.

(continua)

(continuação)

Samayoa, Martínez e Nolasco (2015a)	Tuxtla Gutiérrez (México)	Quente subúmido	O telhado verde apresentou uma amplitude térmica 24,83°C menor que a cobertura de concreto na temperatura superficial interna, além de um atraso térmico de 6h das máximas.
Liz (2016)	Florianópolis (SC)	Temperado úmido ou subtropical	A espécie vegetal não foi influente, chegando apenas a uma diferença de 0,22°C. O telhado verde sem vegetação apresentou uma temperatura na laje 0,49°C menor. Mesmo sem uma camada de isolamento térmico, o telhado verde alcançou níveis suficientes de desempenho recomendados pelas normas e regulamentos brasileiros.
Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017)	Santiago de Cali (Colômbia)	Tropical	A umidade no telhado verde não ficou abaixo dos 50%, condição favorável para o conforto térmico. A eficiência energética do telhado verde está relacionada ao conteúdo de umidade do substrato.
Feitosa e Wilkinson (2018)	Rio de Janeiro (RJ) e Sydney (Austrália)	Quente e úmido; temperado	Para o Rio de Janeiro, combinando telhado verde e parede verde, as condições perigosas de aquecimento diminuíram em aproximadamente 10% do tempo. Em Sydney essas condições são melhor obtidas nos protótipos sem vegetação. Em ambos os casos, a umidade interna ficou alta em quase todos os períodos monitorados, indicando um influxo de umidade devido a transpiração das plantas.
Krebs (2018)	Porto Alegre (RS)	Temperado quente	Os telhados verdes permitiram aumentar em 9,1% as horas de conforto térmico anuais. Plantas com alta densidade são mais benéficas para o período de verão e substratos espessos aumentam o isolamento no inverno.
Cao et. al. (2019)	Xangai (China)	-	Plantas com metabolismo CAM (como <i>Callisia repens</i>) mantiveram menores temperaturas superficiais do solo no período noturno que as espécies com metabolismos C3 e C4. As principais diferenças entre elas ocorreram nas temperaturas da copa devido às diferentes transpirações, onde as espécies CAM apresentaram menores efeitos de resfriamento por terem maior transpiração e alta eficiência do uso da água.
Menezes e Teixeira (2019)	Aracaju (SE)	-	As temperaturas internas do ambiente com telhado verde foram inferiores às temperaturas do ambiente com telha cerâmica, com amplitude térmica menor em média de 2°C.
Michels, Güths, Marinovsky (2019)	Florianópolis (SC)	Subtropical	A cobertura verde reduziu os ganhos térmicos em 81% e evitou as perdas térmicas em 53%.
Tang e Zheng (2019)	Xangai (China)	Verão quente e inverno frio	O telhado verde reduziu o consumo de energia de resfriamento em 14,7% e o fluxo de calor em 76,1%, que está associado à radiação solar e a temperatura do ar externo. A base do telhado verde atua como uma fonte de refrigeração que absorve o calor que vem de cima e do interior.

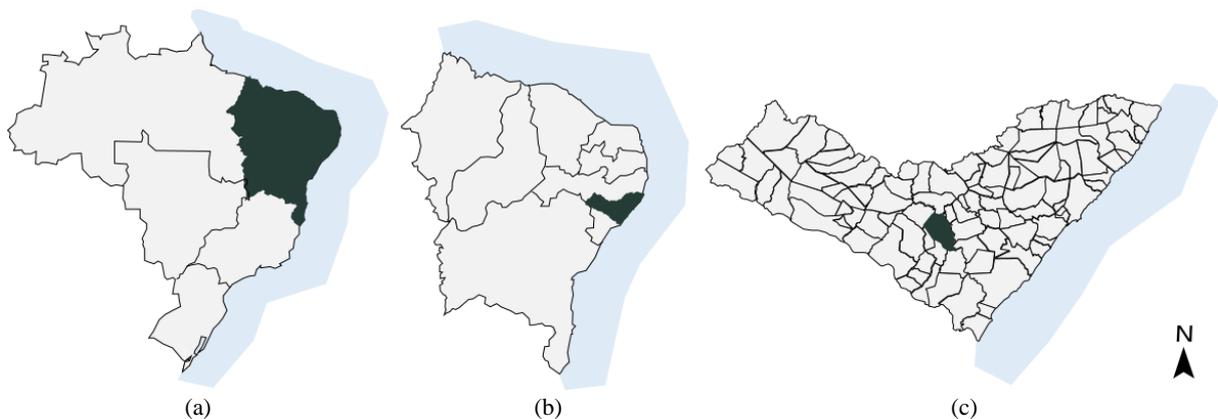
Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de ser um tema recorrente na literatura, é importante estudá-lo empiricamente em realidades climáticas específicas. Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017) citam que o desempenho dos telhados verdes varia conforme a espécie vegetal, o tipo de solo e as condições climáticas locais. Além disso, Vera et. al. (2017) identificaram diferentes desempenhos de telhados verdes para as cidades de Albuquerque (Estados Unidos) e Santiago (Chile), apesar de terem a mesma classificação climática (semiárido). Portanto, é necessário realizar medições específicas em cada região, a fim de verificar o comportamento de diferentes coberturas verdes e poder elaborar recomendações específicas para o condicionamento térmico a partir dessas estruturas. Até então não foram encontrados estudos da aplicação dessa tipologia de cobertura para Arapiraca, cidade no interior do estado de Alagoas, embora a análise das variáveis ambientais indiquem a utilização das estratégias de inércia térmica e resfriamento evaporativo para a melhoria do conforto nas residências da cidade, sobretudo para as estações de primavera e verão.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na cidade de Arapiraca (Figura 11), localizada na mesorregião do Agreste Alagoano, no centro do estado de Alagoas (Região Nordeste do Brasil), na latitude 9°75'25" Sul e longitude 36°60'11" Oeste, distante 132km da capital do estado, Maceió. Ocupa uma área de 345,655 km², com aproximadamente 214.006 habitantes (estimativa de 231.747 habitantes para 2019) distribuídos em uma densidade demográfica de 600,83hab/km², onde 181.481 habitantes são população urbana e 32.525 habitantes são população rural (IBGE, 2020a).

Figura 11 - (a) Localização da região Nordeste; (b) Localização do estado de Alagoas; (c) Localização do município de Arapiraca



Fonte: Adaptado de IBGE, 2020b

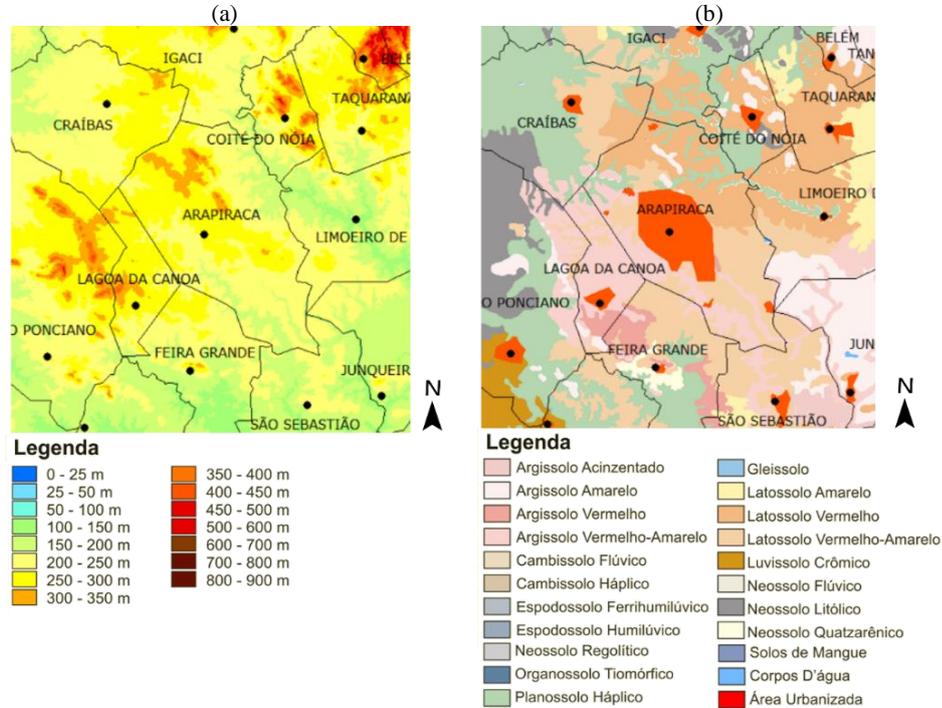
Quanto aos aspectos físicos, a cidade está situada em um planalto, aproximadamente 280m acima do nível do mar, com grande parte do território entre 200m e 300m de altitude (SILVA, 2019; TORRES, 2017), conforme apresentado na Figura 12a. O solo, sobretudo nas porções norte e nordeste, é tipo latossolo vermelho⁷, enquanto no restante do território predomina os tipos latossolo vermelho-amarelo e argissolo vermelho-amarelo⁸ (Figura 12b). A vegetação da região é definida por Barros et. al. (2012) como uma transição de floresta caducifólia (plantas que perdem suas folhas em um determinado período do ano) e caatinga hipoxerófila (vegetação seca, espaçada, com abundância de espécies cactáceas). Classificação semelhante é apresentada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que insere Arapiraca

⁷ Latossolos são “solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. [...] São típicos das regiões equatoriais e tropicais, ocorrendo também em zonas subtropicais, distribuídos, sobretudo, por amplas e antigas superfícies de erosão, sedimentos ou terraços fluviais antigos, normalmente em relevo plano e suave ondulado, embora possam ocorrer em áreas mais acidentadas, inclusive em relevo montanhoso. São originados a partir das mais diversas espécies de rochas e sedimentos, sob condições de clima e tipos de vegetação os mais diversos” (EMBRAPA, 2006, p.82).

⁸ Argissolos são “constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. [...] São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas, e mais raramente, brunadas ou acinzentadas” (EMBRAPA, 2006, p.76).

em uma região de contato entre savana estépica⁹ e floresta estacional semidecidual¹⁰, na qual atividades agrárias são desenvolvidas (Figura 13) (IBGE, 2004).

Figura 12 – Mapas de (a) Relevo e (b) Solo de Arapiraca



Fonte: Adaptado de SEPLANDE, 2014b; 2014c¹¹

Figura 13 - Mapa de vegetação do estado de Alagoas



Fonte: Adaptado de IBGE, 2004

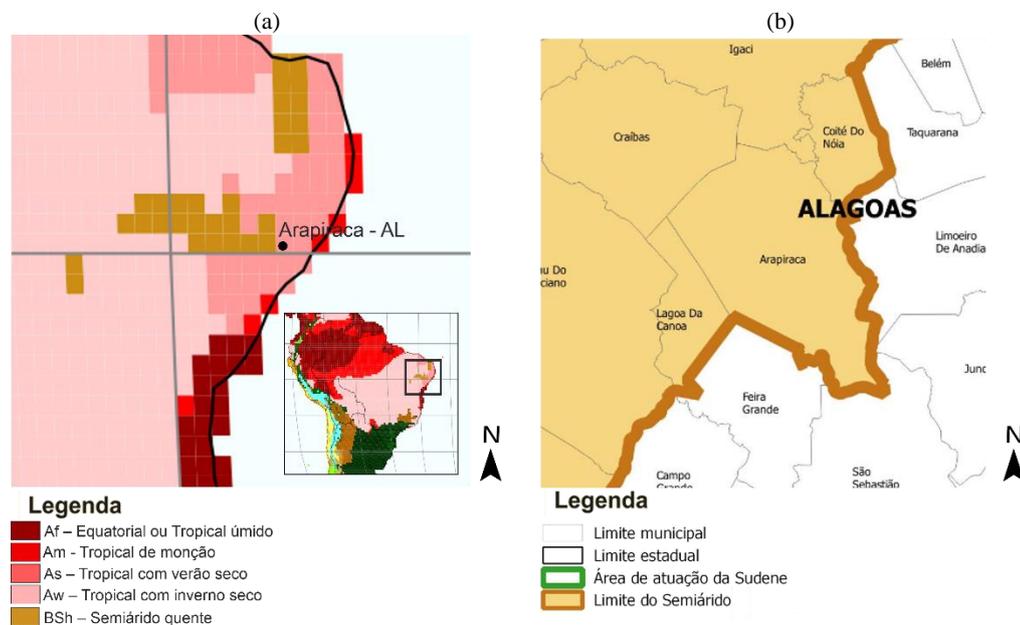
⁹ A Savana Estépica Nordestina, também chamada de caatinga, “abrange as várias formações que constituem um ‘tipo de vegetação’ estacional-decidual, portanto com os estratos arbóreo e gramíneo-lenhoso periódicos e com numerosas plantas suculentas, sobretudo cactáceas. As árvores são baixas, raquíticas, de troncos delgados e com esgalhamento profuso. Muitas espécies são microfoliadas e outras são providas de acúleos ou espinhos. A maioria dessas espécies possuem adaptações fisiológicas bastante especializadas à insuficiência hídrica” (IBGE, 2004).

¹⁰ A Floresta Estacional Semidecidual, ou Floresta Tropical Subcaducifólia, “relaciona-se ao clima de duas estações uma chuvosa e outra seca, na área tropical (temperaturas médias de 21°C), com curto período seco acompanhado de uma acentuada baixa térmica, na área subtropical (temperaturas médias em torno dos 15°C). Com o efeito ocorre a estacionalidade foliar dos elementos arbóreos dominantes, que estão adaptados a estação desfavorável (fria ou seca). Nos dois casos, a percentagem de árvores caducifólias no conjunto florestal situa-se entre 20% e 50%” (IBGE, 2004).

¹¹ Os mapas de relevo e solos do estado de Alagoas estão no Anexo A.

Segundo a classificação climática proposta por Köppen-Geiger, o clima de Arapiraca é tropical com estação seca de verão, categoria As (Figura 14a), considerando o pressuposto que a vegetação natural de cada região é a expressão do clima prevalente. Já segundo a Secretaria de Estado do Planejamento e do Desenvolvimento Econômico de Alagoas (SEPLANDE, 2014a), Arapiraca possui um clima semiárido. Além disso, a cidade encontra-se dentro da delimitação da região do Semiárido brasileiro, junto com outros 37 municípios no estado de Alagoas (Figura 14b), considerando como critérios de classificação a precipitação média anual igual ou inferior a 800mm, índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano, conforme as resoluções nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 23/11/2017 (SUDENE, 2020).

Figura 14 – Mapas de (a) Clima e (b) Localização de Arapiraca no Semiárido brasileiro



Fonte: (a) Adaptado de KOTTERK, 2006; (b) adaptado de SUDENE, 2017

Silva (2019), analisando variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e ventilação) coletadas da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Arapiraca (A353 – lat.: -9.804551°; long.: -36.619198°; altitude: 237m), no período de 10 anos (2009 a 2018), identificou duas estações para o clima da região: um inverno mais ameno e chuvoso (abril a setembro) e um verão quente e pouco chuvoso (outubro a março). Esses resultados são semelhantes a pesquisas anteriores que identificaram duas estações climáticas para Arapiraca: um período quente e úmido (maio a setembro), com temperaturas do ar menos elevadas, umidades relativas do ar altas e pequena amplitude térmica diária; e um período quente e seco (outubro a abril), com temperaturas relativamente altas, menores umidades relativas do ar e alta amplitude térmica diária (SILVA, 2017; TORRES, 2017).

A temperatura média mensal do ar varia entre 22,1°C e 26,5°C, com amplitudes térmicas diárias entre 8°C (meses chuvosos) e 12°C (meses secos). A umidade relativa média do ar varia entre 70% e 80%, atingindo valores menores que 50% no período seco (setembro a abril). A ocorrência de chuvas ao longo do ano é irregular, com um período chuvoso de cinco a seis meses (abril a agosto ou setembro), vindas principalmente da direção sudeste, com precipitação média anual de 890,0mm. Os ventos são oriundos principalmente de leste e sudeste, com velocidade entre 1,6 a 3,4m/s (fraco) e 3,4 a 5,5m/s (bonançoso) (SILVA, 2019). A Tabela 1 apresenta alguns dos dados climáticos de Arapiraca dos últimos dez anos (2009-2018).

Tabela 1 - Dados climatológicos da cidade de Arapiraca (2009-2018)

MÊS		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TEMP (°C)	Máx.	32,8	32,7	33,3	31,8	29,5	28,2	27,0	27,3	29,1	31,2	33,0	33,2
	Méd.	26,0	26,0	26,5	25,8	24,4	23,3	22,3	22,1	23,2	24,7	25,7	26,0
	Mín.	21,6	21,8	22,1	22,1	21,3	20,2	19,1	18,6	19,2	20,4	20,9	21,4
UR (%)	Máx.	89,5	90,9	89,8	90,7	93,4	93,8	92,7	92,2	91,0	88,0	86,7	88,3
	Méd.	68,7	70,5	70,0	75,0	82,1	83,3	82,1	79,6	75,0	69,2	64,8	66,1
	Mín.	36,9	39,4	38,3	45,6	57,0	58,3	57,2	52,5	45,9	38,8	32,9	32,9
VELOCIDADE MÉDIA DO AR (m/s) ¹²		3,15	2,91	2,84	2,25	1,86	1,81	1,88	1,97	2,70	3,04	3,60	3,42
PRECIPITAÇÃO MÉDIA (mm)		28,9	48,0	36,7	123,8	132,6	145,6	145,0	107,0	58,7	56,8	13,0	30,2

Fonte Adaptado de SILVA, 2019

3.1 Estratégias bioclimáticas

Adequar a edificação ao clima local é fundamental para a minimização dos efeitos das intempéries no conforto dos usuários. Conhecer o contexto climático da cidade, seus elementos, fatores e condicionantes é necessário para definir estratégias, diretrizes e soluções de projeto. A utilização de dados meteorológicos para a definição de estratégias bioclimáticas é uma alternativa para encontrar diretrizes de projetos adequadas à cidade em estudo, como o trabalho realizado por Passos (2009), que definiu recomendações projetuais para as cidades de Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar, todas no estado de Alagoas. A cidade de Arapiraca não foi escolhida nesse estudo por questões metodológicas definidas pela autora, mas a análise das estratégias bioclimáticas para essa e mais cinco cidades (Coruripe, Maceió, Palmeira dos Índios, Pão de Açúcar e São Luiz do Quitunde) foram realizadas por Silva (2019).

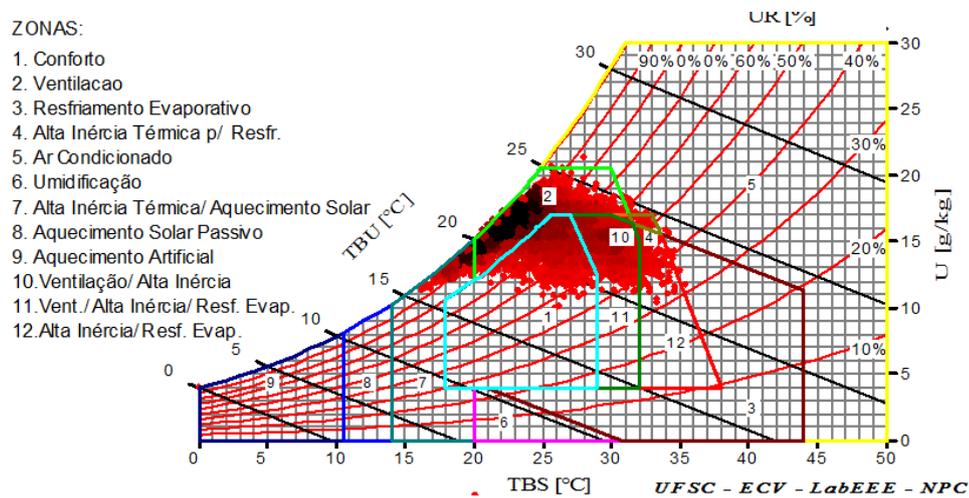
Dentre as metodologias que auxiliam o projetista na tomada de decisões projetuais de modo a priorizar o bioclimatismo, estão o Método de Mahoney Tradicional, o Método de Mahoney Nebuloso e a Carta Bioclimática de Givoni, que analisam variáveis climáticas e fornecem

¹² Velocidade média do ar mensal da cidade de Arapiraca-AL. Mensagem pessoal recebida de Mônica Ferreira da Silva (monica_fers@hotmail.com) em 11 de agosto de 2019.

recomendações ou estratégias bioclimáticas para as edificações na região (SILVA, 2017). Essa última destaca-se por ser aplicada em países em desenvolvimento e, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2013), é a metodologia bioclimática mais adequada para a realidade brasileira.

A carta relaciona temperatura de bulbo seco (TBS - °C), temperatura de bulbo úmido (TBU - °C), umidade relativa do ar (UR - %) e razão de umidade (U - g/kg) em um diagrama psicrométrico, que fornece estratégias bioclimáticas indicadas para a promoção do conforto na edificação (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2013). A Figura 15 apresenta a carta bioclimática fornecida pelo *software Analysis BIO* para a cidade de Arapiraca¹³, utilizando dados horários do ano de 2010, Ano Climático de Referência (TRY) da cidade, considerando o período de 2009 a 2018. A Tabela 2 apresenta as estratégias geradas pelo *software Analysis BIO*.

Figura 15 - Carta Bioclimática de Arapiraca com dados do ano de 2010 (TRY)



Fonte: SILVA, 2019

Tabela 2 - Estratégias bioclimáticas indicadas pela Carta de Givoni para Arapiraca-AL

ESTRATÉGIA		Primavera	Verão	Outono	Inverno	ANO
CONFORTO		21,6%	12,2%	7,02%	30,2%	17,7%
DESCONFORTO	Calor					
	Sombreamento	96,3%	100,0%	99,6%	79,3%	93,8%
	Ventilação	71,5%	81,1%	91,1%	49,1%	73,2%
	Alta Inércia para Resfriamento	24,5%	29,4%	14,8%	0,2%	17,1%
	Resfriamento Evaporativo	24,4%	28,6%	13,9%	0,2%	16,7%
	Ar Condicionado	0,0%	0,3%	0,4%	0,0%	0,2%
Frio	Alta Inércia Térmica / Aquec. Solar	3,6%	0,0%	0,3%	20,7%	6,2%

Fonte: SILVA, 2019

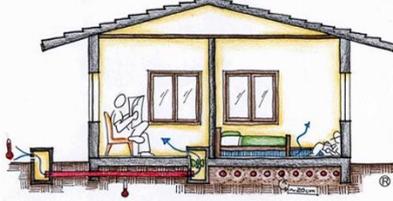
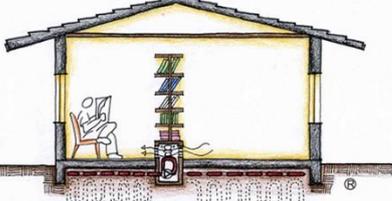
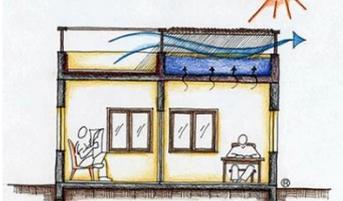
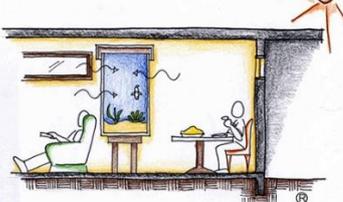
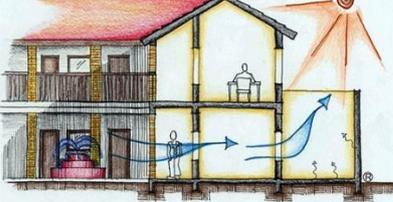
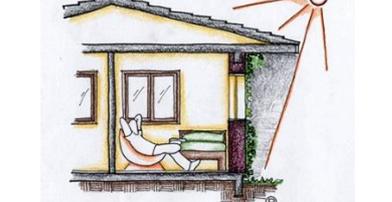
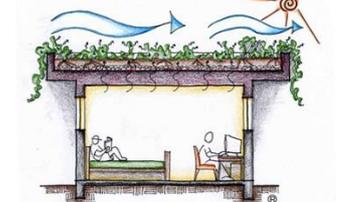
O diagrama indica que em 82,3% do ano há desconforto por frio (6,22%) ou calor (76,1%). As principais estratégias indicadas são o sombreamento e a ventilação para o ano inteiro. Nas estações de primavera e verão (período seco), as baixas taxas de umidade relativa do

¹³ A versão da carta bioclimática fornecida pelo *software Analysis BIO* consiste em uma adaptação da carta bioclimática proposta por Givoni (1992) com limites máximos de conforto expandidos, considerando a aclimação de pessoas a climas quentes de países em desenvolvimento.

ar e a alta amplitude térmica diária levam a indicar a alta inércia para resfriamento e o resfriamento evaporativo como recomendações consideráveis (aproximadamente 25%).

Tomando como base essas duas últimas estratégias, o site ProjetEEE – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes (PROJETEEE, 2020) indica elementos construtivos que irão satisfazer essas recomendações de condicionamento térmico passivo, dentre eles tubos enterrados com ar ou água, tanque de água na cobertura, parede com isolante térmico externo e ventilação noturna, edificação semienterrada, aquários ou piscinas internas sem exposição ao sol, fontes de água, parede verde e o teto jardim ou telhado verde, como ilustra o Quadro 4.

Quadro 4 - Estratégias construtivas para condicionamento térmico passivo a partir da inércia térmica e resfriamento evaporativo

<p>TUBOS ENTERRADOS (AR)</p>	<p>TUBOS ENTERRADOS (ÁGUA)</p>	<p>TANQUE DE ÁGUA NA COBERTURA</p>
		
<p>Proporciona controle e amortecimento das oscilações de temperatura diárias, já que o ar que passa pelo tubo apresenta uma redução de temperatura em relação ao ar externo, diminuindo a temperatura do ar que sai do tubo.</p>	<p>O ar ambiente é forçado através do trocador de calor e reduz sua temperatura ao entrar em contato com a tubulação de água a uma temperatura inferior.</p>	<p>As coberturas com tanque de água são construídas sobre a laje isolada onde a temperatura da superfície da cobertura acompanha a TBU ambiente. É necessário ventilar o espaço interno no período noturno para acelerar o processo de eliminação da energia térmica armazenada.</p>
<p>PAREDE COM ISOLANTE TÉRMICO EXTERNO + VENTILAÇÃO NOTURNA</p>	<p>EDIFICAÇÃO SEMIENTERRADA</p>	<p>AQUÁRIOS OU PISCINAS INTERNAS SEM EXPOSIÇÃO AO SOL</p>
		
<p>Aumentar a espessura das paredes amplia a capacidade térmica e o atraso térmico. Permitir a passagem de brisas frescas noturnas.</p>	<p>Ambientes semienterrados podem ter temperaturas mais agradáveis tanto no verão quanto no inverno.</p>	<p>Como elemento de elevada inércia térmica no interior da edificação é possível utilizar a massa de água de aquários.</p>
<p>FONTES DE ÁGUA EM PÁTIOS INTERNOS</p>	<p>PAREDE VERDE</p>	<p>TETO JARDIM</p>
		
<p>Para acelerar as correntes de convecção são criados dois pátios, de um lado um pátio sombreado com fontes de água, para resfriar o ar, e no lado oposto, um pátio exposto à radiação solar, promovendo o efeito de termossifão.</p>	<p>Atuam como isolante térmico natural, diminuindo os ganhos solares e reduzindo as temperaturas superficiais externas pela evaporação da água presente na camada de vegetação.</p>	<p>Fornece benefícios tanto no verão quanto no inverno. A vegetação intercepta a maior parte da radiação recebida pela camada de terra da cobertura e recebe um ganho de calor muito menor do que de uma cobertura convencional.</p>

Sabe-se que “a massa térmica da cobertura de terra amortiza as variações de temperatura diárias tanto no verão quanto no inverno. Como resultado, os requerimentos de isolamento podem ser substancialmente reduzidos se comparados a coberturas convencionais” (PROJETEEE, 2020). Peck et. al. (1999), Mink (2003), Lopes (2007), Vera et. al (2017) e outros autores concordam que as coberturas vegetadas podem promover a inércia térmica para resfriamento. Desse modo, o sistema de telhado verde se apresenta como uma possibilidade construtiva para coberturas na cidade de Arapiraca, uma vez que há necessidade de massa térmica para o condicionamento térmico passivo e essa estratégia pode ser utilizada sob a forma de telhados verdes, evitando grandes ganhos de calor através da cobertura, que recebe radiação solar o ano inteiro.

3.2 Considerações sobre o emprego de telhados verdes em Arapiraca

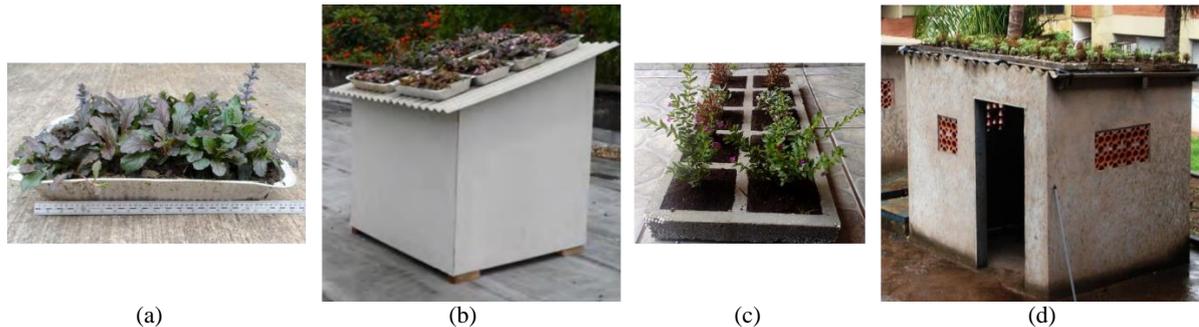
Os efeitos benéficos da utilização de coberturas vegetadas são inúmeros, tanto para o interior da edificação como para o microclima local. Sobre seu impacto na cidade é importante destacar o trabalho de Rosseti (2013), que abordou os efeitos do uso de telhados verdes na redução das ilhas de calor urbana em Cuiabá, Mato Grosso. A autora utilizou simulação computacional para estudar o efeito da aplicação de telhados verdes em 10%, 50% e 100% das coberturas de uma fração urbana. Foram observadas modificações no microclima local, mais especificamente na escala do bairro, nos modelos com 100% das coberturas vegetadas. Na temperatura do ar houve uma redução de até 1,73°C, e uma elevação da umidade relativa do ar em até 4,77%. Quanto ao conforto dos pedestres, ocorreu uma redução de 5,30% na porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPI).

Nunes (2017) tomou como base a metodologia de Rosseti (2013) e realizou, através de simulação computacional, um estudo piloto dos impactos microclimáticos da aplicação de telhados verdes em larga escala em uma porção consolidada do Bairro Brasília na cidade de Arapiraca, Alagoas, marcado morfologicamente por quadras longas, lotes estreitos e casas geminadas. De maneira geral houve uma redução da temperatura do ar no interior das quadras, chegando a 0,23°C às 15h e leve aumento da umidade relativa do ar, 1,08% às 15h. Esses resultados apresentam as mesmas tendências que o estudo de Rosseti (2013) e indicam efeitos em escala urbana a partir da implementação das coberturas vegetadas na cidade de Arapiraca. Para tanto, são necessários incentivos fiscais, políticas públicas, leis, etc a fim de difundir e incentivar a instalação dessa solução de cobertura, para posteriores benefícios ambientais.

Os telhados verdes são usualmente implantados em coberturas com leves inclinações como lajes cerâmicas ou de concreto, por facilitar a manutenção e evitar grandes perdas de água

por escoamento. Arapiraca apresenta, em sua maioria, edificações com coberturas utilizando telha cerâmica ou de fibrocimento. Substituir essas coberturas não é uma solução muito viável, mas é possível instalar os telhados verdes sobre elas sem grandes modificações estruturais e sobrecarga, utilizando sistemas modulares ou bandejas com vegetação já estabelecida (Figura 16).

Figura 16 - Sistemas de telhado verde possíveis de serem aplicados em coberturas com telha já instalada: (a) e (b) Bandejas de alumínio comerciais com substrato e vegetação; (c) e (d) Módulos fabricados a partir de concreto e blocos de isopor (poliestireno)



Fonte: OSUNA-MOTTA, HERRERA-CÁCERES E LÓPEZ-BERNAL, 2017; ROSSETI, 2009

Os recentes estudos do comportamento climático de Arapiraca estão permitindo conhecer melhor a cidade para propor estratégias que amenizem as horas de desconforto. Por não ser difundido como possível solução projetual local, há poucos exemplos de aplicações desse sistema. Um deles é a cobertura verde da lanchonete do Complexo de Ciências Médicas e Enfermagem (CCME) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), *Campus* Arapiraca (Figura 17), inaugurado em 2019.

Figura 17 – (a) Localização do Complexo de Ciências Médicas e Enfermagem (CCME) da Universidade Federal de Alagoas, *Campus* Arapiraca e (b) vista do telhado verde na cobertura da lanchonete do CCME



Fonte: (a) Adaptado de GOOGLE EARTH, 2020; (b) elaborado pelo autor

O principal obstáculo para a instalação dessas estruturas em climas mais quentes, como o semiárido, está relacionado a disponibilidade de água na região para a irrigação, pois a estrutura conta com elementos vivos (plantas) que necessitam de uma quantidade mínima de água para sobreviver, seja ela proveniente de irrigação ou precipitação.

Além desse aspecto, o custo de instalação do sistema é outro fator desfavorável. Para um telhado verde extensivo de 1,3m² e 8,0cm de espessura total (3,0cm de drenagem e 5,0cm de substrato) que utiliza materiais padrões dos jardins residenciais (argila expandida, manta de jardim, terra vegetal e planta) o custo de instalação chega a R\$ 129,11 (Tabela 3), ou seja R\$ 99,31/m²¹⁴.

Tabela 3 - Materiais e custos para a instalação de um telhado verde (1,3m²) na cidade de Arapiraca-AL

Material	Encontrado comercialmente		Utilizado no telhado verde (1,3 m ²)		Custo total (R\$)	Custo por m ² (R\$ / m ²)
	Volume / quantidade	Valor (R\$)	Volume / quantidade	Valor (R\$)		
Impermeabilizante (SikaFill®)	Galão (3,6 kg)	75,00	2,3 kg	47,91	129,11	99,31
Argila expandida	Saco (50 L ou 18 kg)	68,00	30 L	40,80		
Manta de jardim	1 m	10,00	1,5 m	15,00		
Terra vegetal	Saco (10kg)	10,00	15 kg	15,00		
<i>Zoysia japonica</i> (grama-esmeralda)	1 m ²	8,00	1,3 m ²	10,40		

Fonte: Elaborado pelo autor

A impermeabilização e a drenagem, que se destacam com os elementos mais caros, poderão ser substituídos futuramente. Ao invés do impermeabilizante comercial, poderão ser utilizadas resinas vegetais, como a resina poliuretana à base de óleo vegetal de mamona (*Ricinus communis*) utilizada por Beatrice (2011) na impermeabilização de plataformas experimentais com telhado verde. Já no caso da drenagem, sistemas modulares pré-fabricados de materiais recicláveis com fácil instalação, redução de peso e custo podem ser utilizados. Além de tudo isso, a pouca utilização do sistema de telhado verde não gera materiais adequados nem mão de obra qualificada, dificultando ainda mais a instalação desse sistema.

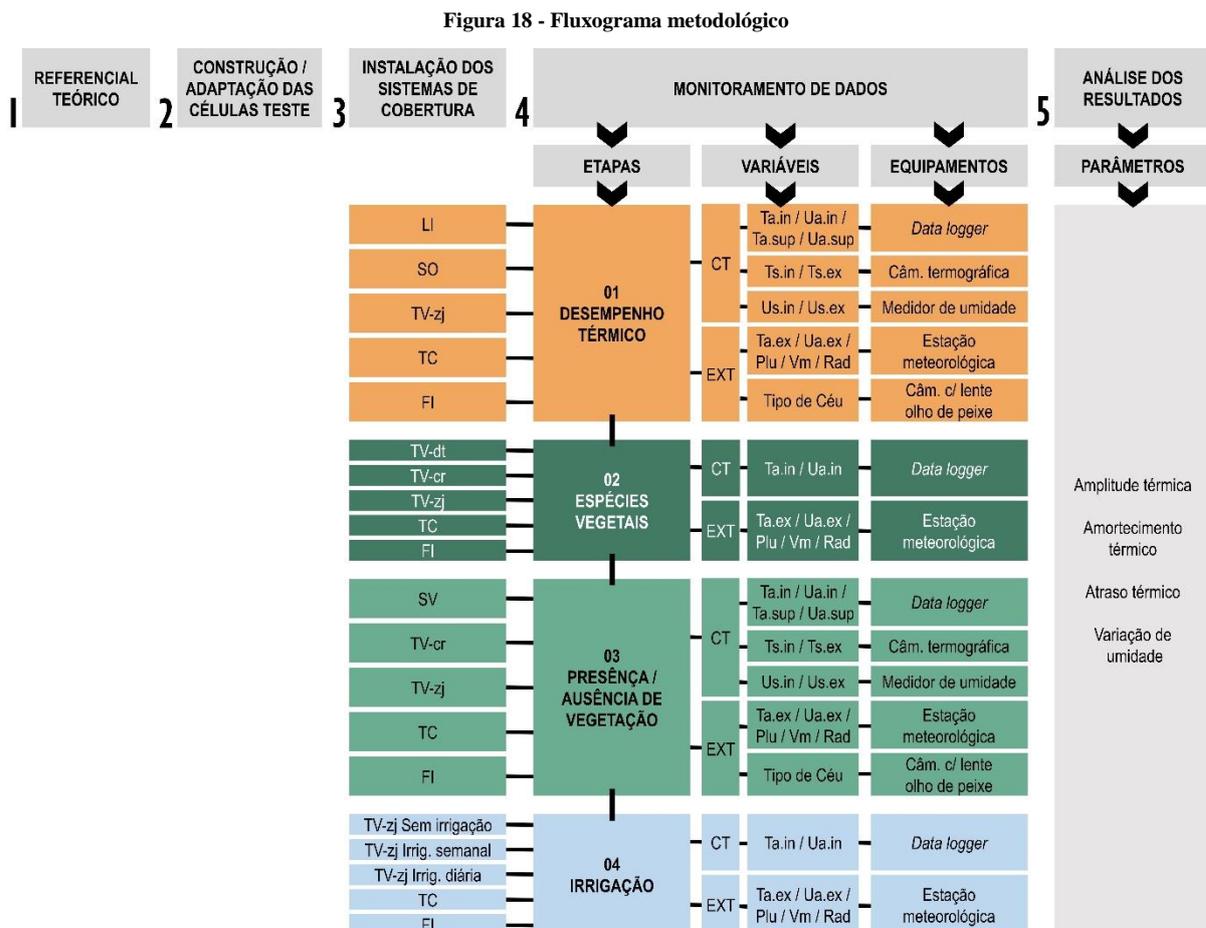
Diante das possibilidades e dificuldades apresentadas, é importante analisar empiricamente o comportamento do sistema de telhado verde no clima da cidade de Arapiraca, a fim de obter resultados concretos da aplicabilidade desse sistema, do comportamento de algumas espécies vegetais e o real impacto da irrigação no desempenho desse sistema de cobertura.

¹⁴ Nesse valor não está incluso o custo de instalação da estrutura de suporte do telhado verde, apenas a sua impermeabilização, uma vez que ela pode variar, podendo ser de madeira, bambu, metal ou concreto armado. Ela deve ser devidamente impermeabilizada e resistente à carga exigida pelo tipo de telhado verde adotado (FERRAZ, 2012). Vale ainda comentar que em 2019, ano de realização desse levantamento de custos, o valor do salário mínimo brasileiro correspondia a R\$ 998,00.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Considerando os estudos sobre desempenho térmico de telhados verdes, realizados por Vecchia (2005), Parizotto Filho (2010), Beatrice (2011), Dias (2016) e Changolla-Aranda et. al. (2017), utilizando plataformas de teste, células teste (células experimentais), protótipos, edificações em escala real e simulação computacional, os procedimentos metodológicos desta pesquisa consistiram no monitoramento de variáveis em células testes construídas na cidade de Arapiraca-AL. Givoni (1998) afirma que a utilização de modelos reduzidos pode reproduzir as temperaturas internas de edifícios desde que os elementos da envoltória da edificação sejam os mesmos, considerando materiais, espessura etc. A existência de algumas células experimentais no *Campus* Arapiraca da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) foi determinante para a escolha desses procedimentos.

A Figura 18 apresenta um fluxograma metodológico deste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cumprimento dos objetivos propostos, foram realizados os seguintes procedimentos metodológicos: (1) revisão teórica sobre o sistema de telhado verde como estrutura de condicionamento térmico passivo em edificações; (2) construção/adaptação das células teste no canteiro experimental, (3) instalação dos sistemas de cobertura; (4) monitoramento das variáveis internas e externas às células teste, agrupado em quatro etapas que foram realizadas em dias diferentes devido o número limitado de células teste com estrutura de suporte para a instalação do telhado verde adotado na pesquisa, foram elas: Etapa 01 – desempenho térmico do sistema de telhado verde. Etapa 02 – influência da espécie vegetal, Etapa 03 – influência da presença/ausência da vegetação, e Etapa 04 – influência da irrigação no desempenho do telhado verde; por fim, a (5) análise dos dados a partir de parâmetros da temperatura e umidade.

4.1 Células teste

Células teste são módulos experimentais padrões construídos em escala reduzida, utilizados quando se deseja comparar o comportamento/desempenho de determinada estrutura. É necessário que elas sejam semelhantes, tendo apenas como variação o elemento que se deseja avaliar o comportamento.

As células teste deste experimento encontram-se construídas em um canteiro experimental no *Campus* Arapiraca da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), situado próximo ao estacionamento principal e ao setor de esportes da instituição (ginásio poliesportivo e piscina semiolímpica), como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Localização do canteiro experimental (células teste) na UFAL *Campus* Arapiraca



Fonte: (a) Adaptado de *GOOGLE EARTH*, 2020; (b) adaptado de VEIGA, 2018

Os primeiros dois módulos experimentais do local foram construídos em 2015, destinados à análise do desempenho térmico de subcoberturas alternativas (forro de Tetra pak®) realizada por Silva (2015) e Costa, Silva e Barbosa (2015). Entre 2017 e 2018 foram construídas

mais seis células teste a fim de analisar o desempenho térmico de diferentes sistemas de cobertura (telhado verde, telha cerâmica e telhão de concreto) e subcoberturas (forro de PVC - polícloreto de vinila e bambu), experimentos realizados por Silva, Vieira e Barbosa (2019), Cadete e Barbosa (2019) e Cadete (2020). A Figura 20 mostra o canteiro experimental com as oito células teste construídas. Dentre elas, três possuem cobertura com laje cerâmica moldada *in loco* sem a colocação de telhas, duas possuem cobertura com telha de fibrocimento, e as demais, cobertura com telha cerâmica tipo colonial capa e canal. Apenas cinco células teste foram utilizadas para as análises desta pesquisa (ver números na Figura 20).

Figura 20 - Células teste no canteiro experimental, com destaque (números) aquelas utilizadas nesta pesquisa

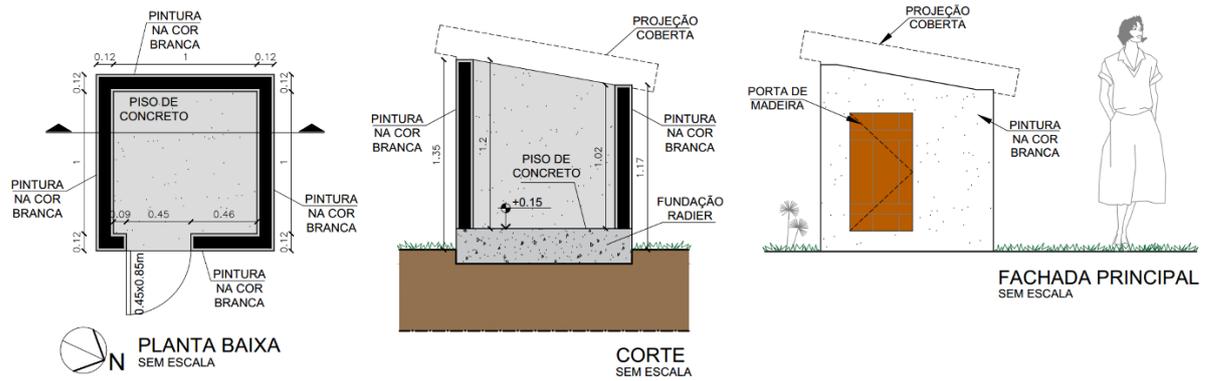


Fonte: Adaptado de VEIGA, 2019

As células teste são similares quanto às dimensões, aberturas, elementos construtivos e orientação solar. O projeto permite um volume de $1,0\text{m}^3$ de ar no interior do modelo (Figura 21). Quanto aos materiais construtivos, a fundação é tipo radier; piso de concreto; alvenaria em tijolo cerâmico seis furos ($9,0 \times 14,0 \times 19,0\text{cm}$), assentados com argamassa de cimento e areia média, rebocada ($1,5\text{cm}$) com chapisco e emboço em ambos os lados (interno e externo) e pintada na cor branca com cal na face externa. A única abertura, voltada para Leste, possui uma porta feita de madeira nas dimensões $45,0 \times 85,0\text{cm}$, necessária para instalação, retirada e manutenção dos equipamentos de aquisição de dados. A estrutura permite a instalação de sistemas de cobertura com inclinação de 11° (20%)¹⁵, voltados para Norte, visando receber radiação solar o dia inteiro. Dimensionalmente, os módulos experimentais desta pesquisa são semelhantes aos modelos utilizados por Wilkinson e Feitosa (2015), Costa Junior (2016), Chagolla-Aranda et. al. (2017) e Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017) como apresenta o Quadro 5.

¹⁵ Considerando a seguinte relação entre graus ($^\circ$) e porcentagem (%): 45° correspondem a 100% de inclinação da cobertura.

Figura 21 - Projeto das células teste



Fonte: Elaborado pelo autor

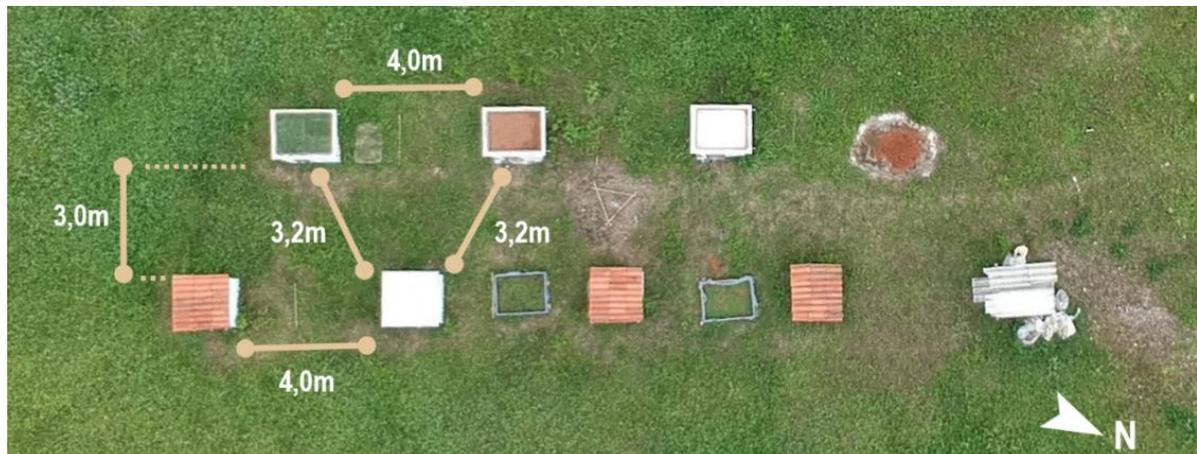
Quadro 5 – Diferentes células teste utilizadas em pesquisas com sistemas de telhados verdes

				
Célula teste desta pesquisa 1,00 x 1,00 x 1,00m (aprox. 1,00 m³)	Wilkinson e Feitosa (2015) 1,20 x 1,60 x 1,00 m (aprox. 1,92 m³)	Costa Junior (2016) 1,00 x 2,00 x 1,40m (aprox. 2,80 m³)	Chagolla-Aranda et. al. (2017) 0,90 x 0,90 x 0,90m (aprox. 0,73 m³)	Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017) 1,22 x 1,22 x 1,08m (aprox. 1,60 m³)

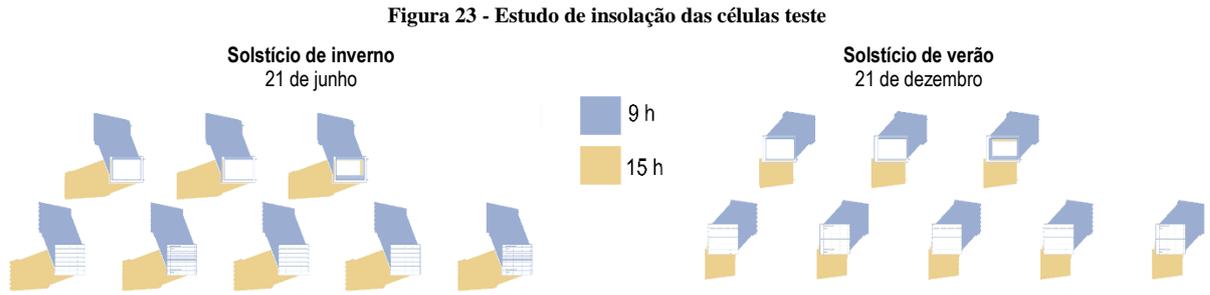
Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto à disposição no canteiro experimental, elas estão intercaladas, afastadas uma da outra no mínimo 3,2m e no máximo 4,0m (Figura 22), a fim de que não influenciem no comportamento da célula teste mais próxima, considerando a trajetória solar (Figura 23) e a predominância de ventos na região, que se alternam entre Leste (outubro a abril) e Sudeste (maio a setembro) segundo os estudos de Silva (2019).

Figura 22 - Implantação das células teste no canteiro experimental



Fonte: Adaptado de VEIGA, 2019



4.2 Sistemas de cobertura estudados

Para o cumprimento dos objetivos desta pesquisa foram utilizados oito sistemas de cobertura: telha cerâmica tipo colonial capa e canal (TC); telha de fibrocimento (FI); laje impermeabilizada sem a colocação de telhas (LI); laje impermeabilizada com solo nu (SO); três sistemas de laje impermeabilizada com telhado verde, utilizando espécies vegetais diferentes, *Zoysia japonica* (TV-zj), *Callisia repens* (TV-cr) e *Desmodium triflorum* (TV-dt); e por fim, laje impermeabilizada com camadas de drenagem, filtro e substrato, ou seja, o sistema de telhado verde sem vegetação (SV).

A quantidade de células teste com laje impermeabilizada no canteiro experimental (três) não era suficiente para compor os seis sistemas que necessitam dessa estrutura (LI, SO, TV-zj, TV-cr, TV-dt e SV), então foi necessário realizar o monitoramento em dias diferentes e utilizando os sistemas de cobertura que permitissem obter as análises necessárias. As seções 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 irão abordar a combinação dos sistemas analisados em cada período, conforme os objetivos desta pesquisa.

Tanto a telha cerâmica (TC) como a telha de fibrocimento (FI) são as principais coberturas utilizadas no Brasil (LOPES, 2007). O sistema LI (laje impermeabilizada) pode ser considerado uma estrutura base para a implantação de um de telhado verde. Ele é inserido nos sistemas a serem analisados a fim de estudar como seu desempenho térmico se altera com a adição do telhado verde. A cobertura SO (solo nu) surge como uma possibilidade simples e econômica a ser instalada sobre a laje impermeabilizada, que proporciona um desempenho interno semelhante ao telhado verde¹⁶. Os três sistemas de telhado verde TV-zj, TV-cr e TV-dt utilizam, respectivamente, as espécies vegetais: *Zoysia japonica* (grama-esmeralda), uma espécie usualmente utilizada como forração em jardins residenciais da cidade e região; *Callisia repens* (dinheiro-em-penca), espécie que apresentou bons resultados para a aplicação em telhados

¹⁶ Esse comportamento foi encontrado no pré-teste desta pesquisa (Apêndice A), onde foram monitorados temperatura e umidade relativa do ar interno, externo e temperaturas superficiais de cinco sistemas de cobertura (telha cerâmica, telha de fibrocimento, laje impermeabilizada, solo nu e telhado verde).

verdes na Zona da Mata de Pernambuco, dentre as 19 espécies estudadas por Bastos (2017); e *Desmodium triflorum* (amor-do-campo), encontrada no próprio local do experimento (UFAL - *Campus Arapiraca*) e adaptada ao clima da região. Por fim, o sistema SV (sem vegetação) permitiu estudar o comportamento do elementos do telhado verde (drenagem, filtro e substrato) sem a cobertura vegetal, uma situação em que as plantas não resistiriam às condições climáticas locais e morreriam, deixando o substrato exposto.

4.2.1 Cobertura com telha cerâmica (TC)

O sistema de cobertura com telha cerâmica é a uma técnica utilizada no Brasil desde o período colonial. Constitui-se basicamente de telhas feitas de materiais cerâmicos produzidos a partir da argila, instaladas sobre uma estrutura geralmente feita de madeira, composta de ripas, caibros, terças etc. Nas células teste desta pesquisa foram utilizadas telhas cerâmicas tipo colonial capa e canal, instaladas sobre uma estrutura de madeira composta apenas por caibros (3,0 x 5,0cm) e terças (6,0 x 13,5cm) devido à dimensão do modelo, com beiral de 9,0cm em todos os lados e inclinação de 11° (20%) (Quadro 6).

Quadro 6 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura TC

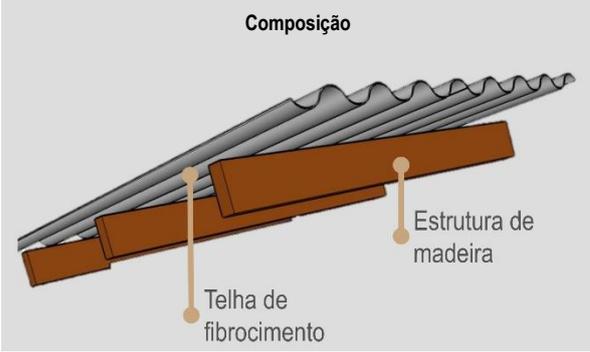


Fonte: Adaptado de ABNT,2003b e PROJETEEE, 2020

4.2.2 Cobertura com telha de fibrocimento (FI)

A cobertura com telha de fibrocimento possui uma instalação semelhante ao sistema anterior, formado basicamente da telha e uma estrutura de suporte, geralmente pontalões de madeira ou metal e caibros. Para as células teste da pesquisa, foi utilizada telha de fibrocimento ondulada 6,0mm instalada sobre caibros (3,0 x 5,0cm), com beiral de 9,0cm em todos os lados e inclinação de 11° (20%) (Quadro 7).

Quadro 7 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura FI

Composição	
	
Propriedades térmicas	Transmitância = 4,60 W/(m ² K) Capacidade Térmica = 11 kJ/(m ² K)
	

Fonte: Adaptado de ABNT,2003b e PROJETEEE, 2020

4.2.3 Laje impermeabilizada (LI)

A laje impermeabilizada moldada *in loco* sem a colocação de telhas compõe o terceiro sistema de cobertura utilizado, mas também é a estrutura de suporte para os sistemas SO, SV, TV-zj, TV-cr e TV-dt. Comum no México e América Latina (LOPES, 2007; SAMAYOA; MARTÍNEZ, NOLASCO, 2015a), esse sistema também é encontrado no Brasil.

Utilizou-se uma laje constituída de vigotas treliçadas pré-moldadas (12,5 x 2,5 x 8,5cm), lajotas cerâmicas (27,0 x 7,0 x 19,0cm) e capa externa de concreto (4,0cm), permitindo uma espessura total de 12,0cm (Figura 24). Por motivos de padronização das células teste, a inclinação do sistema LI é de 11° (20%), assim como os sistemas anteriores. Sobre todo o perímetro da laje estão construídos platibandas de 8,0cm de altura. Nos vértices de encontro da aresta de menor altura da laje com a base da platibanda, estão inseridos dois canos de PVC (25,0mm), um em cada vértice, de 21,0cm de comprimento (12,0cm internos no platibanda e 9,0cm externos), destinados a drenagem da água pluvial que precipitar sobre a cobertura.

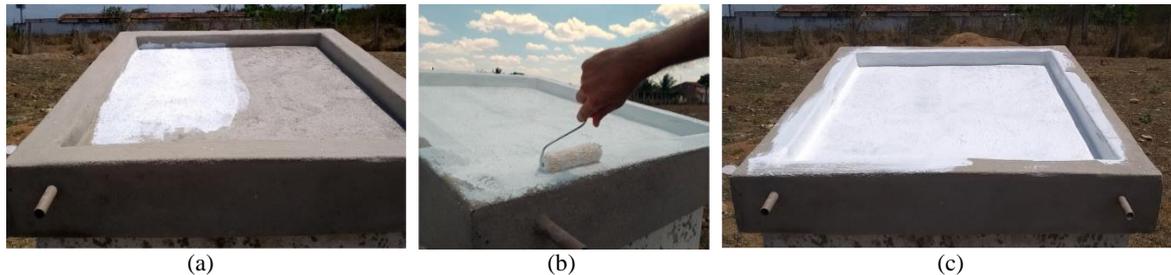
Figura 24 - Instalação da laje cerâmica nas células teste



Fonte - Elaborado pelo autor

Para evitar a infiltração e proteger a cobertura, foi aplicada uma manta líquida impermeabilizante SikaFill® Rápido na cor branca¹⁷, para impermeabilização elástica e flexível de coberturas, lajes e pisos de áreas frias. Como mostra a Figura 25, a aplicação a frio foi realizada utilizando rolo de pintura em duas demãos, com duas horas de intervalo de aplicação entre a primeira e segunda demão, conforme orientação do fabricante (SIKA, 2014). Quatro horas depois da primeira aplicação do produto, a cobertura com laje cerâmica já estava com a impermeabilização finalizada. O Quadro 8 apresenta o sistema LI instalado e suas propriedades térmicas.

Figura 25 – Aplicação da manta líquida impermeabilizante SikaFill® Rápido



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 8 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura LI



Fonte: Adaptado de PROJETEEE, 2020

Em todas as células teste que utilizam laje cerâmica foi adicionado, na face interna da platibanda, um “caixote vazado” feito de madeira com 20,0cm de altura (Figura 26), elemento necessário para a instalação de um sistema de telhado verde com espessura do substrato adequado.

¹⁷ Segundo Wilkinson e Feitosa (2015), uma alternativa para a utilização de telhados verdes é a pintura da superfície da cobertura na cor branco, são os telhados frios (*cool roofs*). Comuns na região do Mediterrâneo, eles permitem a reflexão de uma maior quantidade de radiação solar e calor, reduzindo a temperatura do ar e da superfície e levando a diminuição da energia (calor) a ser propagado pela estrutura. Saadatian et. al. (2013) corroboram com isso ao afirmarem que telhados verdes tem a mesma eficiência em termos de fluxo de calor que um telhado branco mais brilhante possível.

Figura 26 – (a) Antes e (b) depois da instalação do “caixote vazado” de madeira

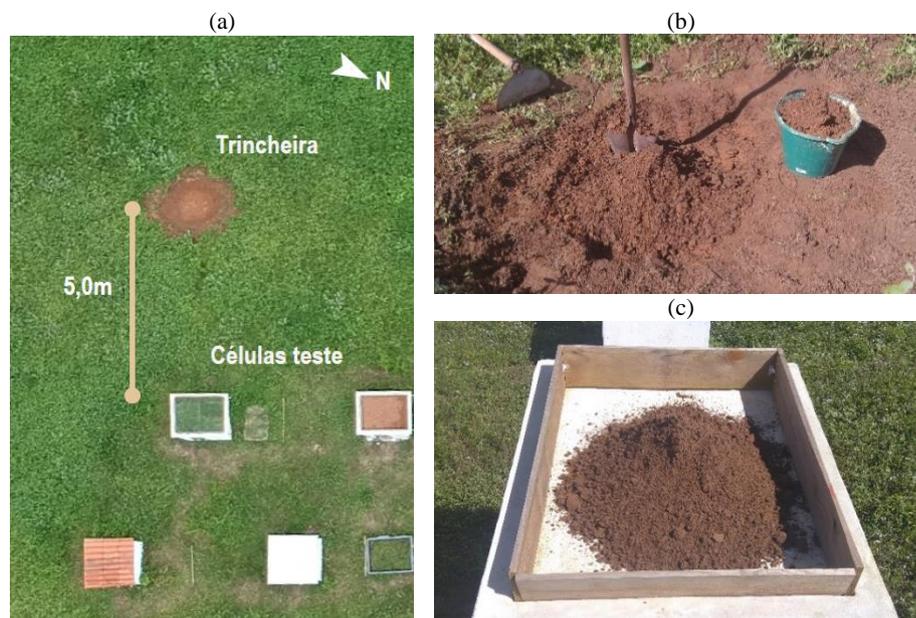


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4 Laje impermeabilizada com solo nu (SO)

Esse sistema de cobertura é composto da mesma configuração da laje impermeabilizada sem a colocação de telha (LI), acrescido de uma camada solo nu (solo sem cobertura vegetal) que preenche 17,0cm dos 20,0cm de altura do “caixote vazado” instalado na cobertura, equivalendo a um volume de 0,23m³, aproximadamente. Esse solo foi retirado de uma trincheira, distante 5,0m das células teste (Figura 27). No processo, a vegetação e uma camada de 5,0cm do solo com matéria orgânica de uma área aproximada de 1,33m² foi retirada, para que o solo na profundidade entre 5,0cm e 20,0cm fosse utilizado.

Figura 27 - (a) Localização da trincheira; (b) Retirada do solo da trincheira e (c) depósito do solo na cobertura



Fonte: (a) Adaptado de VEIGA, 2019; (b) e (c) elaborado pelo autor

O Quadro 9 apresenta o sistema SO instalado e suas propriedades térmicas. Fitchett, Govender e Vallabh (2019) utilizaram um sistema de cobertura bastante semelhante a esse para comparar com o desempenho do telhado verde na cidade de Johannesburgo, África do Sul. Ele

é diferente apenas na estrutura de suporte, que é curva e feita de blocos cerâmicos, similar ao sistema *Demotej* apresentado por Castañeda-Nolasco e Vecchia (2007). A utilização desse sistema de cobertura pouco usual foi considerada um meio termo entre a laje impermeabilizada sem a colocação de telha e os sistemas de telhado verde.

Quadro 9 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura SO



Fonte: Adaptado de PROJETEEE, 2020

4.2.5 Laje impermeabilizada com telhado verde

Assim como o sistema de cobertura anterior, a laje impermeabilizada sem a colocação de telha (LI) é a estrutura de suporte desta cobertura, acrescido dos elementos e camadas necessários para a instalação de um sistema de telhado verde com 17,0cm de espessura total, distribuído entre drenagem, filtro, substrato e vegetação.

A estrutura original da célula teste possuía apenas 8,0 cm de altura da platibanda, o que permitiria um telhado verde de espessura limitada do substrato, 6,0cm, valor próximo à espessura mínima para uma cobertura verde extensiva (5,0cm). Essa restrição implica em dificuldades para o desenvolvimento das plantas, uma vez que a cobertura vegetal horizontal é favorecida pela espessura do solo (BEATRICE, 2011). Então, foi necessário instalar um “caixote vazado” de madeira com 20,0cm de altura no perímetro interno da platibanda, para tornar possível aplicar um telhado verde com espessura do substrato maior e mais suscetível ao desenvolvimento da vegetação, dentro dos limites estabelecidos por Peck et. al. (1999), Mink (2003) e FLL (2018).

Os três sistemas de telhado verde implantados são da modalidade extensivo, moldados *in loco* com leve inclinação (20%), acessível apenas para manutenção e monoespecíficos, com

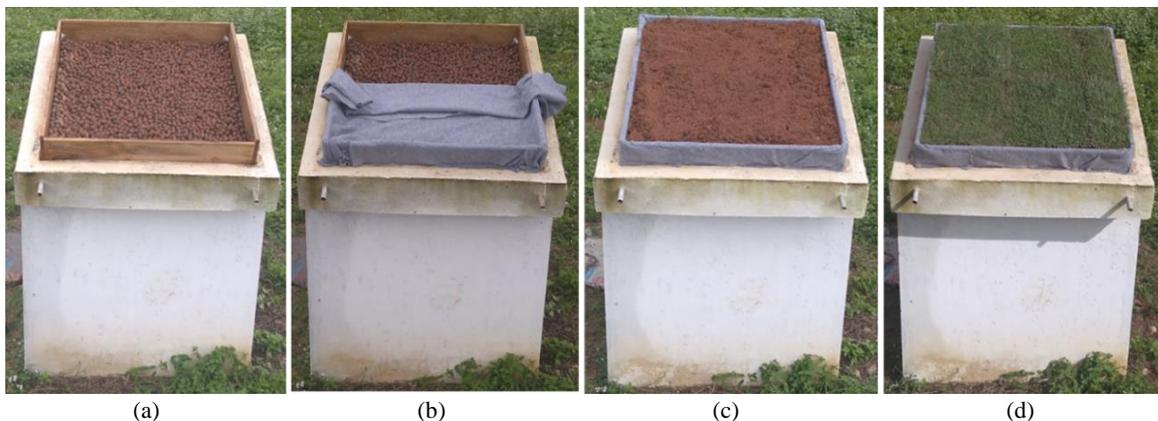
¹⁸ Valor da transmitância estimado a partir da resistência térmica da laje cerâmica 12,0cm (0,35 m²K/W) e de uma camada de 10,0cm de solo seco (0,4 m²K/W), informadas por PROJETEE (2020) e Sadineni, Madala e Boehm (2011), respectivamente. Ver Apêndice B.

espécies vegetais aclimatadas à região. A manutenção dos sistemas consistiu na rega diária¹⁹ manual (volume aproximado de 10 litros) no início da manhã (entre 7:30h e 8:00h) ou final da tarde (entre 16:30h e 17:00h)²⁰, sendo desnecessária quando a precipitação fosse significativa a ponto de irrigar o sistema; e na retirada manual de plantas invasoras, possivelmente oriundas do substrato utilizado ou trazidas à cobertura pela ação do vento.

A escolha de um sistema de telhado verde extensivo foi influenciada pela facilidade de instalação, já que essa tipologia exige pouca espessura do substrato, em consequência, baixo peso e suporta gramíneas, herbáceas e suculentas. Segundo FLL (2018) a inclinação mínima para um sistema de telhado verde extensivo é 2% (0,6°), porém utilizou-se uma inclinação de 20% para padronizar a cobertura com os sistema TC (telha cerâmica) e FI (telha de fibrocimento).

Devido à pouca experiência com esse tipo de cobertura na região, optou-se pela instalação de um sistema de telhado verde utilizando materiais e técnicas dos jardins térreos, elementos já consolidados na região, com fornecedores e mão de obra disponíveis. A Figura 28 mostra a sequência de instalação das camadas do sistema de telhado verde nas células teste.

Figura 28 – Instalação da camada de (a) drenagem, (b) filtro, (c) substrato e (d) vegetação nas células teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Para compor a camada de drenagem foi utilizado **argila expandida** tipo 3222 (graúda), encontrada facilmente em casas de jardinagem e no comércio da região sob a forma de sacos de 50 litros (0,05m³ ou 18kg) (Figura 29). Para compor uma camada uniforme com 7,0cm de material drenante foram necessários 90 litros (0,09m³) da argila expandida, espessura recomendada por Grub (1986) *apud* Pouey (1998) para telhados verdes com grama.

¹⁹ Devido dificuldade de acesso ao local do experimento aos finais de semana, a rega ocorreu apenas durante os cinco dias da semana (segunda, terça, quarta, quinta e sexta-feira).

²⁰ É indicado que a irrigação seja realizada no início da manhã ou no final da tarde para reduzir a evaporação da água (mais elevada nos períodos mais quentes do dia), e permitir que as plantas se “abasteçam” de água para o dia/período seguinte (LIMA, 2016).

Figura 29 - (a) Embalagem comercial da (b) argila expandida tipo 3222 (graúda)

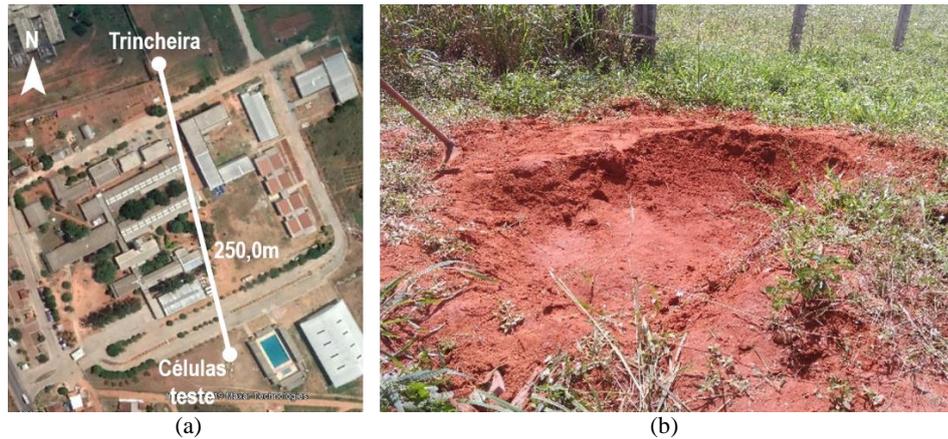


Fonte: Elaborado pelo autor

Sobre ela foi inserido a **manta bidim**, também chamada de manta de jardim, para funcionar como camada filtro. Ela foi colocada sobre a camada drenante e nas laterais do “caixote vazado” para evitar a passagem de partículas do solo para a drenagem do sistema. As bordas da manta foram fixadas com percevejos latonados na lateral externa da estrutura. Para cada sistema de telhado verde foi utilizando 2,85m² (1,5 x 1,9m) de manta.

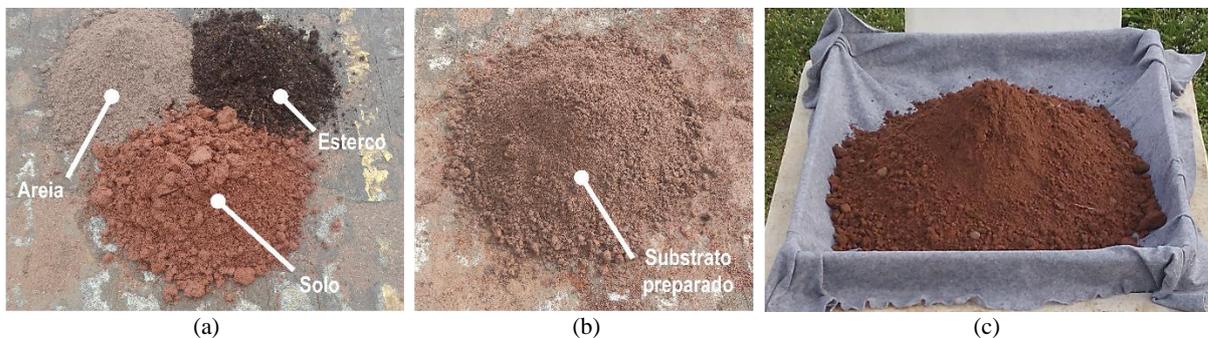
Acima, foi inserido uma camada de 10,0cm de **substrato** (valor médio para um sistema extensivo de telhado verde) composto de solo, areia e esterco na proporção 2:1:1, traço recomendado por Furtado (2019). O solo foi retirado de uma trincheira na área de experimentos do curso de Agronomia da UFAL *Campus* Arapiraca, distante 250,0 m do canteiro experimental (Figura 30), devido ao solo da área do canteiro experimental possuir muitos resíduos de construção. A areia foi adquirida comercialmente e o esterco de caprinos obtido com o curso de Zootecnia da UFAL *Campus* Arapiraca. Como mostra a Figura 31, os elementos foram misturados até obter um substrato homogêneo pronto para ser aplicado na célula teste. A composição física e química desse substrato preparado foi obtida por meio de uma análise de macro e micro nutrientes realizada por uma Central Analítica e pode ser visualizada na Tabela 4.

Figura 30- (a) Localização e (b) vista da trincheira



Fonte: (a) Adaptado de *GOOGLE EARTH*, 2020; (b) elaborado pelo autor

Figura 31 - (a) e (b) Mistura do solo, areia e esterco para a preparação do substrato e (c) aplicação na célula teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4 - Composição física e química do substrato

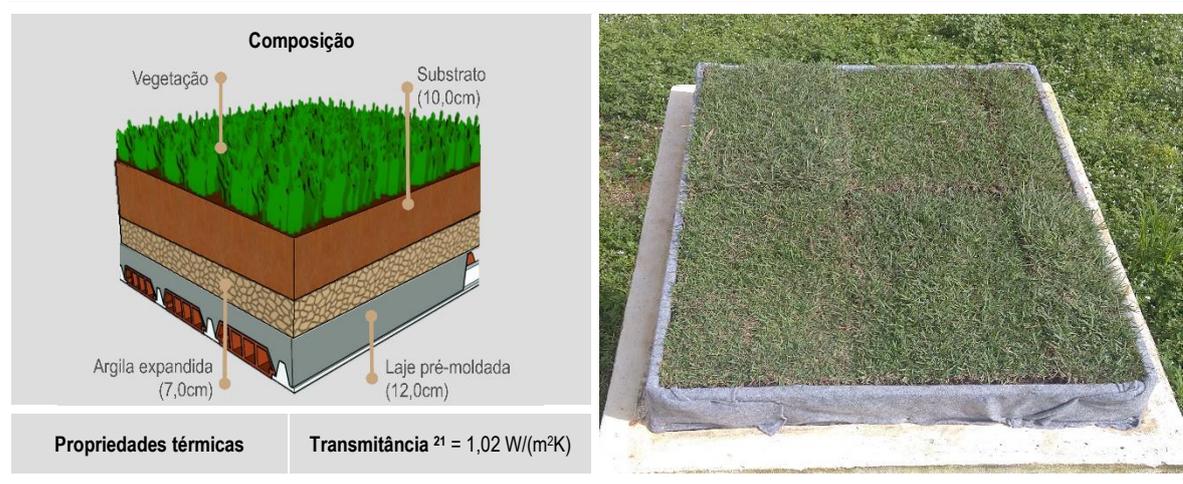
Parâmetro	Resultado	Parâmetro	Resultado
PH (em água)	7,9	C.T.C. (Cap. Troc. de Cátions – pH 7,0)	8,00
Na (ppm)	133	% V (Ind. De Sat. De Bases)	100,0
P (ppm)	187	% M (Ind. Sat. E Al)	0,0
K (ppm)	360	% Na (PST)	7,8
Ca + Mg (meq/100ml)	6,5	Sat. Em K (%)	12,4
Ca (meq/100ml)	5,1	Mat. Org. Total (%)	2,50
Mg (meq/100ml)	1,4	Ferro (ppm)	48,62
Al (meq/100ml)	0,00	Cobre (ppm)	5,85
H + Al (meq/100ml)	0,0	Zinco (ppm)	14,45
S (Soma das Bases)	8,00	Manganês (ppm)	54,29
C.T.C. Efetiva	8,00		

Fonte: CENTRAL ANALÍTICA, 2019

A última camada adicionada foi a **vegetação**. Utilizou-se três espécies vegetais diferentes selecionadas utilizando os seguintes critérios: nativa ou aclimatada à região, rápida cobertura do solo, resistência às condições climáticas locais, disponibilidade na região, fácil instala-

ção e pouca, ou nenhuma, manutenção. Foram selecionadas *Zoysia japonica* (grama-esmeralda), *Callisia repens* (dinheiro-em-penca) e *Desmodium triflorum* (amor-do-campo). O Quadro 10 apresenta o sistema de telhado verde instalado e suas propriedades térmicas.

Quadro 10 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura com telhado verde



Fonte: Adaptado de PROJETEEE, 2020

4.2.5.1 Telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj)

Pertencente à família *Poaceae* (*Gramineae*), a *Zoysia japonica* Steud (Figura 32) é uma espécie de clima quente, conhecida popularmente por grama-esmeralda, zóisia-silvestre, grama-zóisia ou zóisia. É uma herbácea²² rizomatosa²³, reptante²⁴, perene, muito ramificada, nativa do Japão mas aclimatada à região, com porte entre 10,0 e 15,0cm de altura, folhas pequenas, estreitas, dispostas em hastes curtas e densas que formam um tapete. Multiplica-se por placas e por mudas. É cultivada como forração em gramados domésticos a pleno sol, em terra fértil e irrigada a intervalos (LORENZI, SOUZA, 2008).

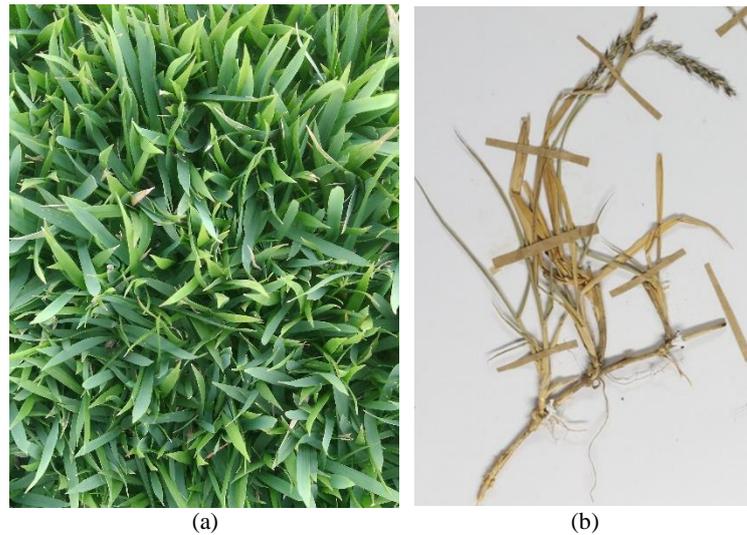
²¹ Valor da transmitância estimado a partir da resistência térmica da laje cerâmica 12,0cm (0,35 m²K/W); da resistência de um sistema de telhado verde composto por laje pré-moldada cerâmica (12,0cm), 10,0cm de terra argilosa seca e vegetação (0,54 m²K/W) apresentados por ProjeTEEE (2020); da condutividade térmica da argila expandida (0,16 W/mK), informada pela NBR 15220-2 (ABNT, 2003b); e do aumento da resistência térmica (0,063 m²K/W) proporcionado pela presença de umidade (40%) em 10,0cm de solo, citado por Sadineni, Madala e Boehm (2011). Ver Apêndice B.

²² Plantas que possuem tecidos pouco resistentes em sua estrutura, característica marcante nas plantas anuais (LORENZI, SOUZA, 2008).

²³ Plantas que possuem rizomas, “caules subterrâneos dotados de reservas, com nós, gemas e escamas. São mais ou menos cilíndricos e crescem lateralmente formando touceiras. As plantas rizomatosas podem ser perenes ou passar por um período de repouso. São multiplicadas arrancando-se a touceira e separando-a por partes” (LORENZI, SOUZA, 2008, p. 28-29).

²⁴ Forma de desenvolvimento de plantas que crescem paralelas à superfície da terra. As espécies como essa característica são utilizadas para o cultivo em vasos como pendentes e no chão como forração (LORENZI, SOUZA, 2008).

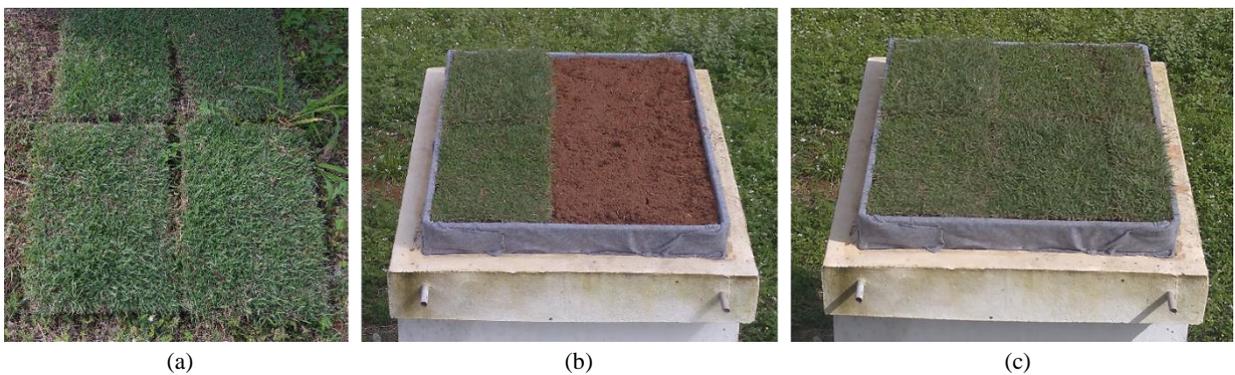
Figura 32 – *Zoysia japonica*: (a) detalhe das folhas e (b) exemplar de herbário (exsicata) da planta



Fonte: (a) Elaborado pelo autor; (b) adaptado de REFLORA, 2020

A principal vantagem é a rápida cobertura do solo, uma vez que o seu plantio ocorre com tapetes pré-cultivados de vegetação. Para cobrir os 1,3m² de área da cobertura da célula teste foram necessários aproximadamente cinco placas (40,0 x 60,0cm) de tapetes pré-cultivados, adquiridos comercialmente. A Figura 33 apresenta o processo de instalação da *Zoysia japonica* na célula teste.

Figura 33 - Sequência de instalação da *Zoysia japonica* na célula teste



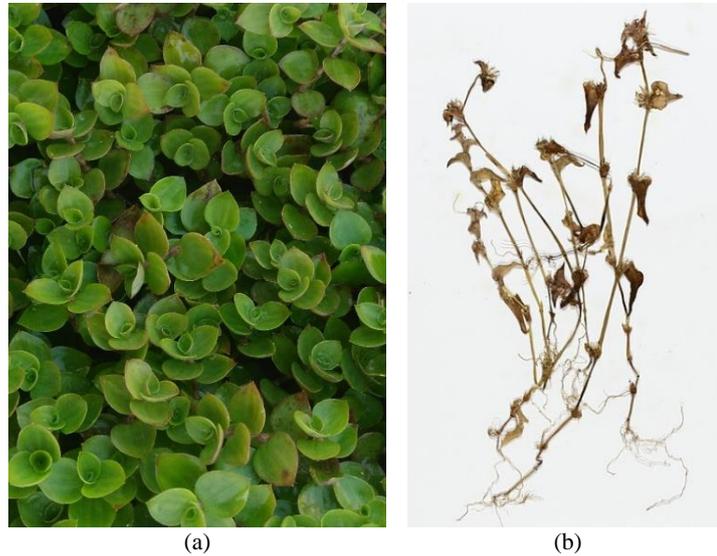
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.5.2 Telhado verde com *Callisia repens* (TV-cr)

Pertencente à família *Commelinaceae*, a *Callisia repens* (Jacq.) L. (Figura 34) é uma herbácea reptante com folhagem ornamental, muito ramificada, conhecida popularmente por dinheiro-em-penca. Originária da América tropical, possui porte entre 5,0 e 10,0cm de altura. As folhas são cerosas e adensadas ao longo de sua ramagem filamentosa, formando um tapete denso, suas flores são pequenas e brancas. Cultivada como forração e planta pendente em vasos e jardineiras, em solos irrigados periodicamente, ricos em matéria orgânica e à meia-sombra, preferencialmente. Pode se multiplicar em qualquer época do ano por meio de pequenos blocos

contendo a ramagem já enraizada (LORENZI, SOUZA, 2008). No Brasil ela é encontrada da Caatinga à Mata Atlântica, distribuída nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, como mostra o mapa no Quadro 11.

Figura 34 – *Callisia repens*: (a) detalhe das folhas e (b) exemplar de herbário (exsicata) da planta



Fonte: (a) Elaborado pelo autor; (b) adaptado de REFLORA, 2020

Quadro 11 - Distribuição geográfica da espécie *Callisia repens* (ocorrências confirmadas)

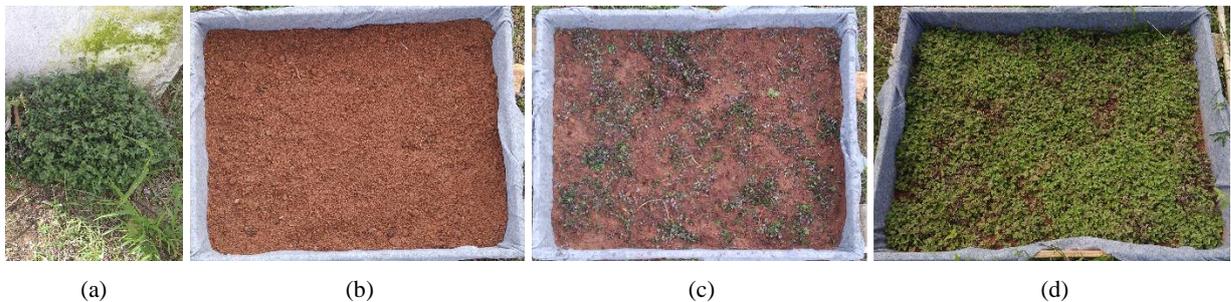
	<p>Nordeste</p> <p>Alagoas Bahia Ceará Paraíba Pernambuco Piauí Rio Grande do Norte Sergipe</p>
	<p>Sudeste</p> <p>Espírito Santo Minas Gerais Rio de Janeiro São Paulo</p>
	<p>Sul</p> <p>Paraná Rio Grande do Sul Santa Catarina</p>

Fonte: Adaptado de REFLORA, 2020

Bastos (2017) destaca as espécies *Callisia repens*, *Chlorophytum comosum*, *Ophiopogon jaburan*, *Paspalum leptoneuron* 01, *Portulaca grandiflora* e *Sansevieria trifasciata* como plantas indicadas para telhados verdes extensivos para a Zona da Mata de Pernambuco (Recife – clima tropical semiúmido As', de acordo com Köppen-Geiger) pois apresentaram maior pegamento, persistência, capacidade de cobertura vegetal, menor temperatura da superfície interna e melhor aparência geral, dentre as 19 espécies vegetais estudadas pela autora. A espécie *Callisia repens* foi escolhida para esta pesquisa por apresentar boa cobertura vegetal e rápido crescimento.

Diferente da espécie do sistema de telhado verde anterior, a *Callisia repens* não foi adquirida em placas, mas em mudas. Lopes (2007) afirma que o método de plantio é a principal variável para uma melhor ocupação da vegetação na cobertura e por isso, a utilização de esteiras de plantas (tapetes pré-cultivados) apresenta melhores resultados quando comparados a métodos que usam brotos e mudas. Desse modo, foi realizado um pré-plantio das mudas em 3,0cm de substrato preparado para a produção de pequenas placas, que foram transferidas para a cobertura da célula teste após 30 dias do pré-plantio (Figura 35). Esse período foi necessário para que a planta se desenvolvesse a ponto de cobrir a maior parte do substrato. Durante esse tempo, mais mudas foram plantadas para acelerar o processo. A Figura 36 apresenta o processo de instalação da *Callisia repens* na célula teste.

Figura 35 - (a) Mudanças de *Callisia repens*; (b) substrato preparado; (c) pré-plantio da espécie e (d) *Callisia repens* após 30 dias do pré-plantio



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 - Sequência de instalação da *Callisia repens* na célula teste



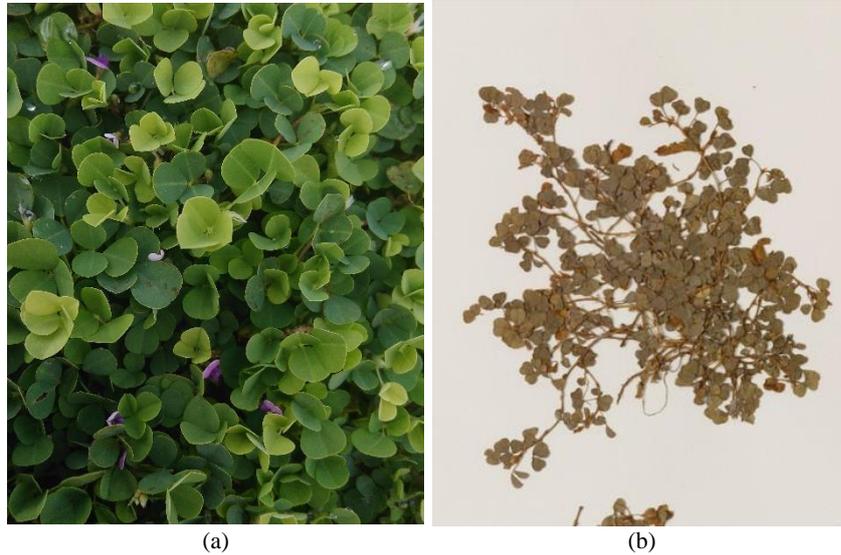
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.5.3 Telhado verde com *Desmodium triflorum* (TV-dt)

Pertencente à família *Fabaceae*, a *Desmodium triflorum* (L.) DC. (Figura 37), conhecida popularmente por amor-do-campo, é uma herbácea subarborescente, prostrada, enraizada nos entrenós e folha trifoliolada, geralmente encontrada em campos e áreas degradadas. Suas flores e frutos são observados em maio e apenas frutos em julho, já as folhas tem uso medicinal, combatendo inflamações. A espécie é naturalizada e pode ser encontrada na Amazônia, Caatinga,

Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal, distribuída nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, como mostra o Quadro 12 (MEDEIROS, FONSECA, ANDREATA, 2003; NOBRE, SARTONI, RESENDE, 2008; REFLORA, 2020).

Figura 37 - *Desmodium triflorum*: (a) detalhe das folhas e (b) exemplar de herbário (exsicata) da planta



Fonte: (a) Elaborado pelo autor; (b) adaptado de REFLORA, 2020

Quadro 12 - Distribuição geográfica da espécie *Desmodium triflorum* (ocorrências confirmadas)

Norte	Amazonas
	Amapá Pará Roraima
Nordeste	Bahia
	Ceará
	Paraíba
	Pernambuco
	Piauí
Rio Grande do Norte	
Sergipe	
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul
	Mato Grosso
Sudeste	Espírito Santo
	Minas Gerais
	Rio de Janeiro
	São Paulo
Sul	Santa Catarina

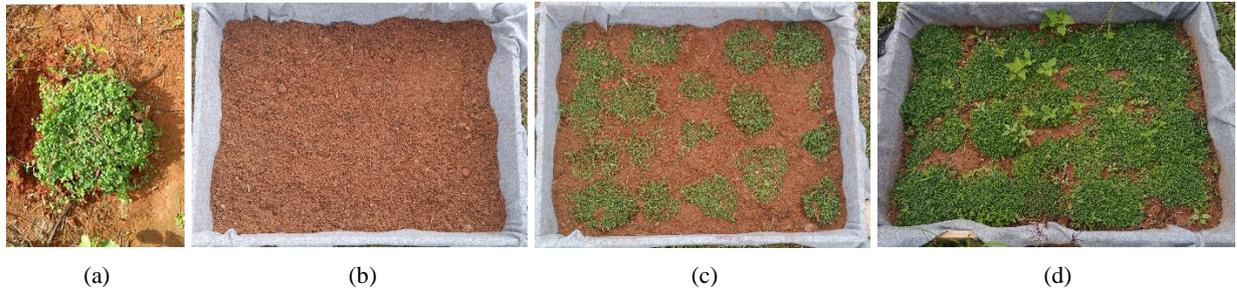
Fonte: Adaptado de REFLORA, 2020

As mudas foram coletadas no próprio *Campus* Arapiraca da UFAL, na área de experimentos do curso de Agronomia, localizada em um raio de 250,0m das células teste²⁵. Assim como na *Callisia repens*, foi necessário realizar um pré-plantio das mudas e após 30 dias transferi-las para a cobertura da célula teste. A *Desmodium triflorum* aumentou sua cobertura vege-

²⁵ A área em que as mudas foram coletadas é o mesmo local onde a trincheira apresentada na Figura 30 se encontra.

tal, não tanto quando a *Callisia repens*, apesar das mudas adicionais. As Figuras 38 e 39 apresentam o pré-plantio da *Desmodium triflorum* e seu processo de instalação na célula teste, respectivamente.

Figura 38 - (a) Mudanças de *Desmodium triflorum*; (b) substrato preparado; (c) pré-plantio da espécie e (d) *Desmodium triflorum* após 30 dias do pré-plantio



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 - Sequência de instalação da *Desmodium triflorum* na célula teste



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Laje impermeabilizada com telhado verde sem vegetação (SV)

Esse sistema se iguala à laje impermeabilizada com telhado verde apresentado na seção anterior (4.2.5), com exceção da vegetação, uma vez que este sistema de cobertura (SV) possui o substrato exposto, ou seja, sem cobertura vegetal, simulando uma situação de morte da vegetação devido à não resistência às condições climáticas do local ou a sazonalidade²⁶ da espécie adotada.

O sistema possui laje impermeabilizada sem a colocação de telha (LI) como estrutura de suporte, sobre a qual foram adicionadas uma camada argila expandida (7,0cm), manta de jardim e 10,0 cm de substrato (mistura de solo, areia e esterco na proporção 2:1:1), totalizando aproximadamente 17,0cm de espessura do sistema. O Quadro 13 apresenta o sistema SV instalado e suas propriedades térmicas.

²⁶ Espécies sazonais se desenvolvem melhor em um determinado conjunto de condições climáticas, apresentando, ao longo de seu ciclo, diferentes condições de crescimento e folhagem, por exemplo.

Quadro 13 - Composição e propriedades térmicas do sistema de cobertura SV



Fonte: Adaptado de PROJETEEE, 2020

Apesar de serem semelhantes visualmente, uma vez que em ambos os casos o solo/substrato está exposto, SV (telhado verde sem vegetação) e SO (solo nu) possuem em sua composição elementos bem diferentes. O primeiro conta com os elementos necessários para um telhado verde e o segundo não apresenta nenhum elemento, apenas o solo local, sem nem mesmo a adição de areia e esterco para proporcionar um substrato adequado para o crescimento vegetal.

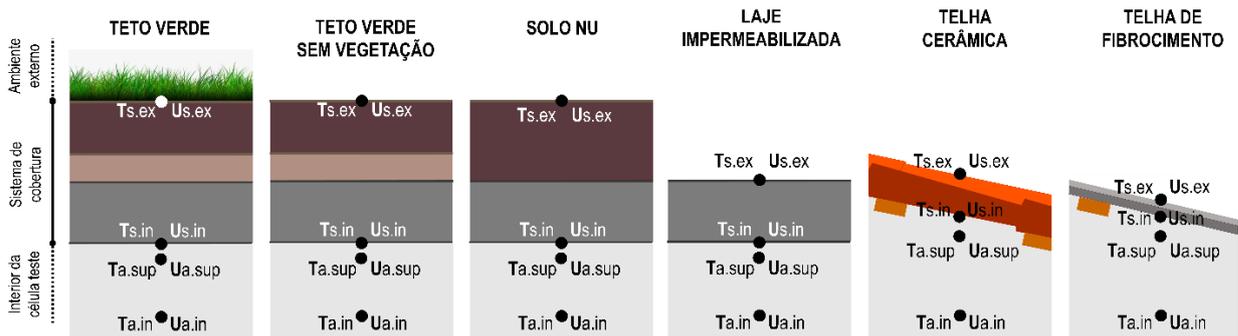
4.3 Monitoramento nas células teste

Para compreender a resposta dos sistemas de cobertura diante das variáveis ambientais externas, realizou-se o monitoramento de dados nas células teste e do comportamento climático nos dias de análise. Para estudar o desempenho do telhado verde, serão utilizadas as temperaturas superficiais externas e internas. Para entender o efeito desse sistema no interior da célula teste serão utilizadas as variáveis do ar externo e interno. O monitoramento dos sistemas de cobertura ocorreu tanto de forma manual como automática e incluiu a coleta das seguintes variáveis: temperatura superficial externa ($T_{s.ex}$) e interna ($T_{s.in}$), temperatura do ar próximo à superfície interna da cobertura ($T_{a.sup}$), temperatura do ar no interior da célula teste ($T_{a.in}$)²⁸, umidade superficial externa ($U_{s.ex}$) e interna ($U_{s.in}$), umidade relativa do ar próximo à superfície ($U_{a.sup}$) e umidade relativa do ar no interior da célula teste ($U_{a.in}$). A Figura 40 apresenta um corte esquemático dos sistemas de cobertura com a localização das variáveis coletadas.

²⁷ Valor da transmitância estimado a partir da resistência térmica da laje cerâmica 12,0cm (0,35 m²K/W); da resistência térmica de uma camada de 10,0cm de solo seco (0,4 m²K/W) e o aumento da resistência térmica (0,063 m²K/W) proporcionado pela presença de umidade (40%) em 10,0cm de solo, informados por Sadineni, Madala e Boehm (2011); e da condutividade térmica da argila expandida (0,16 W/mK), informada pela NBR 15220-2 (ABNT, 2003b). Ver Apêndice B.

²⁸ As temperaturas do ar ($T_{a.sup}$ e $T_{a.in}$) coletadas são temperatura de bulbo seco (TBS), definida pela ABNT (2003a, p. 5) como a “temperatura do ar medida por um termômetro com dispositivo de proteção contra a influência da radiação térmica”.

Figura 40 - Corte esquemático dos sistemas de cobertura com a localização das variáveis coletadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o monitoramento das oito (8) variáveis, foram necessários três equipamentos. Para os dados de temperaturas e umidades relativas do ar (Ta_{sup} , Ta_{in} , Ua_{sup} e Ua_{in}) foram utilizados *data loggers*, as temperaturas superficiais (Ts_{ex} e Ts_{in}) foram coletados com um câmara termográfica, e as umidades superficiais (Us_{ex} e Us_{in}) por um medidor de umidade.

4.3.1 Temperatura do ar e umidade relativa do ar

Todas as variáveis que envolvem valores do ar foram coletadas utilizando *data logger* (registrador de dados), foram elas: temperatura do ar próximo à superfície interna da cobertura (Ta_{sup}), temperatura do ar no interior da célula teste (Ta_{in}), umidade relativa do ar próximo à superfície (Ua_{sup}) e umidade relativa do ar no interior da célula teste (Ua_{in}).

Um *data logger* é um equipamento que permite coletar uma série de dados em intervalo pré-estabelecido e armazená-los para posterior transferência para o computador por meio de *software* específico, geralmente. Para as análises desta pesquisa, foram utilizados *data loggers* HOBO® UX100-003 da ONSET®²⁹, que registram temperatura e umidade relativa de ambientes internos em uma faixa de 3,5% de precisão (ONSET, 2019b). Na Figura 41 constam imagens do equipamento e no Quadro 14 suas informações técnicas.

Figura 41 - *Data logger* HOBO® UX100-003



(a)

(b)

Fonte: (a) ONSET, 2019b; (b) elaborado pelo autor

²⁹ Equipamento pertencente ao Grupo de Estudos em Atmosfera Climática Urbana (GATU), cedido pelo Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa, do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas.

Quadro 14 - Alguns dados técnicos do data logger HOBO® UX100-003

Sensor de temperatura	Faixa	-20°C a 70°C
	Precisão	± 0,21°C (0°C a 50°C)
	Resolução	0,024°C a 25°C
	Tempo de resposta	4 minutos no ar movendo-se a 1,0m/s
	Desvio	< 0,1°C por ano
Sensor de umidade relativa	Faixa	15% a 95% (sem condensação)
	Precisão	± 3,5% (25% a 85%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)
	Resolução	0,024°C a 25°C
	Tempo de resposta	43 segundos no fluxo de ar de 1,0m/s
	Desvio	< 0,1°C por ano
Registrador	Registro	-20°C a 70°C / 0% a 95% (sem condensação)
	Lançamento / leitura	0°C a 50°C
	Taxa de registro	1 segundo a 18 horas, 12 minutos, 15 segundos
	Precisão de tempo	± 1 minuto por mês (a 25°C)
	Memória	128 KB (máximo de 84650 medições)
	Tamanho	3,66 x 8,48 x 1,52 cm

Fonte: ONSET, 2019b

Uma aferição dos equipamentos foi realizada, antes de iniciar as medições, com a finalidade de identificar possíveis diferenças entre os dados coletados pelos equipamentos. Para tanto, dez (10) *data loggers* foram programados para realizar registros a cada 1h durante um período de 96h (quatro dias) e foram dispostos em um compartimento isolado para evitar possíveis interferências externas. Os dados coletados foram transferidos para uma planilha eletrônica que permitiu o cálculo dos valores mínimos, médios, máximos e desvio padrão de cada equipamento. Metodologia semelhante foi realizada por Ferreira (2019), que define o desvio padrão como uma “medida do grau de dispersão de um conjunto de dados. Quanto mais próximo de 0 (zero) for o desvio padrão, mais homogêneo é o conjunto de dados” (FERREIRA, 2019, p.73). Assim, para que os dados coletados sejam precisos é necessário que o desvio padrão não ultrapasse o valor de $\pm 0,21^\circ\text{C}$ para temperatura do ar, e de $\pm 3,5\%$ para umidade relativa do ar, níveis de precisão especificados pelo fabricante para o HOBO® UX100-003. A Tabela 5 apresenta os resultados dos cálculos, mostrando que os dados dos equipamentos estão dentro dos limites de precisão indicados pelo fabricante.

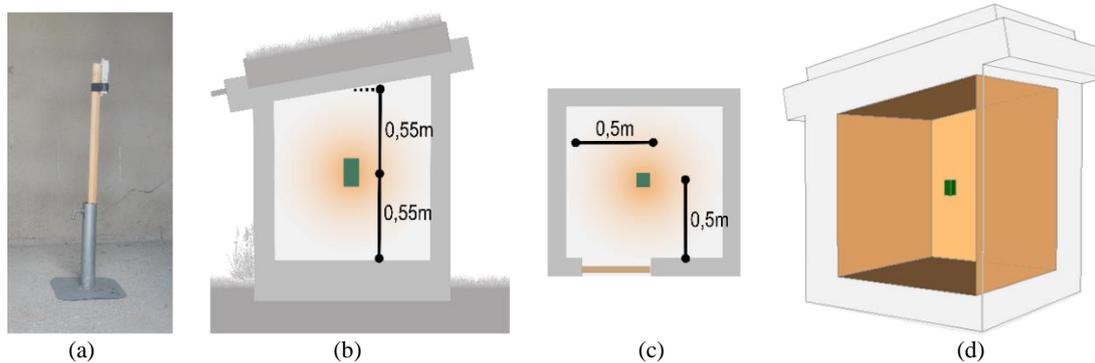
Tabela 5 - Resultado da aferição dos equipamentos de medição

Equipamento	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
HOBO 01	23,91	24,84	25,75	67,67	75,38	83,51
HOBO 02	23,96	24,88	25,77	68,23	75,85	83,84
HOBO 03	23,98	24,86	25,70	66,99	74,44	82,45
HOBO 04	23,98	24,89	25,80	68,39	76,35	84,65
HOBO 05	23,98	24,87	25,73	65,16	72,79	81,02
HOBO 06	23,89	24,81	25,70	66,99	74,65	82,76
HOBO 07	23,89	24,83	25,77	65,58	73,13	80,84
HOBO 08	23,91	24,83	25,73	65,78	73,44	81,48
HOBO 09	24,03	24,91	25,75	66,26	73,84	81,96
HOBO 10	23,93	24,81	25,68	65,69	73,50	82,06
Desvio padrão	0,049	0,035	0,039	1,156	1,208	1,244

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o monitoramento das células teste, dois (2) *data loggers* foram instalados em cada modelo, um posicionado no centro geométrico para coletar $T_{a.in}$ e $U_{a.in}$, e outro fixado no centro da cobertura para coletar $T_{a.sup}$ e $U_{a.sup}$, como mostram as Figuras 42 e 43. Os dados foram coletados automaticamente a cada 1h em um intervalo de 24h, com início às 0h e término às 24h. Posteriormente os equipamentos foram descarregados com o auxílio do *software Hoboware*³⁰ que permitiu a leitura dos dados e exportação para uma planilha eletrônica do *software Microsoft Office Excel*®, onde foram tratados graficamente para análise.

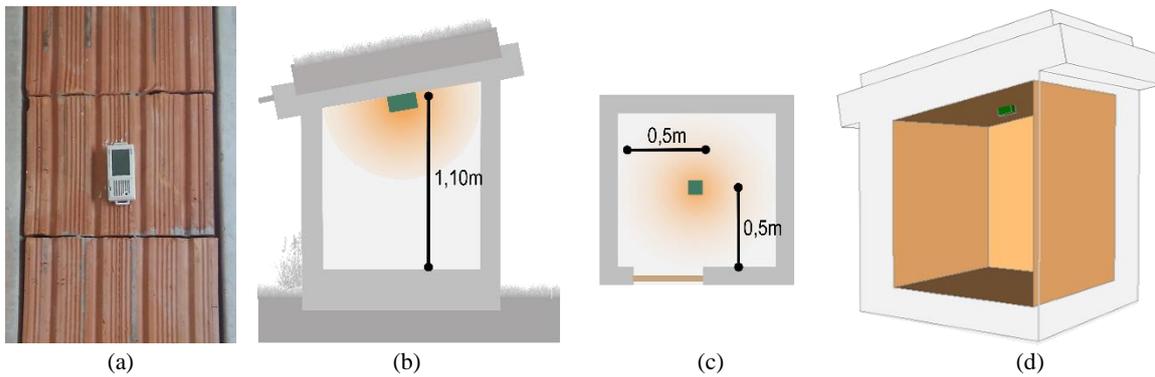
Figura 42 - (a) *Data logger* instalado para a coleta de dados; (b) e (c) posicionamento do equipamento em corte e planta baixa; (d) esquema volumétrico da célula teste com HOBO® UX100-003 no interior



Fonte: Elaborado pelo autor

³⁰ *Software freeware* disponível no endereço eletrônico: <<https://www.onsetcomp.com/hoboware-free-download>>.

Figura 43 - (a) *Data logger* instalado para a coleta de dados; (b) e (c) posicionamento do equipamento em corte e planta baixa; (d) esquema volumétrico da célula teste com HOBO® UX100-003 na superfície da cobertura



Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de verificar o comportamento térmico das três (3) células teste com laje impermeabilizada ainda sem nenhum elemento que as diferenciasse, foi realizado durante três dias consecutivos (19, 20 e 21 de junho de 2019) o monitoramento da $T_{a.in}$ e $U_{a.in}$, a cada 1h em um intervalo de 24h, com início às 0h e término às 24h. Procedimentos semelhantes foram utilizados Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017) para verificar se as células teste de sua pesquisa apresentavam condições e comportamentos similares. Nesta pesquisa, apesar de serem idênticas do ponto de vista construtivo, a temperatura máxima do ar apresentou um desvio padrão de 0,276, maior que o permitido pelo equipamento, de $\pm 0,21$ (Quadro 15). Esse comportamento poderia afetar os dados a serem coletados com os diferentes sistemas de cobertura, então uma célula teste foi estabelecida como padrão (CT 03), e nos dados das demais (CT 01 e CT 02) foi aplicado um fator de correção, obtido a partir diferença entre os valores médios horários da CT 03 com os valores médios horários das CT 01 e CT 02. A Tabela 6 e o Quadro 16 apresentam respectivamente, o fator de correção para cada horário em cada célula teste (CT 01 e CT 02) e o desvio padrão recalculado com os dados corrigidos³¹.

Quadro 15 - Resultado da aferição das células teste

Célula teste / Equipamento	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
CT 01 (HOBO 01)	20,51	23,22	26,58	73,20	88,16	95,21
CT 02 (HOBO 02)	20,49	23,21	26,60	70,88	87,61	96,70
CT 03 (HOBO 03)	20,27	23,25	27,07	66,82	84,83	94,33
Desvio padrão	0,131	0,020	0,276	3,232	1,784	1,196

Fonte: Elaborado pelo autor

³¹ O Apêndice C apresenta os dados monitorados e seu comportamento gráfico nessa aferição da temperatura e umidade relativa do ar interno nas células teste, assim como os dados após a aplicação do fator de correção da Tabela 6 e um gráfico de seu comportamento.

Tabela 6 - Fator de conversão dos dados de Ta.in e Ua.in para as CT 01 e CT 02

Hora (h)	Temperatura do ar (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Hora (h)	Temperatura do ar (°C)		Umidade relativa do ar (%)	
	CT 01	CT 02	CT 01	CT 02		CT 01	CT 02	CT 01	CT 02
0	-0,159	-0,072	-2,262	-2,633	12	0,437	0,219	-5,988	-3,601
1	-0,183	-0,096	-2,106	-2,624	13	0,495	0,381	-6,155	-3,788
2	-0,231	-0,151	-1,857	-2,377	14	0,521	0,456	-7,463	-4,539
3	-0,255	-0,175	-1,515	-2,272	15	0,488	0,424	-6,844	-4,188
4	-0,238	-0,191	-1,274	-2,062	16	0,293	0,309	-6,215	-3,848
5	-0,254	-0,198	-1,524	-2,317	17	0,016	0,203	-4,106	-3,059
6	-0,238	-0,190	-1,410	-1,812	18	-0,072	0,154	-3,969	-3,319
7	-0,080	-0,135	-1,095	-1,988	19	-0,105	0,121	-3,328	-2,859
8	0,096	-0,151	-1,416	-1,946	20	-0,112	0,088	-2,727	-2,448
9	0,160	-0,152	-3,124	-2,507	21	-0,120	0,040	-2,033	-2,240
10	0,225	-0,048	-3,969	-2,613	22	-0,120	0,024	-2,298	-2,152
11	0,371	0,121	-5,740	-3,236	23	-0,136	-0,032	-2,271	-2,505

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 16 - Resultado da aferição das células teste após a aplicação do fator de correção nos dados das CT 01 e 02

Célula teste / Equipamento	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
CT 01 (HOBO 01)	20,27	23,25	27,07	66,32	84,82	93,67
CT 02 (HOBO 02)	20,29	23,25	27,03	66,61	84,82	94,71
CT 03 (HOBO 03)	20,27	23,25	27,07	66,82	84,83	94,33
Desvio padrão	0,009	0,000	0,024	0,249	0,009	0,527

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2 Temperatura superficial

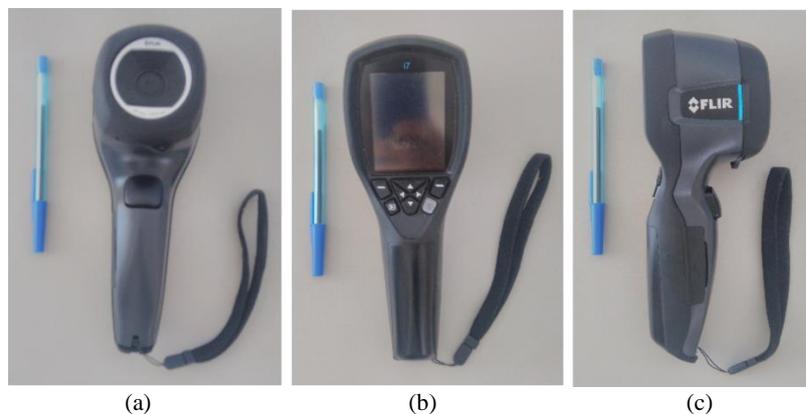
A temperatura superficial externa ($T_{s.ex}$) e a temperatura superficial interna ($T_{s.in}$) dos sistemas de cobertura foram coletadas com o auxílio de uma câmera termográfica. Também chamada de termógrafo ou câmera de infravermelhos, esse equipamento “mede e reproduz em imagens a radiação de infravermelhos emitida pelo objetos. O fato de a radiação resultar da temperatura de superfície do objeto possibilita que a câmera calcule e mostre essa temperatura” (FLIR, 2010, p.134). A radiação medida pela câmera também varia conforme a emissividade³² do objeto e da temperatura do meio exterior refletida (FLIR, 2010).

Costa Junior (2016) utilizou imagens térmicas da superfície interna de coberturas para obter a temperatura superficial interna do material de cada um dos seis sistemas de cobertura estudados. Liu et. al. (2012) fez o uso da termografia para identificar diferentes temperaturas

³² A emissividade “consiste na medição da gama de radiação emitida pelo objeto, comparativamente à que é emitida por um corpo negro perfeito com a mesma temperatura. Normalmente, os materiais dos objetos e os tratamentos de superfície possuem uma gama de emissividade compreendida entre 0,1 e 0,95” (FLIR, 2010, p.134).

superficiais nas folhas das plantas, a fim de estudar a influência da altura, cor e espécie nessa variável. Já Parizotto Filho (2010) e Liz, Ordenes e Güths (2018) utilizaram fotografias termográficas para verificar as diferenças entre as temperaturas superficiais externas de telhados verdes e outros sistemas de cobertura. Nesta pesquisa, foram registradas imagens de ambas as faces da cobertura, externa e interna. O equipamento foi a câmera termográfica modelo FLIR i7³³ da FLIR® Systems (Figura 44), que permite realizar análises termográficas de edificações, detectando umidade, fungos, danos provocados pela água, infiltrações de ar, deficiência de isolamento etc (FLIR, 2010). O Quadro 17 apresenta as informações técnicas do instrumento.

Figura 44 - Vistas da câmera termográfica FLIR i7



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 17 - Alguns dados técnicos da câmera termográfica FLIR i7

Dados físicos	Dimensões da câmera (C x L x A)	223 x 79 x 83 mm
Dados do detector	Tipo de detector	Matriz de plano focal (FPA), microbolômetro não refrigerado
	Intervalo espectral	7,5 – 13 μm
	Resolução de infravermelho	120 x 120 pixels
Imagens e dados ópticos	Campo de visão	25° x 25°
	Distância de focagem mínima	0,6 m
	Resolução espacial (IFOV = campo de visão instantâneo)	3,71 mrad
	Sensibilidade térmica / NETD	< 0,1°C
	Frequência das imagens	9 Hz
	Focagem	Focagem livre
Medição	Amplitude de temperaturas do objeto	0°C a +250°C
	Precisão	$\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$ de leitura, para uma temperatura ambiente de 10° a 35°C
Armazenamento de imagens	Formato do ficheiro	JPEG padrão, inclui dados de medição de 14 bits
Dados ambientais	Amplitude da temperatura de funcionamento	- 40°C a +70°C
	Amplitude da temperatura de armazenamento	- 40°C a +70°C
	Umidade (funcionamento de armazenamento)	IEC 60068-2-30 / 24 h 95% de umidade relativa

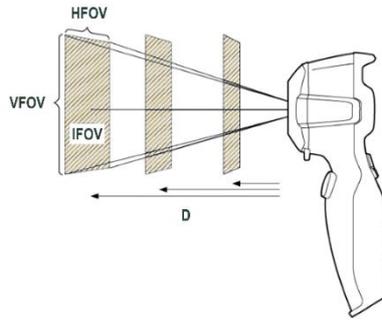
Fonte: FLIR, 2010

³³ Equipamento cedido pelo Prof. Dr. Tobyas Maia Albuquerque Mariz do Laboratório de Fisiologia e Parasitologia Animal do Curso de Zootecnia da Universidade Federal de Alagoas / Campus Arapiraca.

O manual do equipamento apresenta uma relação entre o campo de visão e a distância do objeto (D), considerando o campo de visão vertical (VFOV), o campo de visão horizontal (HFOV) e o campo de visão instantâneo (IFOV), ou seja, o tamanho de um elemento detector. Essa relação é apresentada no Quadro 18.

Quadro 18 - Relação entre distância do objeto e o campo de visão do equipamento

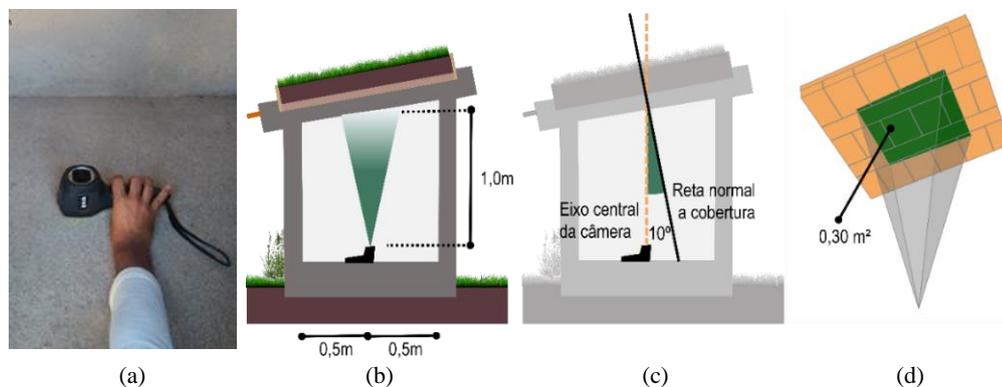
D (m)	HFOV (m)	VFOV (m)	IFOV (mm)
0,50	0,22	0,22	1,85
1,00	0,44	0,44	3,70
2,00	0,89	0,89	7,40
5,00	2,22	2,22	18,49
10,00	4,44	4,44	36,98
25,00	11,09	11,09	92,46
50,00	22,19	22,19	184,91
100,00	44,38	44,38	369,82



Fonte: Adaptado de FLIR, 2010

Os registros termográficos foram realizados manualmente a cada 1h em um intervalo de 24h, com início às 0h e término às 24h. Para a face interna das coberturas, a câmera foi posicionada próxima ao piso da célula, distante aproximadamente 1,0m da cobertura, enquanto que para a face externa, os registros foram feitos a uma distância média de 1,70m³⁴ do ponto central da cobertura, como ilustrado pelas Figuras 45 e 46. Na face interna da cobertura, só foi possível registrar 0,30m² da área total (1,00m²) devido ao pé-direito da célula teste no ponto central ser 1,10m, aproximadamente. Na face externa, a posição do equipamento permitiu visualizar, em média, 0,60m²³⁵ da cobertura. Após cada registro fotográfico, o número da imagem foi anotado em uma tabela para posterior identificação e organização em planilhas.

Figura 45 - (a) e (b) Posicionamento do equipamento para o registro termográfico interno; (c) ângulo entre o eixo central da câmera termográfica e a reta normal a cobertura; (d) área média da cobertura a ser fotografada

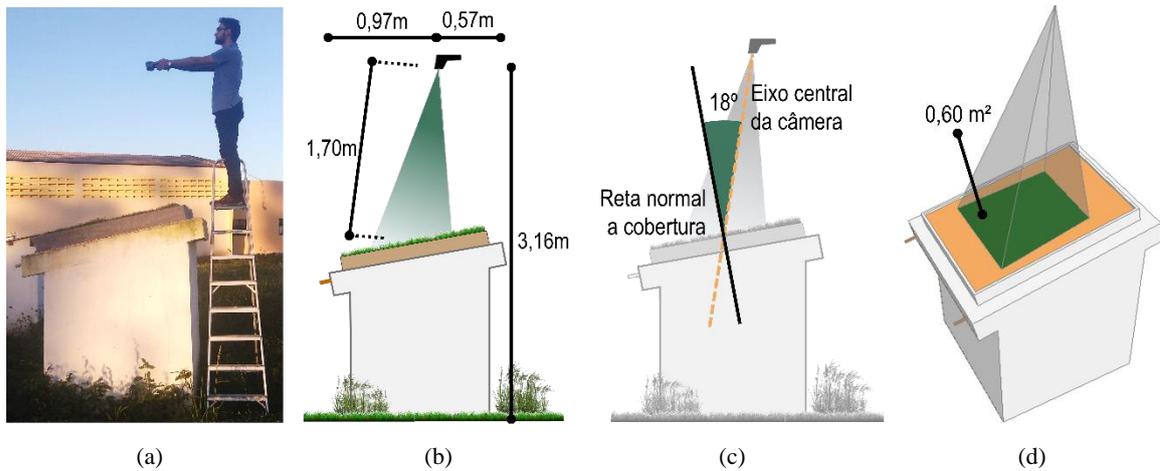


Fonte: Elaborado pelo autor

³⁴ Devido as diferentes dimensões dos elementos dos sistemas de cobertura, a distância da câmera termográfica teve uma pequena variação entre eles: LI – 1,81m; SO – 1,63m; SV – 1,63m; TV – 1,60m; TC – 1,76m e FI – 1,76m.

³⁵ Devido as pequenas variações de distância entre a cobertura e a câmera termográfica, a área fotografada pelo equipamento também se alterou da seguinte maneira: LI – 0,69m²; SO – 0,55m²; SV – 0,55m²; TV – 0,55m²; TC – 0,62m² e FI – 0,62m².

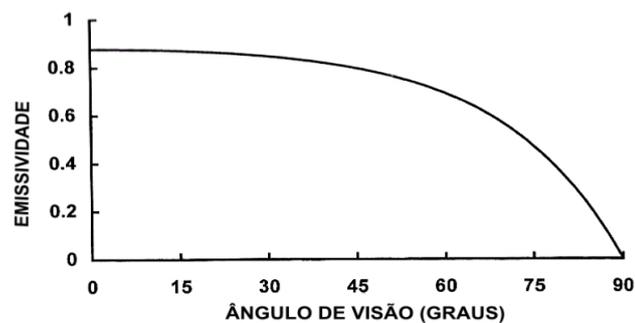
Figura 46 - (a) e (b) Posicionamento do equipamento para o registro termográfico externo; (c) ângulo entre o eixo central da câmera termográfica e a reta normal a cobertura; (d) área média da cobertura a ser fotografada



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Santos (2006, p.72), quando uma fotografia termográfica é registrada, “a emissividade de uma superfície diminui quando o ângulo de visão aumenta com relação a sua normal, sendo que medidas de temperatura exatas só podem ser feitas com ângulos abaixo de 30°”, como apresentado no gráfico da Figura 47. Nas medições termográficas desta pesquisa o ângulo de inclinação com a reta normal à cobertura foi entre 10° e 18° para as faces internas e externas.

Figura 47 - Gráfico da emissividade em função do ângulo de visão



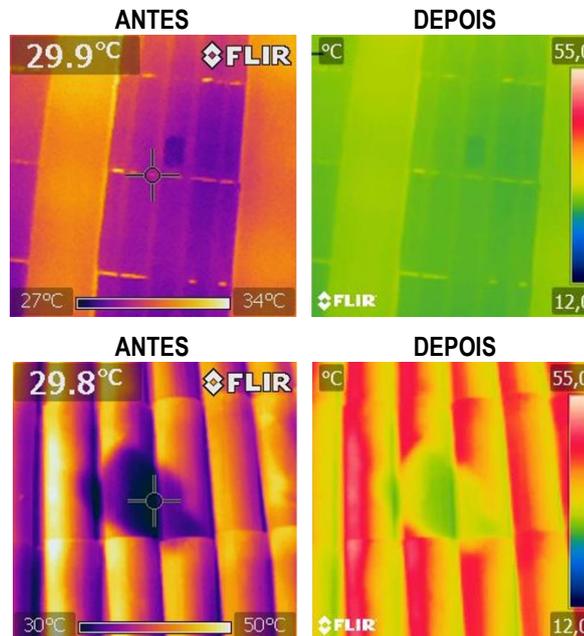
Fonte: SANTOS, 2006

As imagens termográficas geradas pelo equipamento foram tratadas para tornar possível a análise das temperaturas superficiais a partir de um valor médio calculado pelo FLIR Tools®³⁶, software vinculado ao equipamento. Ele permite criar relatórios, ajustes na paleta de cores, nos limites de temperatura e calcula valores médios, máximos e mínimos a partir de formas geométricas simples (ponto, reta, retângulo e círculo ou elipse) sobscritas na imagem. Para esta pesquisa, foi utilizada a paleta *rainbow*, com limites de temperatura definidos a partir

³⁶ Software freeware disponível no endereço eletrônico: <<https://prod.flir.com.br/products/flir-tools/>>.

dos valores máximos e mínimos encontrados sobrescrevendo uma forma retangular nas imagens termográficas externas e internas registradas. A Figura 48 mostra alguns registros termográficos antes e depois do tratamento das imagens para as análises desta pesquisa.

Figura 48 - Antes e depois do tratamento das imagens termográficas



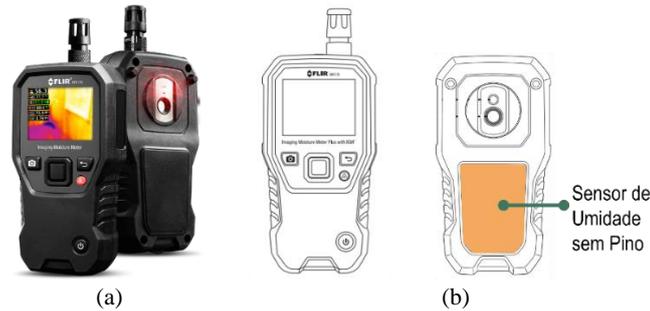
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.3 Umidade superficial

As variáveis incluídas nesse monitoramento foram umidade superficial externa ($U_{s.ex}$) e umidade superficial interna ($U_{s.in}$). A aferição foi não destrutiva e realizada com um medidor de umidade com imagem térmica e IGM™ (Tecnologia de Medição Guiada por Infravermelho) FLIR modelo MR176³⁷ da FLIR® Systems. Esse equipamento possui: sensor de umidade em sua estrutura, que permite uma leitura não invasiva da variável; sonda externa de umidade com pino; e sensores de temperatura e umidade relativa, fornecendo ponto de orvalho, pressão de vapor, temperatura do ar, umidade relativa e relação de mistura (FLIR, 2016). Foram utilizadas apenas medições com o sensor de umidade sem pino não invasivo localizado na parte posterior do equipamento. A Figura 49 ilustra o FLIR MR176, como também a localização do sensor externo de umidade. Já o Quadro 19 apresenta as informações técnicas do equipamento e do sensor de umidade utilizado.

³⁷ Equipamento pertencente ao Grupo de Estudos em Conforto Ambiental (GECA), cedido pela Prof^a. Dr^a. Juliana Oliveira Batista, do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas.

Figura 49 – Medidor de umidade FLIR® MR176



Fonte: Adaptado de FLIR, 2016

Quadro 19 - Alguns dados técnicos do medidor de umidade FLIR MR176

Dados gerais	Capacidade de armazenamento	9999 imagens
	Dimensões (C x L x A)	4,2 × 7,2 × 17,5 cm
	Formato de imagem armazenada	Bitmap (.bmp) com valores de medição sobrepostos
	Tela	Tela gráfica TFT em cores 64K QVGA (320 x 240 pixels) de 2,3"
	Temperatura de operação	0 ~ 50°C
	Temperatura de armazenamento	-10 ~ 60°C
	Umidade de operação	≤ 90%, 0 ~ 30°C
		≤ 75%, 30 ~ 40°C
	Umidade de armazenamento	≤ 45%, 40 ~ 50°C
		90% UR
Medidor de umidade interno sem pino	Medições com sensor interno sem pino	0 a 100 (leituras relativas)
	Resolução da medição	0,1
	Profundidade da medição	1,9 cm (máximo)

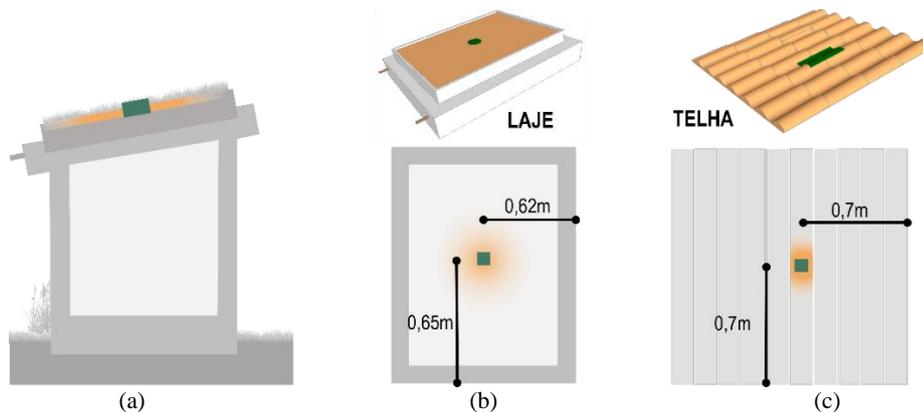
Fonte: FLIR, 2016

O sensor de umidade tem um alcance de aproximadamente 1,9cm, ou seja, ele detecta a umidade no material até essa profundidade, com leves variações a depender da quantidade de umidade, rugosidade e outros fatores. No modo “Somente Umidade” do equipamento, as leituras são mostradas na tela em números e graficamente (barras), e são “relativas” escaladas (0 a 100) (FLIR, 2016). Segundo orientações do fabricante, para realizar a aferição, o sensor de umidade, localizado na parte traseira do FLIR MR176, deve estar em contato com o material e uma leve pressão deve ser aplicada para garantir que o sensor fique completamente plano contra a superfície do material. A leitura irá aparecer na tela do equipamento.

As coletas de dados com esse equipamento foram realizadas manualmente a cada 1h em um intervalo de 24h, com início às 0h e término às 24h. Para as coberturas com laje impermeabilizada, o equipamento foi posicionado no centro da cobertura e pressionado contra ela, para aumentar a área de contato do sensor com o material. Quando a leitura se tornava estável, o valor era anotado em uma tabela. Na face interna dessas mesmas coberturas, os elementos (lajotas e vigotas) estavam expostos, devido à ausência de uma argamassa, então foi realizada uma

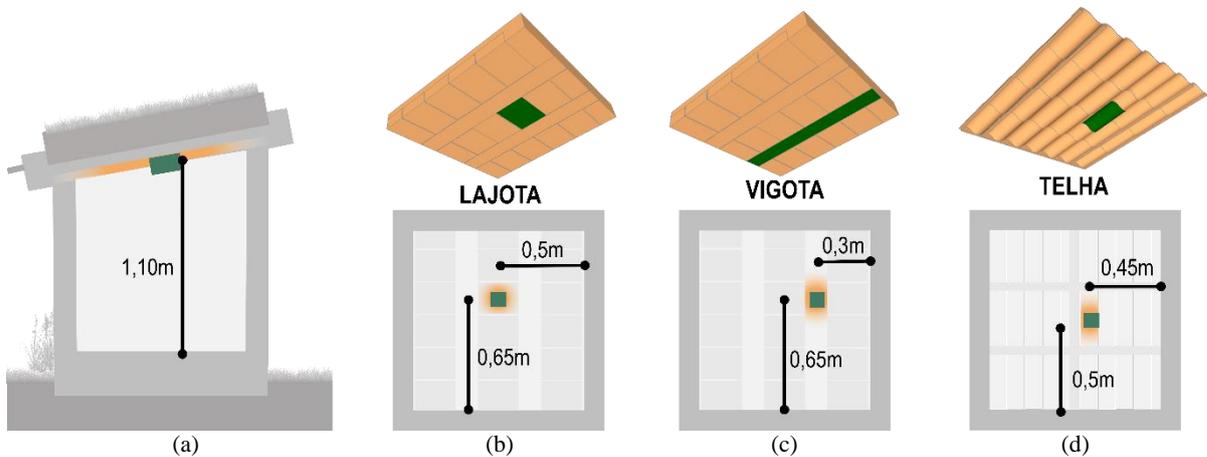
medição em cada elemento e a leitura anotada, para posteriormente ser calculado um valor médio ponderado para a $U_{s.in}$ era em função da área exposta de cada elemento na face interna da cobertura ($0,69m^2$ para lajota e $0,24m^2$ para vigota). Nos sistemas telha cerâmica (TC) e fibrocimento (FI), devido à superfície curva do elemento, o equipamento também foi posicionado lateralmente a fim de ocupar a maior área possível da telha, uma vez que o sensor é plano e não maleável. As Figuras 50 e 51 ilustram o posicionamento do equipamento para a leitura da umidade superficial externa ($U_{s.ex}$) e umidade superficial interna ($U_{s.in}$), respectivamente.

Figura 50 – Posicionamento e esquema volumétrico do medidor de umidade FLIR MR176 na face externa das coberturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 51 - Posicionamento e esquema volumétrico do medidor de umidade FLIR MR176 na face interna das coberturas



Fonte: Elaborado pelo autor

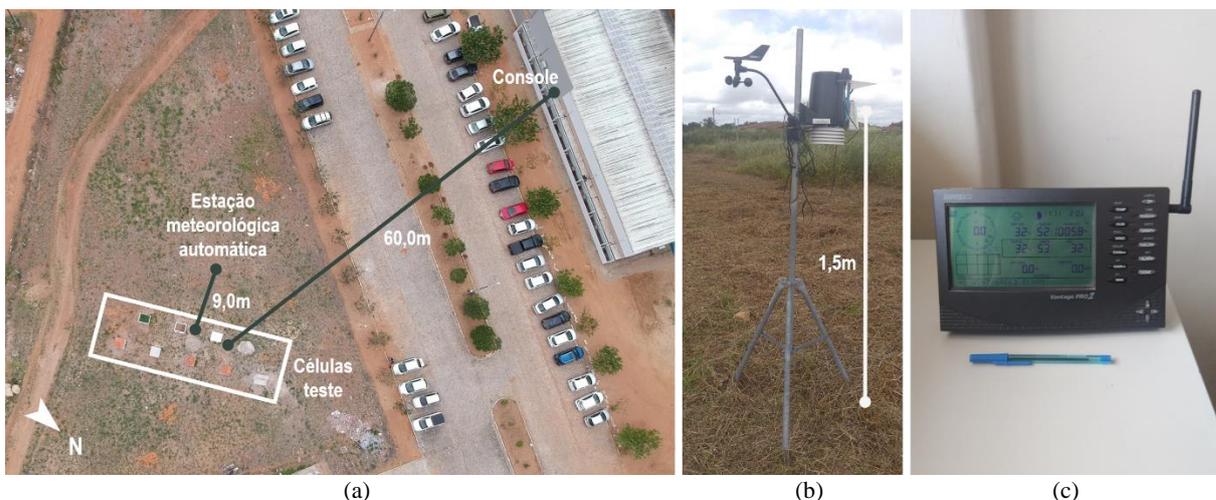
4.4 Monitoramento das variáveis climáticas

O monitoramento das variáveis climáticas do local do experimento ocorreu tanto de forma automática, utilizando uma estação meteorológica instalada no canteiro experimental, como manual, utilizando uma câmera fotográfica com lente olho de peixe.

Uma estação meteorológica automática realiza o monitoramento de dados a cada uma hora, coletando temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação acumulada, pressão barométrica, radiação solar, velocidade e direção dos ventos (PASSOS, 2009). Em Alagoas, o INMET possui sete (7) estações automáticas instaladas nas seguintes cidades: Arapiraca, Coruripe, Maceió, Palmeira dos Índios, Pão de Açúcar, Piranhas e São Luiz do Quitunde (SILVA, 2019). Para esta pesquisa foram utilizados dados de uma estação meteorológica automática instalada no canteiro experimental, com a finalidade de coletar dados específicos para o experimento, de seu microclima.

Utilizou-se uma estação Davis® Vantage Pro2™³⁸, um Conjunto de Sensores Integrados (ISS) modelo *wireless*, que possui coletor de chuva, sensores de temperatura, umidade e anemômetro em sua versão *standard*. A versão *plus* possui sensores de radiação solar e ultravioleta (UV) (AGROSYSTEM, 2004). Para este estudo, foi adicionado um sensor de radiação solar à versão *standard* do ISS por necessidade de monitorar essa variável para a pesquisa. O ISS *wireless* é alimentado por energia solar ou bateria, e envia os dados para um console via ondas de rádio de baixa intensidade, desde que o console esteja instalado em um raio de 300m (AGROSYSTEM, 2004). A Figura 52 apresenta a estação Davis® Vantage Pro2™ instalada a 1,5m do solo, distante 9,0m das células teste. O console foi posicionado em um ambiente distante 60,0m do ISS. Para a leitura dos dados, é necessário utilizar o *software WeatherLink*, que permite a emissão de boletins das condições climáticas, gráficos e exportação de dados com extensão *.csv*. No Quadro 20 estão algumas especificações do ISS *wireless*.

Figura 52 – (a) Localização da estação meteorológica e do console; (b) Estação Davis® Vantage Pro2™ instalada; (c) console instalado



Fonte: (a) Adaptado de VEIGA, 2018; (b) e (c) elaborado pelo autor

³⁸ Equipamento pertencente ao Grupo de Estudos em Atmosfera Climática Urbana (GATU), cedido pelo Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa, do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas.

Quadro 20 - Alguns dados técnicos do ISS wireless

Dados gerais	Faixa de temperatura	-40°C a 66°C
	Frequência de transmissão	915 – 928 MHz FHSS
Intervalos de atualização das variáveis do tempo	Velocidade do vento	2,5s a 3s
	Precipitação acumulada	10s a 12s
	Índice de chuva	10s a 12s
	Temperatura externa	10s a 12s
	Umidade externa	50s a 1min
	Radiação solar	50s a 1min

Fonte: AGROSYSTEM, 2004

O monitoramento climático com a estação Davis® Vantage Pro2™ incluiu as seguintes variáveis: temperatura média do ar externo ($T_{a.ex}$), umidade relativa do ar externo ($U_{a.ex}$), velocidade média do vento (V_m), radiação solar global (Rad) e pluviosidade (Plu), compilados em dados horários.

Além dos dados mencionados, uma lente olho de peixe foi acoplada a uma câmera fotográfica, permitindo o registro de uma imagem de toda a abóbada celeste, também chamada de fotografia hemisférica. Esse tipo de imagem é utilizado para o cálculo do Fator de Céu Visível (FCV). Neste estudo, as fotos hemisféricas foram utilizadas para verificar o comportamento da nebulosidade no dia de monitoramento. Para tanto, as imagens foram classificadas em céu claro, encoberto e céu parcialmente coberto ou intermediário, conforme as definições da NBR 15215-2 - Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural (ABNT, 2005). Utilizou-se uma câmera NIKON® modelo COOLPIX 4500 com lente NIKON FC-E8 *Fish-Eye*. Algumas informações técnicas desses equipamentos estão no Quadro 21.

Quadro 21 - Alguns dados técnicos da câmera com lente olho de peixe

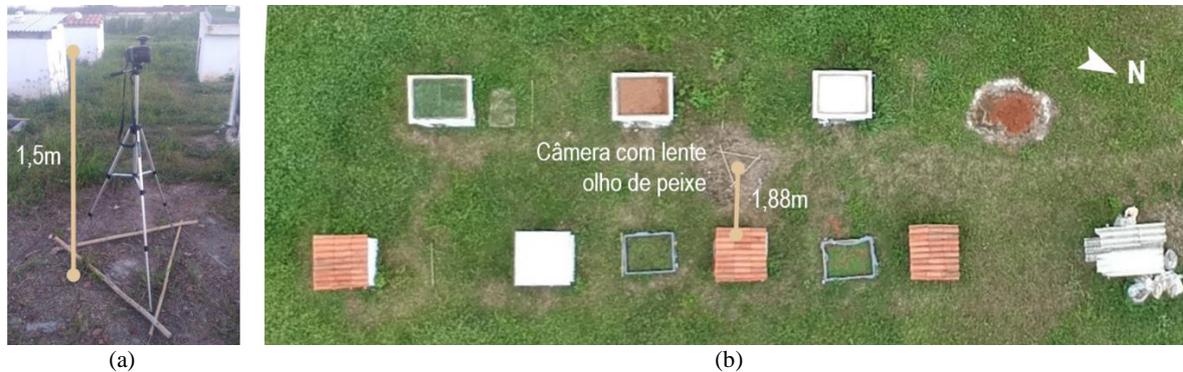
Câmera NIKON® COOLPIX 4500	Dimensões (C x L x A)	130 × 50 × 73 mm
	Tipo	E4500 (câmera digital)
	Tamanho da imagem (pixels)	2272 × 1704
		1600 × 1200
		1280 × 960
		1024 × 768
		640 × 480
	2560 × 1520	
Temperatura de operação	0 – 40°C	
Umidade de operação	Menos que 85% (sem condensação)	
Lente NIKON FC-E8 Fish-Eye	Ângulo de visão	183°
	Dimensões (\varnothing x A)	74 x 50 mm

Fonte: NIKON, 2019

Os registros fotográficos foram realizados manualmente a cada 1h em um intervalo de 12h, com início às 6h e término às 17h. O equipamento foi posicionando a 1,5m de altura, próximo às células teste, distante pelo menos 1,88m delas (Figura 53). Após cada fotografia, o

número da imagem foi anotado em uma tabela para posterior classificação do tipo de céu em cada horário das medições, para uma melhor compreensão dos dados de radiação solar.

Figura 53 – (a) Câmera com lente olho de peixe instalada; (b) Localização do equipamento no canteiro experimental

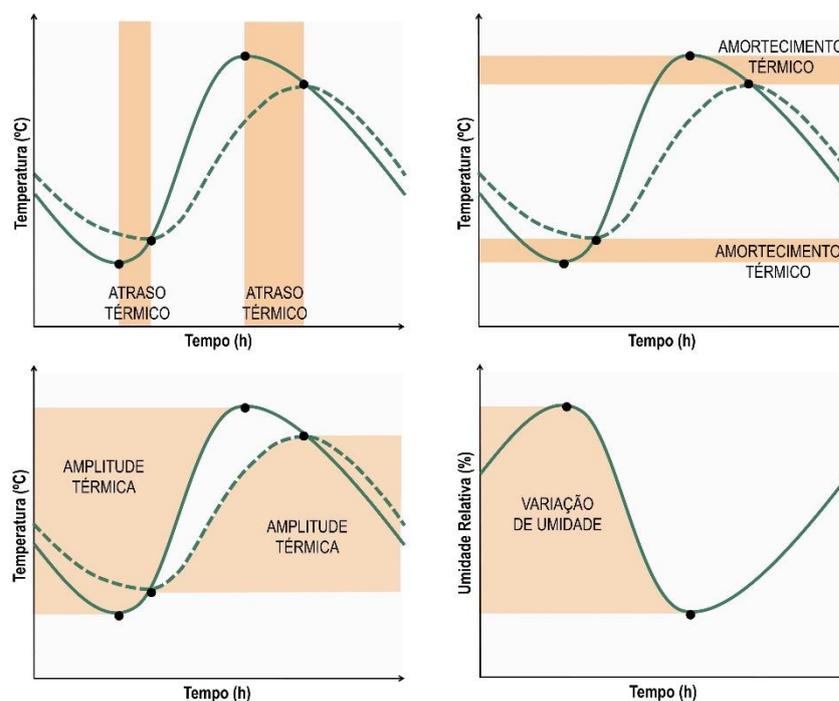


Fonte: (a) Elaborado pelo autor; (b) adaptado de VEIGA, 2019

4.5 Parâmetros de análise

Os dados de temperatura e umidade coletados foram comparados utilizando os parâmetros relativos à inércia térmica e ao resfriamento evaporativo, uma vez que são duas das estratégias bioclimáticas indicadas para a Arapiraca e ambas podem ser obtidas utilizando telhados verdes (PROJETEE, 2020). Os parâmetros foram atraso térmico, amplitude térmica, amortecimento térmico e variação de umidade. Eles podem ser visualizados no esquema gráfico da Figura 54.

Figura 54 - Gráficos esquemáticos dos parâmetros atraso, amplitude, amortecimento térmico e variação de umidade



Fonte: Adaptado de MORAIS, 2004 e FROTA, SCHIFFER, 2001.

O **atraso térmico** (φ) é medido em horas (h) e corresponde ao “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor” (ABNT, 2003a, p. 2). Por exemplo, “o tempo transcorrido entre o pico de temperatura máxima do ar externo e a temperatura máxima do ar em um ambiente interno” (BATISTA, LAMBERTS, 2010, p. 22). Ele depende do processo de transmissão de energia térmica, como a condutividade térmica, calor específico, densidade absoluta, espessura e capacidade térmica do componente construtivo e a ordem de disposição das camadas (ROSSETI, 2009). A **amplitude térmica** (ΔT) pode ser definida como a diferença entre os valores máximos e mínimos do comportamento diário da estrutura (BATISTA, LAMBERTS, CÂNDIDO, 2010). Já o **amortecimento térmico** (μ) é descrito por Moraes (2004) como a capacidade do fechamento em diminuir a amplitude das variações térmicas. A **variação de umidade** (ΔU) pode ser entendida como o comportamento da umidade relativa dentro das 24h, os picos e vales do gráfico. O desempenho mais adequado é aquele que evita o máximo de oscilações no sistema e, em consequência, no usuário.

Para efeito de comparação dos dados das variáveis climáticas externas monitoradas, os valores serão confrontados com as **médias mensais** encontradas por Silva (2019), que analisou a série climática histórica de Arapiraca dos últimos 10 anos (2009-2018) e com a **zona de conforto** para o dia de monitoramento³⁹, calculada a partir da temperatura média prevalente do ar no exterior (*Prevailing Mean Outdoor Air Temperature - T_{pmo}*) com 80% de limite de aceitabilidade segundo indicação da ASHRAE 55/2013⁴⁰ (ASHRAE, 2013).

4.6 Etapa 01 - Avaliação do desempenho térmico do telhado verde

Os cinco sistemas de cobertura utilizados para avaliar o desempenho térmico do sistema de telhado verde foram: cobertura com telha cerâmica (TC), telha de fibrocimento (FI), laje impermeabilizada sem a colocação de telhas (LI), laje impermeabilizada com solo nu (SO) e o telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj). A composição dessas coberturas está descrita na seção 4.2. As coberturas SO e TV-zj apresentam diferentes elementos adicionados à estrutura laje, a fim de avaliar a influência que cada um possui (solo e telhado verde), comparado à estrutura isolada (laje). Os sistemas TC e FI entram nessa análise por serem sistemas comuns da região e permitirem a comparação do comportamento do telhado verde com coberturas usuais.

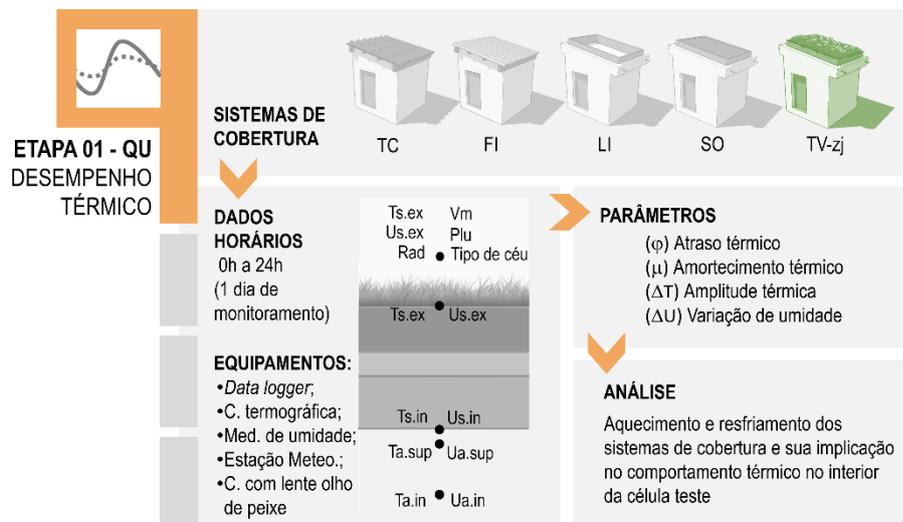
³⁹ O cálculo da temperatura média do ar externo predominante (T_{pmo}) e dos limites superiores e inferiores da zona de conforto para os dias monitorados é apresentado no Apêndice D.

⁴⁰ “A ASHRAE 55/2013 é uma norma americana que trata das ‘condições ambientais térmicas para ocupação humana’, em tradução livre, sendo elaborada pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*)” (NASCIMENTO, 2016, p. 29).

Para cumprir esse objetivo, os sistemas de cobertura foram monitorados em um dia no período quente e úmido. Nesse dia não houve a rega do telhado verde, para evitar a influência direta da umidade nas variáveis. Foram monitoradas $Ts.ex$, $Ts.in$, $Ta.sup$, $Ta.in$, $Us.ex$, $Us.in$, $Ua.sup$ e $Ua.in$ nas células teste, conforme procedimentos especificados na seção 4.3, e as variáveis ambientais $Ta.ex$, $Ua.ex$, Vm , Rad , Plu e tipo de céu, conforme procedimentos descritos na seção 4.4.

O roteiro de análise dos dados iniciou com o estudo do comportamento climático do dia de monitoramento, seguido da análise das temperaturas ($Ts.ex$, $Ts.in$, $Ta.sup$, $Ta.in$ e $Ta.ex$) e umidades ($Us.ex$, $Us.in$, $Ua.sup$, $Ua.in$ e $Ua.ex$) a partir de gráficos e tabelas gerados no *Microsoft Office Excel®*, utilizando como parâmetros de comparação o atraso térmico, o amortecimento térmico, a amplitude térmica e a variação de umidade, como descrito na seção 4.5, a fim de estudar o aquecimento e resfriamento dos sistemas de cobertura e sua implicação no comportamento térmico no interior da célula teste. A Figura 55 ilustra a Etapa 01 da pesquisa.

Figura 55 – Ilustração da Etapa 01 – Avaliação do desempenho térmico do telhado verde



Fonte: Elaborado pelo autor

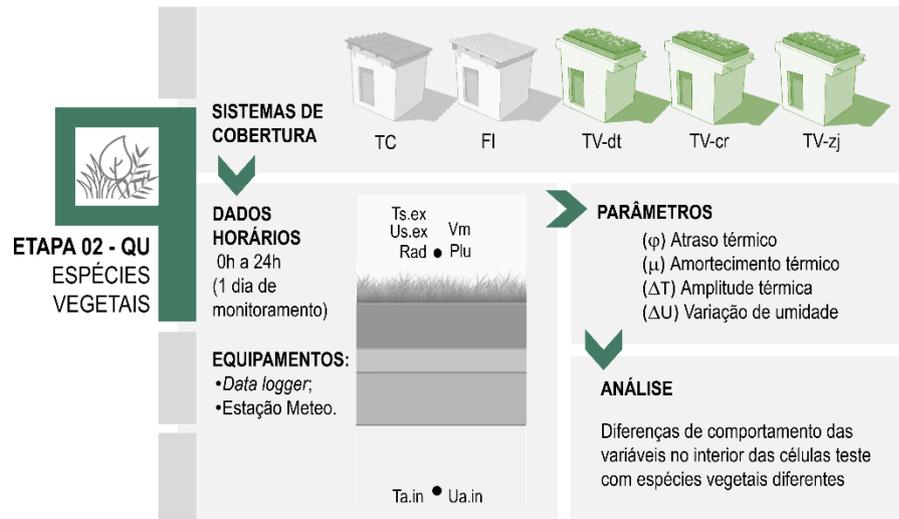
4.7 Etapa 02 - Avaliação da influência da espécie vegetal

Os cinco sistemas de cobertura usados para avaliar a influência da espécie vegetal no desempenho térmico do sistema de telhado verde foram: cobertura com telha cerâmica (TC), telha de fibrocimento (FI), telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj), telhado verde com *Calisia repens* (TV-cr) e o telhado verde com *Desmodium triflorum* (TV-dt). A composição dessas coberturas está descrita na seção 4.2. A principal diferença entre os sistemas de telhado verde é a variação da espécie vegetal, que permitiu encontrar dentre elas a que apresenta melhor comportamento térmico no período analisado.

Para atingir esse objetivo, o monitoramento dos sistemas ocorreu em um dia no período quente e úmido, estação mais favorável para o desenvolvimento da *Desmodium triflorum*, devido à sua sazonalidade. No dia monitorado não houve rega dos telhados verdes nem precipitação. Foram coletados dados de Ta.in e Ua.in nas células teste⁴¹, conforme procedimentos especificados na seção 4.3.1, como também do comportamento climático: Ta.ex, Ua.ex, Vm, Rad e Plu, conforme procedimentos descritos na seção 4.4.

Para análise dos dados, foi realizado o estudo do comportamento climático do dia de monitoramento, seguido da análise das temperaturas (Ta.in e Ta.ex) e umidades (Ua.in e Ua.ex) a partir de gráficos e tabelas gerados no *Microsoft Office Excel*®, utilizando como parâmetros comparativos o atraso térmico, o amortecimento térmico, a amplitude térmica e a variação de umidade, como descrito na seção 4.5, a fim de verificar as diferenças de comportamento entre as espécies vegetais utilizadas. De maneira ilustrada, a Etapa 02 esta representada na Figura 56.

Figura 56 – Ilustração da Etapa 02 – Avaliação da influência da espécie vegetal no desempenho térmico do telhado verde



Fonte: Elaborado pelo autor

4.8 Etapa 03 - Avaliação da influência da vegetação

Semelhante à etapa anterior, a Etapa 03 contou com cinco sistemas de cobertura para avaliar a influência da presença da vegetação no desempenho térmico do sistema de telhado verde. Foram eles: telha cerâmica (TC), telha de fibrocimento (FI), telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj), telhado verde com *Callisia repens* (TV-cr) e o sistema telhado verde sem cobertura vegetal (SV). A composição dessas coberturas está descrita na seção 4.2. A presença

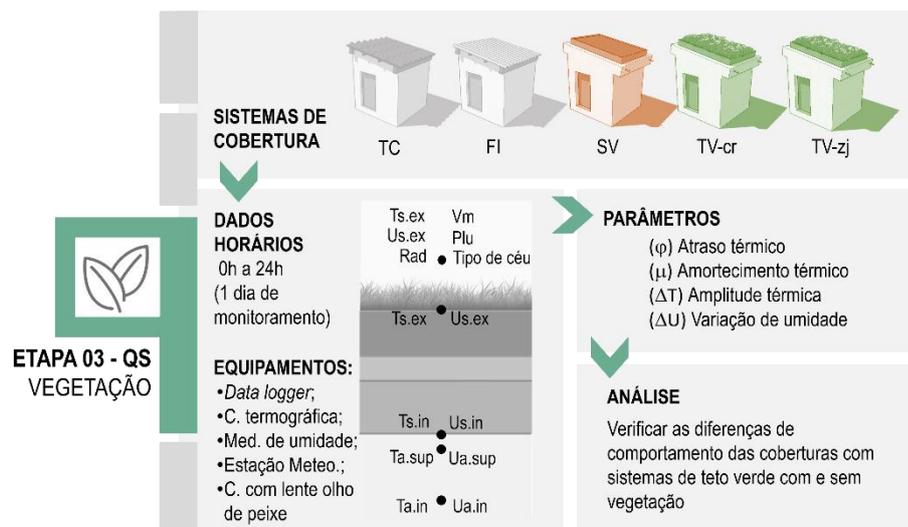
⁴¹ Nesta etapa não foi possível realizar o monitoramento da Ts.ex, Ts.in, Ta.sup, Us.ex, Us.in e Ua.sup, em virtude da necessidade de cobertura total do substrato pela vegetação na cobertura da célula teste com *Desmodium triflorum* (TV-dt) e a indisponibilidade do equipamento (câmera termográfica) para realizar a medição das temperaturas superficiais.

de dois telhados verdes com vegetações e um sem vegetação objetivaram estudar o comportamento conjunto dos elementos do telhado verde (drenagem, filtro e substrato) e o impacto que a adição da vegetação pode desempenhar no comportamento térmico do sistema⁴².

Para obter os resultados, o monitoramento dos sistemas ocorreu em um dia no início do período quente e seco, visto que as espécies ainda apresentaram bom crescimento na transição da estação úmida para a seca. Assim como nas etapas anteriores, no dia monitorado não houve rega dos telhados verdes nem precipitação, mas até o dia anterior ao monitoramento todos foram irrigados, inclusive o telhado verde sem vegetação (SV), a fim de tornar apenas a vegetação como variável entre três dos sistemas utilizados na análise (TV-zj, TV-cr e SV). Foram coletados dados de $Ts_{.ex}$, $Ts_{.in}$, $Ta_{.sup}$, $Ta_{.in}$, $Us_{.ex}$, $Us_{.in}$, $Ua_{.sup}$ e $Ua_{.in}$ nas células teste, conforme procedimentos especificados na seção 4.3, como também do comportamento do clima: $Ta_{.ex}$, $Ua_{.ex}$, Vm , Rad , Plu e tipo de céu, conforme procedimentos descritos na seção 4.4.

Os dados do comportamento climático do dia de monitoramento foram analisados inicialmente, seguidos da análise das temperaturas ($Ts_{.ex}$, $Ts_{.in}$, $Ta_{.sup}$, $Ta_{.in}$ e $Ta_{.ex}$) e umidades ($Us_{.ex}$, $Us_{.in}$, $Ua_{.sup}$, $Ua_{.in}$ e $Ua_{.ex}$) a partir de gráficos e tabelas gerados no *Microsoft Office Excel*®, utilizando como parâmetros comparativos o atraso térmico, o amortecimento térmico, a amplitude térmica e a variação de umidade, como descrito na seção 4.5, para verificar as diferenças de comportamento das coberturas com e sem vegetação. Essa etapa da pesquisa (Etapa 03) encontra-se ilustrada na Figura 57.

Figura 57 – Ilustração da Etapa 03 – Avaliação da influência da vegetação no desempenho térmico do telhado verde



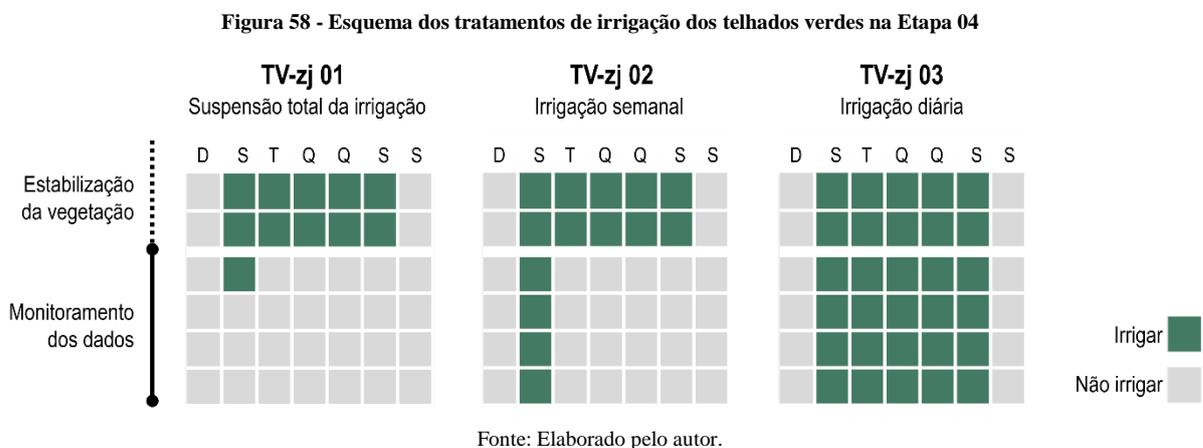
Fonte: Elaborado pelo autor

⁴² O telhado verde com *Desmodium triflorum* (TV-dt) não foi utilizado nessa análise pois a espécie não resistiu às condições climáticas do período em que a Etapa 03 foi realizada (novembro de 2019 – período quente e seco), devido a sazonalidade da espécie que proporciona melhor desenvolvimento no período chuvoso (quente e úmido).

4.9 Etapa 04 - Avaliação da influência da irrigação

Para avaliar a influência da irrigação no comportamento térmico do telhado verde, também foram utilizados cinco sistemas de cobertura: telha cerâmica tipo colonial capa e canal (TC), telha de fibrocimento (FI), e três sistemas de telhado verde com a espécie *Zoysia japonica* (grama-esmeralda), devido à sua rápida cobertura do solo (plantio a partir de tapetes pré-cultivados)⁴³. A composição dessas coberturas está descrita na seção 4.2.

Os três sistemas de telhado verde (TV-zj 01, TV-zj 02 e TV-zj 03) tiveram diferentes tratamentos de irrigação, ou seja, diferentes manutenções. Todas receberam irrigação diária até a estabilização das plantas (24 dias). Após esse período, o TV-zj 03 continuou a receber a rega normalmente enquanto que o TV-zj 02 foi irrigado semanalmente, em um intervalo de 7 (sete) dias, e o sistema TV-zj 01 teve a rega suspensa em sua totalidade, permitindo que dependa exclusivamente das variáveis ambientais e propriedades da planta. A Figura 58 ilustra esses tratamentos de irrigação. Pretende-se verificar se a vegetação irá cumprir seu papel no comportamento térmico do sistema de telhado verde mesmo em situações de pouca ou nenhuma precipitação, característica presente no clima semiárido da região, como apresentado por Silva (2019).



Chagolla-Aranda et. al. (2017) realizaram um estudo dos efeitos da irrigação em telhados verdes experimentais no clima semi-quente do México. O monitoramento dos dados foi realizado na estação seca, uma vez que a quantidade de água que precipitaria sobre as plantas

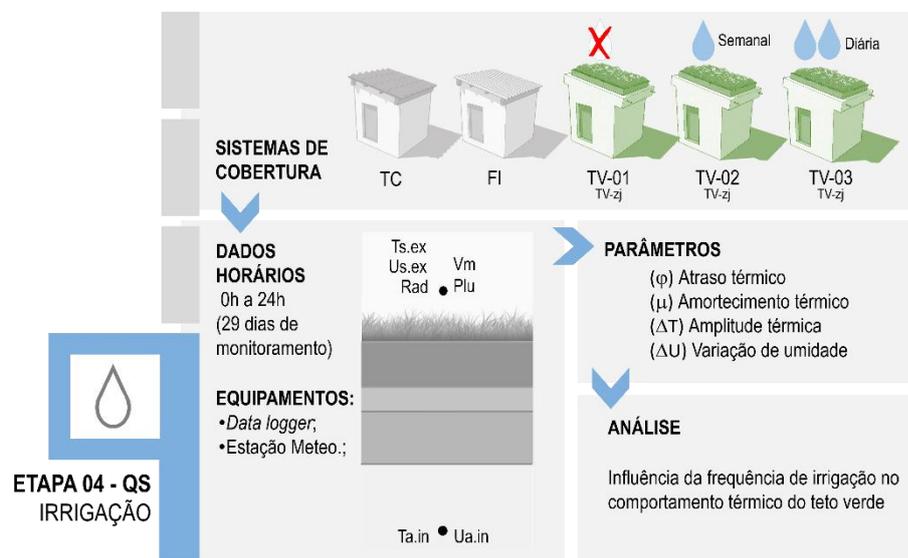
⁴³ Apesar da *Zoysia japonica* ser mais rápida na cobertura do solo, dentre as três espécies utilizadas nesta pesquisa (*Zoysia japonica*, *Callisia repens* e *Desmodium triflorum*), a espécie dinheiro-em-penca (*Callisia repens*) foi a que apresentou maior estabilidade de comportamento, ou seja, ela preservou sua coloração e aparência saudável por cerca de sete (7) dias sem rega nem precipitação, em comparação aos dois (2) dias que a grama-esmeralda (*Zoysia japonica*) resistiu sem receber água. Devido esse comportamento, inicialmente *Callisia repens* foi escolhida para ser a vegetação dos telhados verdes na análise de irrigação porém, após 30 dias de seu plantio, as plantas não se desenvolveram como esperado, não chegando a 60% de cobertura do substrato. Esse comportamento foi possivelmente influenciado pelas temperaturas mais elevadas e umidades relativas baixas do período quente e seco pois, no período quente e úmido, em um mesmo intervalo de dias, as mudas cobriram 100% da mesma área de substrato, condição necessária para considerar uma espécie estabelecida em um telhado verde segundo Farrell et. al. (2012). Dessa maneira, a espécie dinheiro-em-penca (*Callisia repens*) não alcançaria uma porcentagem de cobertura do solo adequada para a análise de irrigação, portanto a grama-esmeralda (*Zoysia japonica*) foi utilizada nessa etapa.

deveria ser controlada. Semelhante a esse estudo, a avaliação da influência da irrigação deste trabalho foi realizada apenas no período quente e seco.

Nas células teste foram monitoradas temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) e umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) conforme procedimentos especificados na seção 4.3.1. Foram coletados dados durante aproximadamente um mês e por isso, apenas as variáveis do ar foram monitoradas, uma vez que o equipamento registra automaticamente os valores, diferente da maioria das outras variáveis, que são coletadas manualmente. Além delas, foram monitoradas as seguintes variáveis climáticas: temperatura média do ar externo ($T_{a.ex}$), umidade relativa do ar externo ($U_{a.ex}$), velocidade média do vento (V_m), radiação solar global (Rad) e Pluviosidade (Plu), conforme procedimentos descritos na seção 4.4.

Na análise dos dados, primeiro foi realizado o estudo do comportamento climático de todo o monitoramento, seguido da análise das temperaturas ($T_{a.in}$ e $T_{a.ex}$) e umidades ($U_{a.in}$ e $U_{a.ex}$) a partir de gráficos e tabelas, utilizando como parâmetros o atraso térmico, amortecimento térmico, amplitude térmica e variação de umidade, como descrito na seção 4.5, para estudar a influência da frequência de irrigação no comportamento térmico do telhado verde. Essa etapa é apresentada na Figura 59 em formato ilustrado.

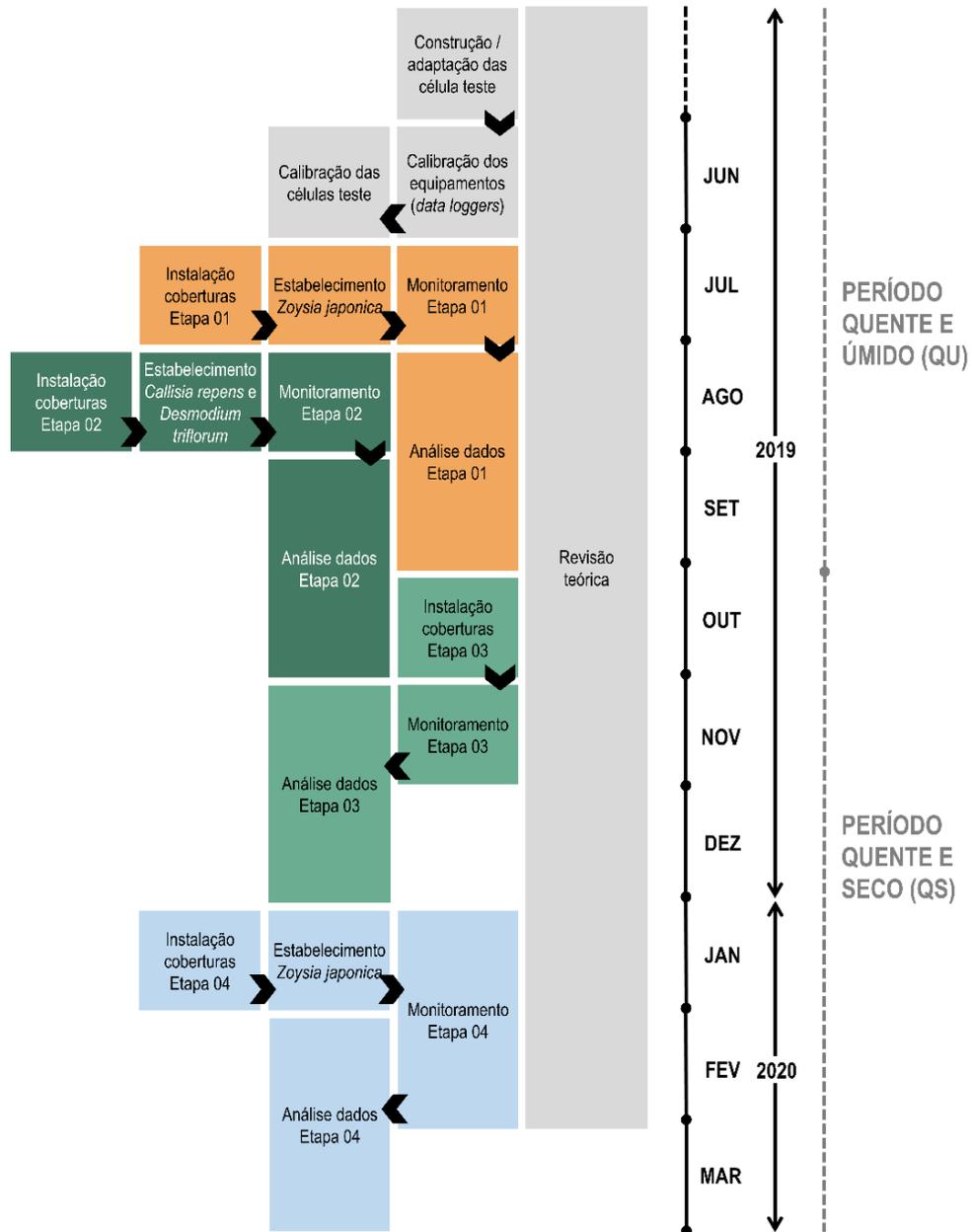
Figura 59 – Ilustração da Etapa 04 – Avaliação da influência da irrigação no desempenho térmico do telhado verde



Os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa são amplos, envolvendo muitas variáveis, equipamentos, sistemas de cobertura, etapas entre outros elementos, por isso eles foram organizados em uma ordem cronológica para tornar possível a obtenção dos resultados do estudo. A Figura 60 apresenta os procedimentos metodológicos situados em uma linha do

tempo, juntamente com outras atividades pertinentes da pesquisa, como calibração dos equipamentos, períodos de estabilização da vegetação etc. A análise dos valores encontrados será apresentada na próxima seção.

Figura 60 – Linha do tempo dos procedimentos metodológicos



Fonte: Elaborado pelo autor

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados serão apresentados seguindo a sequência: desempenho térmico (Etapa 01), influência da espécie vegetal (Etapa 02), da presença/ausência de vegetação (Etapa 03) e influência da frequência de irrigação (Etapa 04).

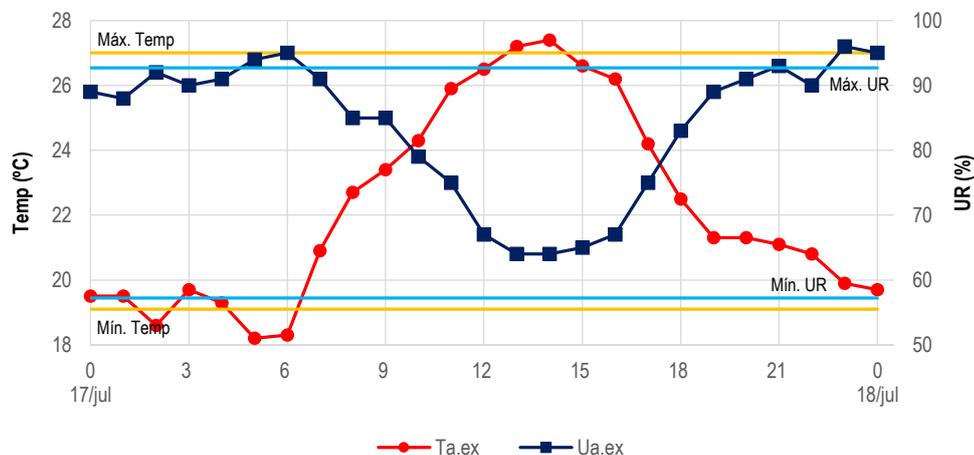
5.1 Etapa 01 - Desempenho térmico do telhado verde

Primeiro será relatado sobre as características do clima no dia de monitoramento, 17 de julho de 2019 (15 dias após o plantio da vegetação no TV-zj), selecionado por motivos de praticidade e logística para a coleta dos dados. Em seguida, serão abordados os resultados de temperatura e posteriormente umidade, utilizando a transmissão do calor do ambiente externo para o ambiente interno da célula teste como sequência de análise, ordem semelhante à utilizada por Parizotto e Lamberts (2011).

5.1.1 Comportamento climático

O comportamento da temperatura e umidade relativa do ar externo no dia 17 de julho de 2019 pode ser visualizado no gráfico da Figura 61. O dia pode ser considerado típico para o período quente e úmido da cidade. Nos horários 13h e 14h, a temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$) ficou acima da média das máximas temperaturas do ar para julho, atingindo $27,4^{\circ}\text{C}$ (14h), caracterizando um dia quente. A umidade relativa do ar externo ($U_{a.ex}$) também superou a média das máximas umidades relativas do ar nos horários 5h, 6h, 23h e 24h, chegando a 96% (23h), mas não ficou abaixo da média das mínimas UR de julho ($57,2\%$), evidenciando um dia úmido.

Figura 61 - Gráfico do comportamento da $T_{a.ex}$ e $U_{a.ex}$ no dia 17/07/2019 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de julho, de acordo com Silva (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor

O dia apresentou uma amplitude térmica de 9,2°C, 1,3°C maior que a amplitude média para o mês de julho e uma variação de umidade menor (3,5%) que a variação média das umidades relativas (Tabela 7).

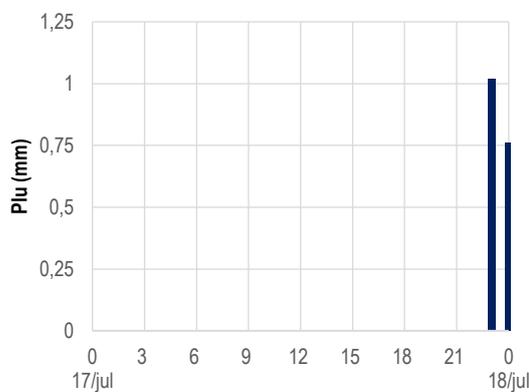
Tabela 7 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática no dia 17/07/2019

	17/07/2019		Média mensal - JUL SILVA(2019)	
	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)
Máxima	27,4	96,0	27,0	92,7
Mínima	18,2	64,0	19,1	57,2
Amplitude / Variação	9,2	32,0	7,9	35,5

Fonte: Elaborado pelo autor

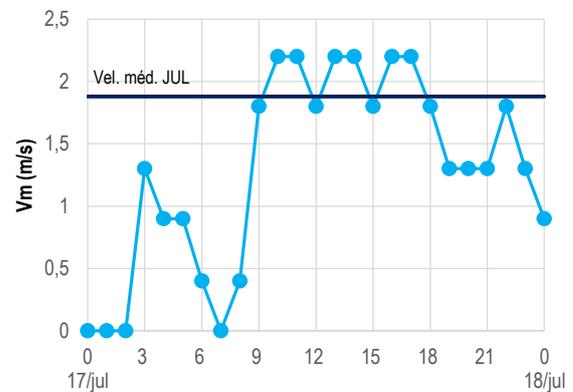
Durante a madrugada, manhã e tarde não houve precipitação, apenas no final da noite (23h e 0h) a estação meteorológica registrou 1,02mm e 0,76mm de pluviosidade, respectivamente (Figura 62). A ventilação apresentou uma velocidade média diária de 1,3m/s, com período de calmaria durante a madrugada e início da manhã. Não houve monitoramento da direção predominante da ventilação. No período entre 9h e 18h, a velocidade do ar esteve próxima da média para o mês de julho (1,88m/s), como apresenta a Figura 63.

Figura 62 - Gráfico do comportamento da pluviosidade no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

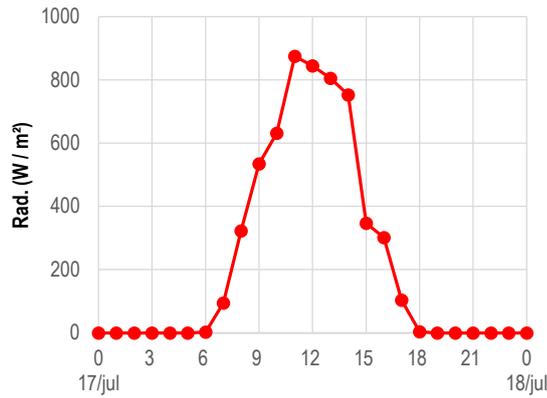
Figura 63 - Gráfico do comportamento da velocidade média do ar no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

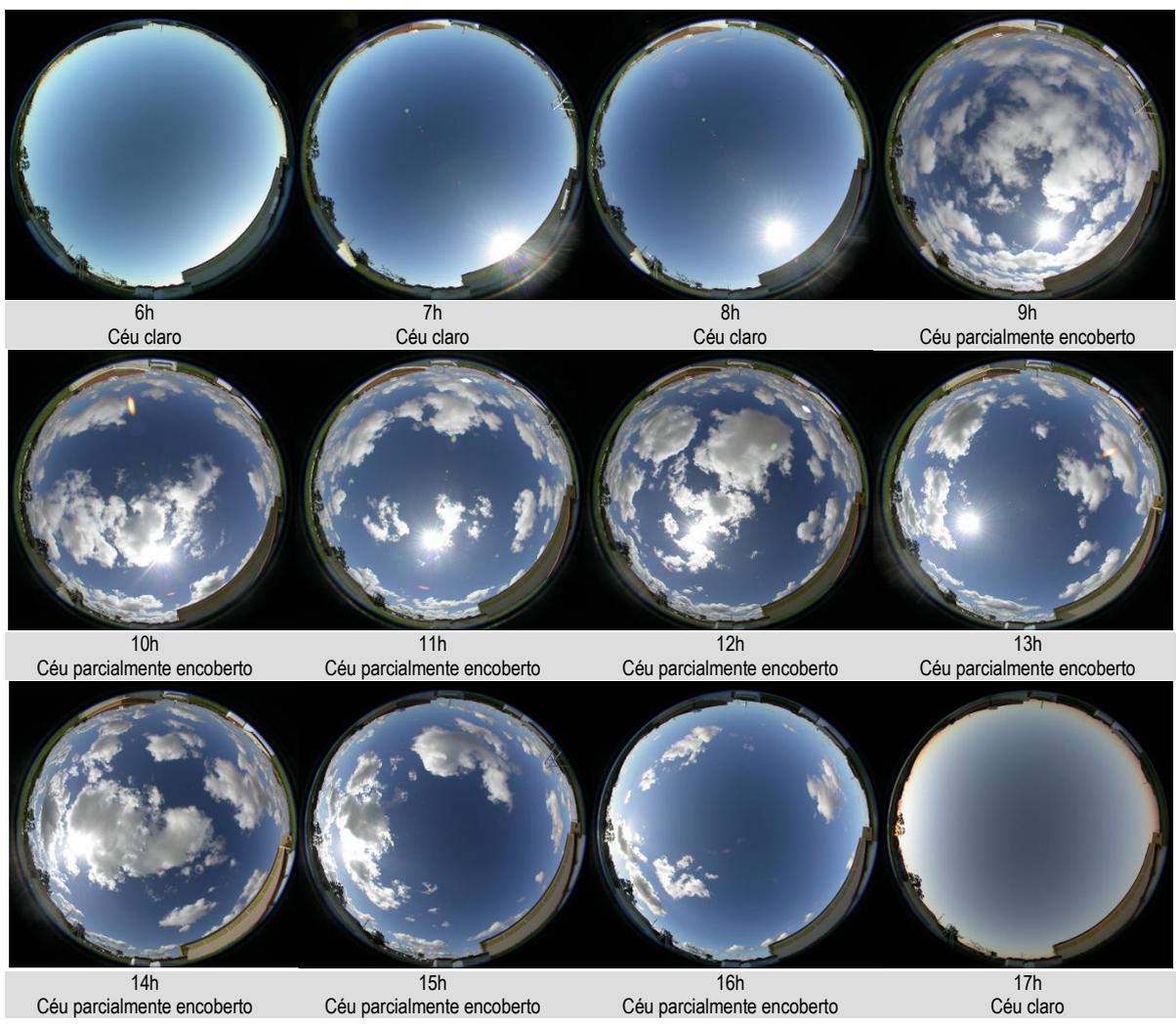
O comportamento da radiação solar não correspondeu a uma parábola perfeita no período diurno (6h às 18h), indicando a presença de nebulosidade, que pode ser comprovada com as fotos hemisféricas do céu. Durante a maior parte do dia, o céu permaneceu parcialmente encoberto, apenas no início da manhã (6h, 7h e 8h) e final da tarde (16h e 17h) o céu se apresentou claro. A Figura 64 mostra o comportamento gráfico da radiação solar global, com pico de 875,0W/m² às 11h, enquanto o Quadro 22 apresenta as imagens hemisféricas do céu em cada horário.

Figura 64 - Gráfico do comportamento da radiação solar global no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 22 – Classificação do tipo de céu e fotos hemisféricas da abóbada celeste das 6h às 17h

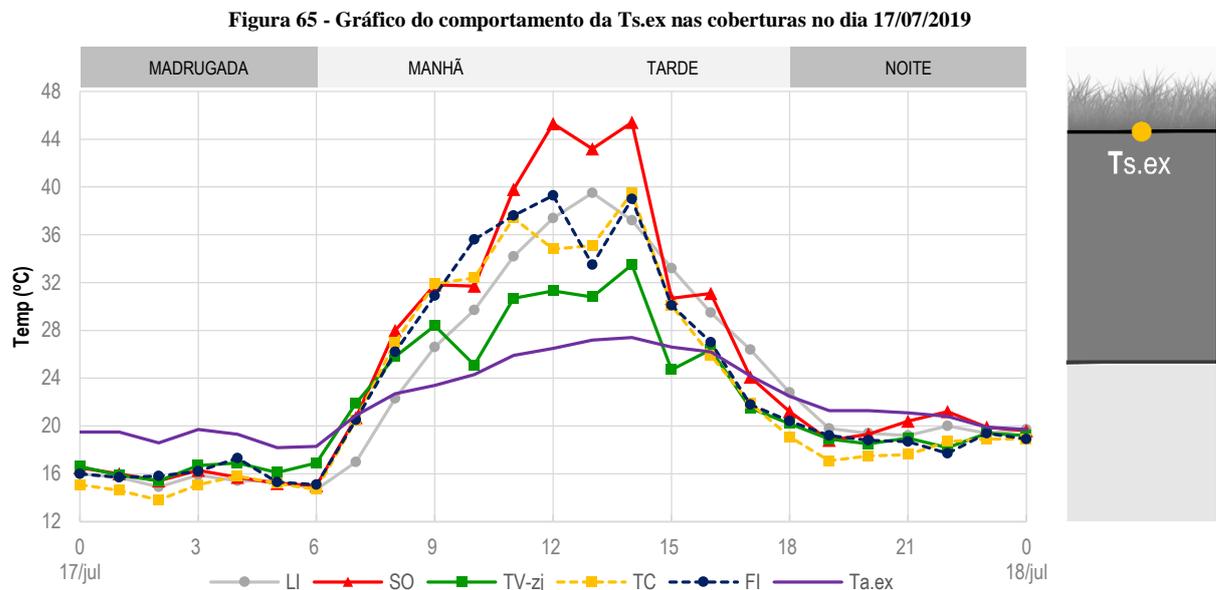


Fonte: Elaborado pelo autor

De maneira geral, o dia de monitoramento foi típico para o período quente e úmido, com precipitação apenas no final da noite, velocidade do ar dentro da média para o mês de julho e radiação solar próxima a $900,0\text{W/m}^2$, apesar de ser um dia com céu parcialmente encoberto.

5.1.2 Temperaturas (Ts.ex, Ts.in, Ta.sup e Ta.in)

Dentre as temperaturas monitoradas, a primeira a ser influenciada diretamente pela radiação solar é a **temperatura superficial externa** (Ts.ex). O gráfico da Figura 65 apresenta os valores horários médios da Ts.ex nos sistemas de cobertura⁴⁴. Durante a madrugada e noite, os cinco sistemas apresentam valores bastante próximos, mas no período de influência da radiação solar (6h às 18h) os valores monitorados foram bastante diferentes, indicando que eles possuem diferentes capacidades de absorver a radiação. O sistema laje impermeabilizada (LI - cor cinza) teve comportamento constante ascendente da temperatura entre 6h e 13h, e descendente das 17h às 19h, permanecendo em torno de 20°C após esse horário. As demais coberturas apresentaram comportamento semelhante a LI, porém com oscilações em alguns horários (às 10h e entre 13h e 16h).



Fonte: Elaborado pelo autor

A telha cerâmica (TC – cor amarelo) e a telha de fibrocimento (FI – cor azul) se comportaram de maneira semelhante, com diferenças máximas de 4,5°C (12h). As maiores Ts.ex (temperatura superficial externa) diurnas foram alcançadas pelo sistema com solo nu (SO – cor vermelho), 45,3°C às 12h e 14h, enquanto que as menores foram encontradas no telhado verde (TV-zj – cor verde), 24,7°C às 16h. O comportamento da Ts.ex sofre influência direta do albedo dos materiais, que está relacionado com a cor e o material da superfície. Pode-se caracterizar o sistema SO como uma superfície com solo natural exposto, sem cobertura vegetal, com um albedo de 0,20, segundo Assis, Sirqueira e Bamberg (2013). Para superfícies vegetadas, onde o

⁴⁴ No Apêndice E estão todos os registros termográficos das coberturas para todos os horários em que os sistemas foram monitorados (0h do dia 17/07/2019 à 0h do dia 18/07/2019)

TV-zj pode se enquadrar, Oke (1987) *apud* Parizotto e Lamberts (2011) indica um albedo de 0,25. Apesar disso, a diferença desse parâmetro (albedo) entre as duas coberturas ainda é pequena. Então, a explicação para essa grande diferença de comportamento pode ter origem na quantidade de umidade na cobertura com telhado verde e pelos processos de evapotranspiração e fotossíntese das plantas (PARIZOTTO, LAMBERTS, 2011). Essas trocas de calor entre a vegetação e a atmosfera permitiram que boa parte da radiação solar fosse utilizada pelas plantas ao invés de aquecerem a cobertura, diferente do que aconteceu no sistema com solo nu (SO), sem a cobertura vegetal. Fitchett, Govender e Vallabh (2019) encontraram resultados semelhantes, nos quais a temperatura na superfície com solo exposto chegou a 41,06°C e no telhado verde atingiu apenas 28,08°C. Ainda sobre o albedo, possivelmente ele tenha sido o principal elemento que permitiu a laje impermeabilizada (LI) não apresentar temperaturas superficiais externas muito elevadas, pois a cor branca (albedo entre 0,50 e 0,90 segundo Nogueira (2011)) permitiu que boa parte da radiação solar que incidiu na cobertura fosse refletida.

Quanto às amplitudes térmicas, LI, TC e FI apresentaram variações entre a Ts.ex máxima e mínima em torno de 25°C. Enquanto que SO e TV-zj obtiveram 30,3°C e 18,1°C de amplitude térmica, respectivamente, como mostra a Tabela 8. A máxima variação da temperatura superficial externa no telhado verde encontrada por Parizotto e Lamberts (2011) no clima temperado de Florianópolis foi de 17,7°C, enquanto que a telha cerâmica e o telhado metálico, coberturas estudadas pelos autores, alcançaram 37,2°C e 32,6°C, respectivamente (2,3°C maior que os valores os valores máximos da Ts.ex no solo nu encontrados neste trabalho).

Tabela 8 - Ts.ex máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 17/07/2019

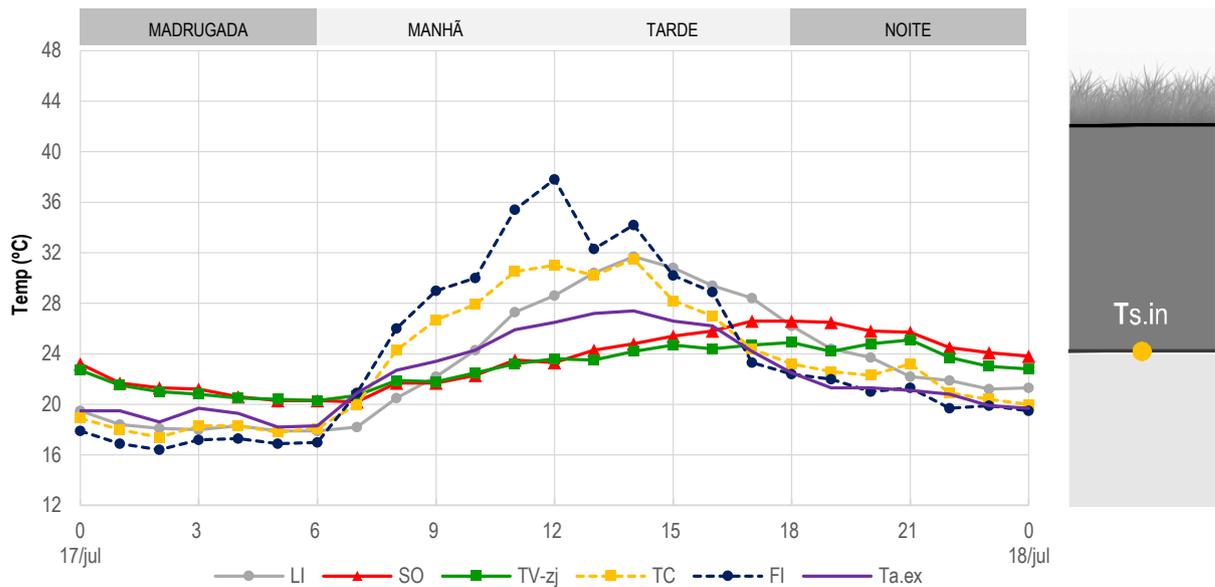
Ts.ex	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)
LI	39,5	14,7	24,8
SO	45,3	15,0	30,3
TV-zj	33,5	15,4	18,1
TC	39,5	13,8	25,7
FI	39,3	15,1	24,2
Ta.ex	27,4	18,2	9,2

Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico dos valores médios da **temperatura superficial interna** (Ts.in) apresentado na Figura 66 evidencia um comportamento diferente do encontrado na temperatura superficial externa (Ts.ex). Nele os sistemas solo nu (SO – cor vermelho) e telhado verde (TV-zj – cor verde) possuem valores bastante próximos entre si durante a madrugada, com temperaturas

maiores cerca de 2 a 3°C que os demais sistemas, efeito da massa térmica. No período diurno (manhã e tarde), esse comportamento se repete até às 12h; Solo nu (SO) apresentou valores ligeiramente maiores que o TV-zj (telhado verde), atingindo maior diferença às 19h (2,3°C), comportamento semelhante ao encontrado por Fitchett, Govender e Vallabh (2019). Esse desempenho similar dessas duas coberturas pode ser explicado pelos valores próximos de transmitância térmica dos sistemas, 0,97W/(m²K) para SO e 0,96W/(m²K) para o telhado verde.

Figura 66 - Gráfico do comportamento da Ts.in nas coberturas no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Telha cerâmica (TC – cor amarelo) e fibrocimento (FI – cor azul), assim como na Ts.ex, têm comportamento semelhante, porém, na temperatura superficial interna (Ts.in), o sistema FI se destaca como o menos aquecido nos períodos madrugada e noite, e com temperaturas mais elevadas durante manhã e tarde. Apesar de possuírem valores de transmitância térmica próximos (TC – 4,55W/(m²K) e FI – 4,60W/(m²K)), a telha cerâmica apresenta uma capacidade térmica maior que a telha de fibrocimento (18 kJ/(m²K) e 11 kJ/(m²K), respectivamente), além do próprio material constituinte (argila e cimento) que explicam o rápido e alto aquecimento e resfriamento do sistema FI em comparação aos demais, acompanhado do sistema TC que apresenta características semelhantes, mas como menor magnitude.

No período noturno (madrugada e noite), o comportamento dos cinco sistemas de coberturas são distintos, permitindo destacar o solo nu (SO – cor vermelho) como o mais aquecido, seguido pelo TV-zj, LI, TC e FI, pois é o sistema que possui mais massa térmica, em consequência, acumula uma maior quantidade de calor que, por inércia térmica, é transmitido para o ambiente interno com atraso térmico. É importante destacar ainda a influência que a

adição de uma camada de solo natural (SO) ou as camadas do sistema de telhado verde (TV-zj) tiveram no comportamento da temperatura superficial interna (Ts.in), quando essas duas coberturas são comparadas à laje impermeabilizada (LI). Esses elementos, principalmente a camada de solo, permitiram uma redução de pelo menos 5,1°C da Ts.in máxima registrada na cobertura LI, além de uma diferença de, no mínimo, 3h entre a ocorrência dos picos de Ts.in. Samayoa, Martínez e Nolasco (2015a) encontraram uma diferença semelhante: 5,91°C nessa variável com a adição dos elementos do telhado verde sobre um telhado de concreto armado na cidade de Tuxtla Gutiérrez, México (clima quente subúmido). Segundo os autores, o concreto é um material de maior densidade e alta condutividade, acumulando mais calor.

Outro ponto que merece destaque é o comportamento durante a madrugada do SO e TV-zj, pois eles são os únicos que se apresentam pelo menos 1,1°C mais aquecidos que a temperatura do ar externo (Ta.ex), desempenho desejável para o período quente e úmido. Fitchett, Govender e Vallabh (2019) encontraram, para a cidade de Johannesburgo (África do Sul), valores de temperatura superficial interna mais favoráveis para o conforto humano, em coberturas com solo exposto, sem vegetação, que no telhado verde.

Na Tabela 9 estão calculados as amplitudes térmicas da variável Ts.in (temperatura superficial interna).

Tabela 9 - Ts.in máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 17/07/2019

Ts.in	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)
LI	31,7	17,9	13,8
SO	26,6	20,2	6,4
TV-zj	25,1	20,3	4,8
TC	31,5	17,4	14,1
FI	37,8	16,4	21,4
Ta.ex	27,4	18,2	9,2

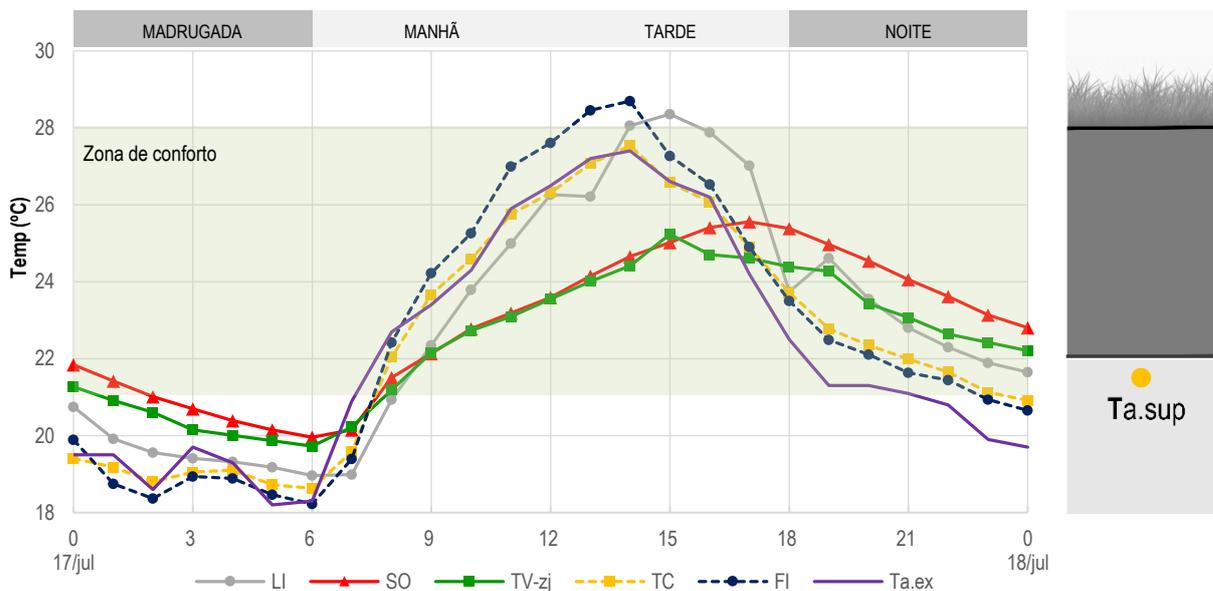
Fonte: Elaborado pelo autor

O telhado verde (TV-zj) apresentou a menor amplitude térmica (4,8°C) dentre os cinco sistemas, chegando a ser 4,4°C menor que a amplitude da temperatura do ar externo (Ta.ex) e 16,2°C menor que a maior variação entre mínimas e máximas ocorrida na telha de fibrocimento (FI - 21,4°C). Lopes (2007) encontrou uma diferença de quase 30,0°C em seu estudo experimental na cidade de São Carlos, São Paulo. Tanto as propriedades térmicas dos materiais como a espessura da cobertura levaram a telha de fibrocimento a ganhar e perder calor rapidamente, ao mesmo tempo que o telhado verde armazenou e transmitiu uma menor quantidade de energia

térmica devido à presença de massa térmica na cobertura. Além de parte da radiação solar que atinge o telhado verde ser utilizada nos processos de fotossíntese e evapotranspiração (PARI-ZOTTO, LAMBERTS, 2011).

A **temperatura do ar próximo à superfície interna** ($T_{a.sup}$) representa o efeito inicial da temperatura superficial interna ($T_{s.in}$) no comportamento da temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) e por isso seus valores apresentam características tanto da temperatura superficial como da temperatura do ar. No gráfico da Figura 67⁴⁵, é possível perceber que a telha cerâmica (TC) e de fibrocimento (FI) possuem valores próximos durante os períodos madrugada e noite, e uma elevação da $T_{a.sup}$ no sistema FI no período diurno, assim como na variável anterior, resultado das propriedades dos materiais constituintes das telhas e da menor capacidade térmica da telha de fibrocimento (FI - 11,0 KJ/(m²K) e TC - 18,0 KJ/(m²K)). Para efeito de comparação dos dados monitorados, está destacada no gráfico (tarja na cor verde) a zona de conforto para o dia 17/07/2019⁴⁶.

Figura 67 - Gráfico do comportamento da $T_{a.sup}$ nas células teste no dia 17/07/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado



Fonte: Elaborado pelo autor

De maneira geral, o telhado verde (TV-zj) apresentou valores menores que a cobertura com solo nu (SO) nas medições, com exceção do período entre às 6h e 15h, em que ambos se comportaram semelhantes, assim como na variável $T_{s.in}$. Os dois sistemas não apresentaram diferenças significativas nesse período (diferenças menores que 0,32°C, em que a precisão do

⁴⁵ O valor da $T_{a.sup}$ do telhado verde (TV-zj, cor verde) às 8h (21,2°C) foi interpolado a partir dos valores registrados às 7h (20,2°C) e 9h (22,1°C), devido à queda do equipamento do teto da célula com telhado verde. Apenas o dado desse horário foi interpolado pois o *data logger* foi recolocado em tempo hábil para monitorar a próxima $T_{a.sup}$ de corretamente.

⁴⁶ Ver Zona de Conforto para o dia 17/07/2019 no Apêndice D

equipamento é 0,21°C), mostrando que são semelhantes nos horários de maior radiação solar (11, 12, 13 e 14h), nos quais as propriedades das camadas de drenagem, substrato e vegetação no TV-zj são compensadas pela massa térmica no SO. Diferenças de até 1,0°C entre eles só ocorrem quando o calor acumulado na cobertura é emitido por radiação para o ambiente interno, ou seja, no período noturno. Valores próximos entre essas coberturas também foram encontrados por Fitchett, Govender e Vallabh (2019). A partir das 15h, enquanto o SO continua a aquecer até atingir seu pico às 17h (25,5°C), o TV-zj começa a resfriar, permanecendo menos aquecido durante todo o período noturno, efeito já observado no comportamento da temperatura superficial interna, originado no grande acúmulo de calor no período diurno.

Laje impermeabilizada (LI) e telha de fibrocimento (FI) são as coberturas que apresentaram os maiores valores da Ta.sup (temperatura do ar próximo a superfície interna), chegando à 28,3°C e 28,7°C, respectivamente. Esses sistemas foram também os únicos que superaram os 28,04°C, temperatura limite superior da zona de conforto (tarja na cor verde). Esses limites se referem aos valores máximos e mínimos da temperatura operativa do ambiente interno, calculados a partir da temperatura média prevalente do ar no exterior (Tpmo) utilizando 80% como limite de aceitabilidade, conforme indica a ASHRAE 55/2013. A Tabela 10⁴⁷ destaca o resultado dos parâmetros da temperatura do ar próximo à superfície interna (Ta.sup).

Tabela 10 - Ta.sup máxima, Ta.sup mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 17/07/2019

Ta.sup	Ta.sup		ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
LI	28,3	18,9	9,4	0,9	0,7	1	1
SO	25,5	19,9	5,6	-1,9	1,7	3	1
TV-zj	25,2	19,7	5,5	-2,2	1,5	1	1
TC	27,5	18,6	8,9	-0,1	0,4	0	1
FI	28,7	18,2	10,5	1,3	0,0	0	1
Ta.ex	27,4	18,2	9,2	-	-	-	-

Fonte - Elaborado pelo autor

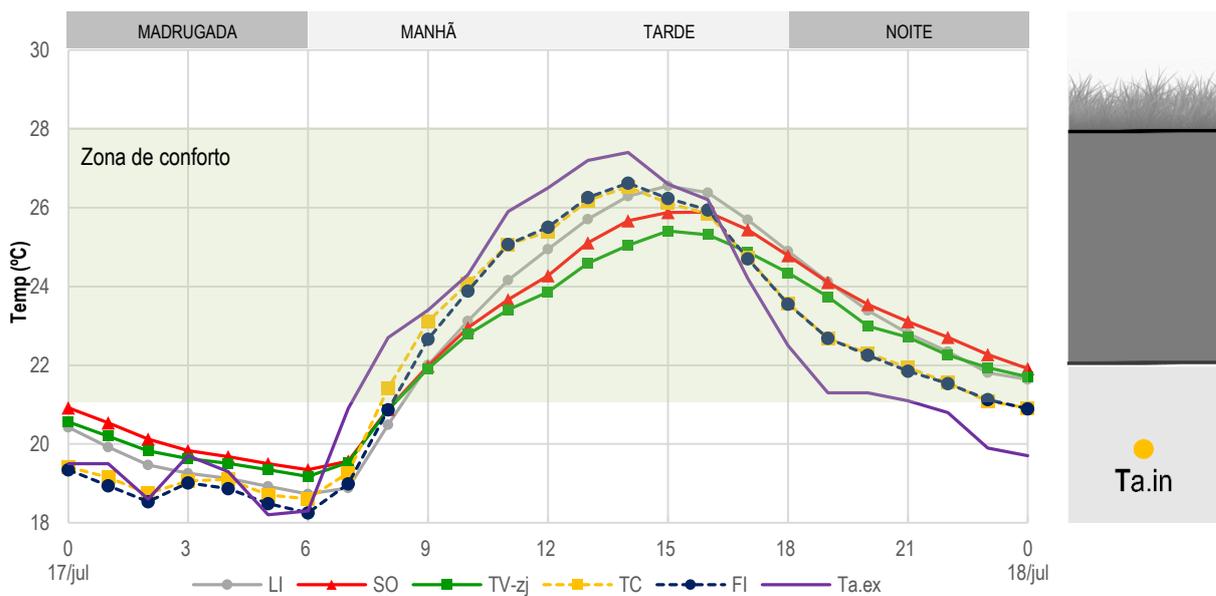
A cobertura com telhado verde (TV-zj) apresentou a menor amplitude térmica (5,5°C) e o maior amortecimento térmico das máximas (redução de 2,2°C), seguida do solo nu (SO), que promoveu o maior atraso da Ta.sup máxima (3h). Ambas foram as únicas coberturas que tiveram a oscilação entre Ta.sup máxima e mínima menor que a variação da temperatura do ar externo (Ta.ex - $\Delta T=9,2^\circ\text{C}$). A maior amplitude, o menor amortecimento e menor atraso térmico

⁴⁷ Nos dados de amortecimento térmico o sinal negativo (-) indica que os valores internos da temperatura do ar foram menores que os valores externos, enquanto que o valor positivo (+) é resultado de uma temperatura do ar interno maior que a temperatura do ar externo.

ocorreram na cobertura com telha de fibrocimento ($\Delta T=10,5^{\circ}\text{C}$; $\mu=1,3^{\circ}\text{C}$; $\varphi=0\text{h}$). A diferença entre a menor amplitude (TV-zj) e a maior (FI) foi de $5,0^{\circ}\text{C}$, maior que a diferença máxima ($3,1^{\circ}\text{C}$) encontrada por Mattos (2015) entre um telhado verde com *Aloe Vera* e a telha cerâmica na cidade de Caruaru, Pernambuco.

No desempenho da **temperatura do ar interno** ($T_{a.in}$) durante o período monitorado (Figura 68), pode-se agrupar as células teste em coberturas com telhas (TC e FI) e com laje (LI, SO e TV-zj) pois os comportamentos gráficos foram distintos. Os sistemas com telhas apresentaram valores bastante próximos entre si, chegando a coincidir nos horários 11h e 19h. Durante madrugada e noite, as células teste com laje se apresentaram mais aquecidas internamente que as células com telhas, principalmente o telhado verde (TV-zj) e o solo nu (SO), chegando a uma diferença máxima de $1,6^{\circ}\text{C}$ às 0h (SO e FI), influência dos efeitos da massa térmica e inércia térmica dessas coberturas.

Figura 68 - Gráfico do comportamento da $T_{a.in}$ nas células teste no dia 17/07/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado



Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores monitorados nas coberturas com telha cerâmica (TC) e fibrocimento (FI) se mostraram bastante influenciados pelos valores da temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$), uma vez que oscilaram da mesma maneira e foram próximos, reflexo da baixa espessura dos sistemas, que os tornam mais suscetíveis às variações ambientais externas. Apesar disso, a temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) na TC atingiu uma diferença de $0,55^{\circ}\text{C}$ (8h) da cobertura FI, o que pode ser explicado pela formação de um “colchão de ar” entre as telhas cerâmicas, próprio do posicionamento delas na cobertura, que funciona como isolante térmico. No período diurno, das 7h às 15h, todas as temperaturas do ar internas nas células teste ficaram abaixo dos valores externos

(Ta.ex) e o menor aquecimento foi observado na célula com telhado verde, seguido com proximidade do sistema com solo nu, atingindo uma diferença de 2,6°C (12h) e 2,2°C (11h e 12h) dos valores externos, respectivamente. No TV-zj a temperatura do ar chegou a ficar 1,1°C menor que na TC, valor próximo da faixa de 0,5-1,0°C encontrada por Parizotto Filho (2011). Esse comportamento é consequência das propriedades térmicas da cobertura, já que telhado verde e solo nu possuem valores próximos de transmitância térmica e apresentaram esse mesmo comportamento (menores valores diurnos e proximidade) nas temperaturas internas analisadas (Ts.in, Ta.sup).

Embora o sistema com laje impermeabilizada (LI) apresente padrão gráfico semelhante ao TV-zj e SO, os valores da Ta.in nessa cobertura chegam a ser 1,25°C (14h) maiores que os registrados no telhado verde, mostrando que, apesar de possuir um albedo maior que o telhado verde, a ausência de massa térmica permitiu que a temperatura do ar interno fosse aproximadamente igual aos valores encontrados dessa variável nas coberturas com telhas (TC e FI).

Com relação à zona de conforto para esse dia monitorado, apenas entre 0h e 8h todas as coberturas se apresentaram abaixo do limite inferior de conforto, nos demais horários todas permaneceram dentro da zona. Apesar disso, vale destacar que telhado verde e solo nu são os sistemas que tiveram comportamento mais desejável para o período quente e úmido, pois apresentaram Ta.in menores durante o dia, e maiores que os demais durante a noite.

Quanto aos parâmetros calculados, os resultados são semelhantes aos encontrados na análise da temperatura do ar próximo a superfície (Ta.sup), pois são variáveis do ar e o volume do ambiente é pequeno (aproximadamente 1,0m³). SO e TV-zj apresentaram as menores máximas (25,8°C e 25,4°C), maiores mínimas (19,3°C e 19,2°C), menores amplitudes (6,5°C e 6,2°C), maiores amortecimentos, tanto para as máximas (1,6°C e 2,0 °C) como para as mínimas (1,1°C e 1,0°C) e maiores atrasos (2 e 1h) em relação aos demais sistemas de cobertura estudados (Tabela 11). Um aspecto interessante está relacionado à laje impermeabilizada (LI), que apresentou parâmetros com resultados mais próximos às coberturas TC e FI, do que a SO e TV-zj, apesar de ser próxima estruturalmente dos sistemas como solo nu e telhado verde. Lopes (2007) encontrou esse comportamento ainda mais expressivo, pois a laje utilizada pela autora permitiu que a amplitude térmica nessa cobertura fosse maior 0,6°C que a registrada na telha de fibrocimento, o dobro do valor encontrado neste estudo, em que FI teve o maior valor de amplitude da Ta.in. Isso mostra a necessidade da adição de massa térmica para que a laje impermeabilizada proporcione efeitos térmicos benéficos para o ambiente interno. Caso não ocorra, o desconforto será semelhante à utilização da telha cerâmica ou fibrocimento.

Tabela 11 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 17/07/2019

Ta.in	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
				Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
LI	26,5	18,7	7,8	-0,9	0,5	1	1
SO	25,8	19,3	6,5	-1,6	1,1	2	1
TV-zj	25,4	19,2	6,2	-2,0	1,0	1	1
TC	26,5	18,6	8,1	-0,9	0,4	0	1
FI	26,6	18,2	8,4	-0,8	0,0	0	1
Ta.ex	27,4	18,2	9,2	-	-	-	-

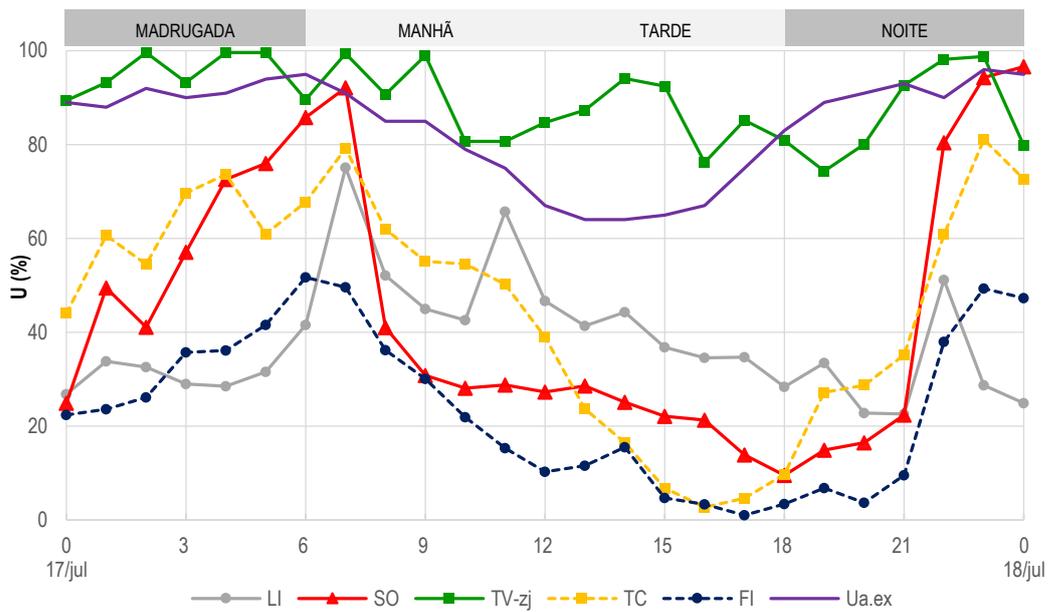
Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar do atraso térmico calculado da máxima Ta.in ter sido apenas de 1h no telhado verde, igual ao encontrado na laje impermeabilizada, o pico de 25,4°C no TV-zj ocorreu às 15h, ao passo que o meio externo registrou esse valor por volta das 10:30h, ou seja, um atraso de 4:30h da ocorrência dessa temperatura, aproximadamente. Esse comportamento permite que a transmissão do calor da estrutura seja adiada do período de maior radiação solar (próximo ao meio dia) para um horário de menor radiação (final da tarde).

5.1.3 Umidades (Us.ex, Us.in, Ua.sup e Ua.in)

O comportamento da **umidade superficial externa** (Us.ex) é bastante diversificado entre as coberturas, como apresenta o gráfico da Figura 69. Os sistemas laje impermeabilizada (LI – cor cinza), solo nu (SO – cor vermelho), telha cerâmica (TC – cor amarelo) e fibrocimento (FI – cor azul) possuem valores de Ua.ex menores que a umidade relativa do ar externo (Ua.ex – cor roxo), com exceção apenas de alguns horários (7h e 0h). Enquanto isso, o telhado verde (TV-zj – cor verde) permanece majoritariamente com porcentagens maiores que as demais coberturas e acima da Ua.ex, principalmente nos horários de maior influência da radiação solar, em que a umidade do ar externo atinge os menores valores. É importante lembrar que o sensor de umidade utilizado para a leitura das variáveis Us.ex e Us.in (umidades superficiais externas e internas) mede a umidade da camada superficial da cobertura como um alcance de 1,9cm. Para os valores externos, o equipamento avaliou a umidade da impermeabilização e da camada de concreto no sistema LI, de uma fina camada do solo no SO, das folhas, caules e porção mais externa do substrato no TV-zj e de toda a espessura das telhas nos sistemas TC e FI.

Figura 69 - Gráfico do comportamento da Us.ex nas coberturas no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar das grandes oscilações apresentadas, há um padrão de comportamento entre as coberturas. Com exceção do telhado verde (TV-zj), todas as demais elevam seu conteúdo de umidade durante a madrugada, atingindo os picos no início da manhã, quando a radiação solar incide sobre a cobertura, eleva sua temperatura (ver Figura 65 na seção 5.1.2) e reduz a umidade superficial externa pela evaporação do orvalho acumulado no período noturno. Durante todo o dia, os valores da Us.ex nessas coberturas continuam a cair até atingirem os valores mínimos entre as 16h e 21h, ou seja, com o final da atuação da radiação solar. A partir das 21h, LI, SO, TC e FI sobem drasticamente a porcentagem de Us.ex, influência da precipitação que ocorreu no final da noite (ver Figura 62 na seção 5.1.1).

O valor mínimo de Us.ex (umidade superficial externa) que o telhado verde (TV-zj) apresentou foi 74,4% (19h), próximo ao valor máximo apresentado pela laje impermeabilizada (LI - 75,1%) e pela telha cerâmica (TC - 81,1%). Entre as 11h e 16h, quando LI, SO, TC e FI reduziam seu conteúdo de umidade, o TV-zj aumentava. No horário em que Ua.ex (umidade relativa do ar externo) mínima de 64% (11h) foi atingida, o TV-zj registrava 87,4% de Us.ex no mesmo horário. Esse comportamento pode ter origem na combinação do sombreamento da cobertura provocado pelas nuvens, com as trocas de calor forçadas pela ventilação, que permaneceu em torno de 2,0m/s.

A laje impermeabilizada (LI) apresentou maior concentração de umidade superficial externa (Us.ex) em sua camada superficial que a cobertura com o solo exposto (SO), no período

diurno. Resultado das diferentes capacidades de absorver a radiação entre o solo e uma superfície pintada de branco, em que a primeira apresenta maiores temperaturas superficiais e, em consequência, menor teor de umidade (ver Figura 65 na seção 5.1.2)

Sobre os parâmetros expostos na Tabela 12, a cobertura com telha de fibrocimento (FI) apresentou os menores valores de $Us.ex$ máxima e mínima, consequência da baixa porosidade e espessura da telha. Os picos de máxima e mínima umidade superficial externa ($Us.ex$) foram maiores no telhado verde, indicando que, apesar da radiação solar, a combinação da presença de vegetação, sombreamento e as características da planta permitiram altos valores de umidade nas camadas externas e a menor variação de umidade (25,2%) dentre as cinco coberturas. Já o solo nu (SO) foi quem apresentou a maior variação, 87,1%, levando a compreender que essa cobertura é bastante influenciada pelas variáveis climáticas externas, sobretudo radiação solar, já que essa cobertura também apresentou a maior amplitude térmica da temperatura superficial externa (ver Tabela 8, seção 5.1.2)

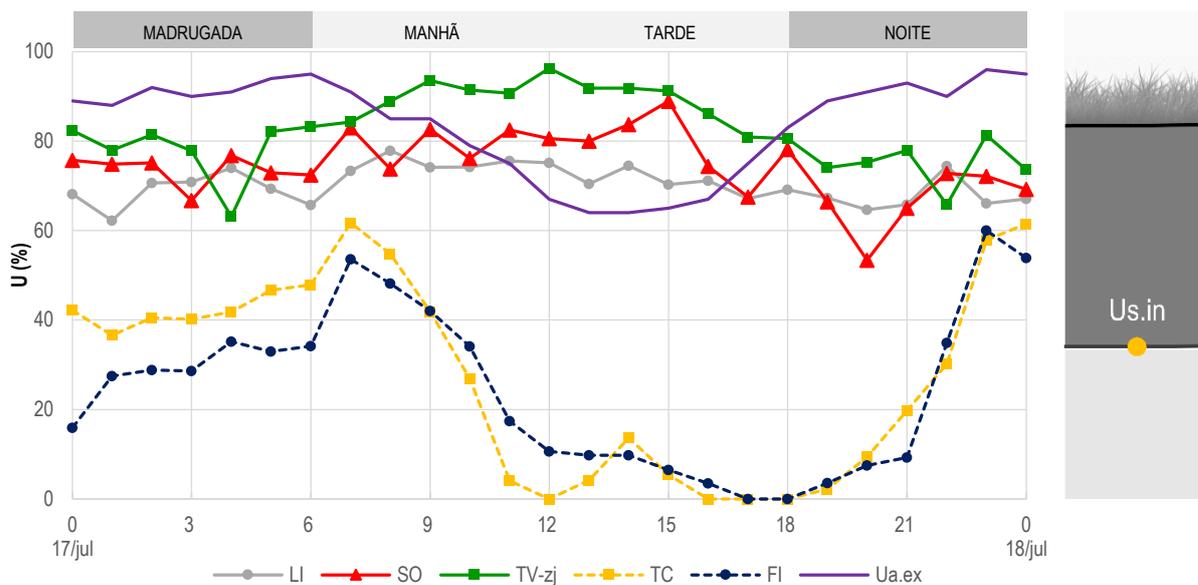
Tabela 12 – $Us.ex$ máxima, $Us.ex$ mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019

$Us.ex$	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
LI	75,1	22,6	52,5
SO	96,6	9,5	87,1
TV-zj	99,6	74,4	25,2
TC	81,1	2,7	78,4
FI	51,7	1,0	50,7
$Ua.ex$	96,0	64,0	32,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da **umidade superficial interna** ($Us.in$) destacam a importância da estrutura laje na manutenção da $Us.in$ acima de 60% (exceção apenas SO às 20h) (Figura 70). Nas coberturas com essa estrutura (LI, SO e TV-zj), os menores valores de $Us.in$ ocorrem no período da madrugada ou noite, e durante manhã e tarde atingem seus picos e possuem menores variações. Esse comportamento é inverso ao observado na umidade do ar externo e benéfico para o ambiente interno pois, com superfícies mais úmidas, a energia térmica transmitida por condução do meio externo para o meio interno será utilizada para a evaporação dessa umidade e uma menor parte será irradiada para o interior do ambiente.

Figura 70 - Gráfico do comportamento da Us.in nas coberturas no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

As coberturas TC e FI mantêm o mesmo comportamento gráfico observado na Us.ex, com maiores alterações de valores na cobertura com telha cerâmica. As maiores diferenças ocorrem no período da madrugada, no qual a telha cerâmica apresentou 42,2% de Us.in às 0h e a telha de fibrocimento 15,9% no mesmo horário. Uma diferença de 26,3% que pode ser atribuída a maior porosidade da TC, que permite maior acúmulo de umidade, principalmente no período noturno quando a Ua.ex é mais alta.

A adição das camadas do telhado verde à estrutura da laje impermeabilizada permitiu um maior aumento da Us.in do que a inserção da camada de solo natural, pois o TV-zj apresentou, de maneira geral, todo o seu gráfico com valores acima dos encontrados na LI. Já SO oscilou entre umidades acima e abaixo da LI. Apesar das maiores diferenças entre LI e essas duas coberturas serem próximas entre si (cerca de 21,4% TV-zj e 18,6% para SO), diferenças acima de 10% são mais frequentes no telhado verde.

Apesar da laje impermeabilizada (LI) não apresentar valores extremos máximos ou mínimos de Us.in, ela se comportou como a cobertura com a menor variação de umidade (ΔU - 15,7%), mantendo-se acima de 62% mas não ultrapassando 78% de conteúdo de umidade na camada superficial interna da cobertura (Tabela 13). Seguida dela, estão TV-zj, SO, FI e TC, com variações de 33,1%, 35,5%, 60,0% e 61,7% respectivamente. O telhado verde é a cobertura que apresenta os valores máximos de umidades superficial interna e tem sua variação próxima à variação da Ua.ex, mas com picos e vales em horários invertidos (maiores valores de Us.in no TV-zj ocorrem em momentos de baixa Ua.ex).

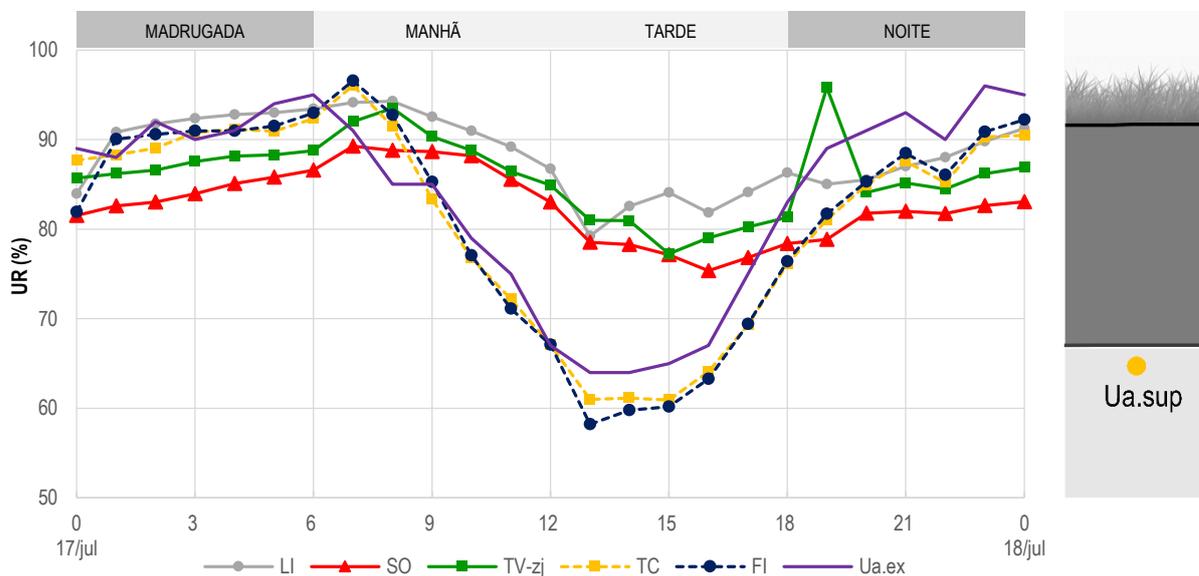
Tabela 13 - Us.in máxima, Us.in mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019

Us.in	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
LI	77,9	62,2	15,7
SO	88,9	53,4	35,5
TV-zj	96,3	63,2	33,1
TC	61,7	0,0	61,7
FI	60,0	0,0	60,0
Ua.ex	96,0	64,0	32,0

Fonte: Elaborado pelo autor

O impacto que os diferentes sistemas de coberturas causam na **umidade do ar próximo à superfície interna** (Ua.sup) apresenta variações bem menores entre eles do que nas variáveis anteriores (Us.ex e Us.in) (Figura 71). Telha cerâmica (TC) e fibrocimento (FI) acompanham as variações da umidade relativa externa (Ua.ex) com maior proximidade que nas variáveis anteriores. A maior diferença ocorre às 19h quando a Ua.ex é de 89% e a Ua.sup na TC é 81%, uma variação pequena quando comparada à precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$ para valores entre 25% e 85%, e $\pm 5,0\%$ para os extremos desse intervalo).

Figura 71 - Gráfico do comportamento da Ua.sup nas coberturas no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Entre 9h e 17h, os sistemas com laje (LI, SO e TV-zj) apresentaram umidade do ar próximo à superfície superior aos valores encontrados nas coberturas com telhas, ultrapassando também os valores externos. O menor valor da Ua.ex é 64% e ocorreu às 13 e 14h, horários em que a Ua.sup na LI, SO e TV-zj esteve em torno de 80%, efeito das altas umidades superficiais

internas apresentadas na Figura 70. Entre essas três coberturas, a laje impermeabilizada se comportou mais úmida que telhado verde e solo nu, nessa mesma sequência. As diferenças mais significativas são encontradas no período noturno, chegando a 8,7% na madrugada, entre LI e SO às 2h. De maneira geral, é importante destacar os sistemas SO e TV-zj por possuírem altas umidades durante manhã e tarde, e valores menores que as demais coberturas na madrugada e noite, sobretudo o solo nu, comportamento desejável para o período quente e úmido.

A maior variação de umidade (38,2%) ocorreu na telha de fibrocimento (FI), que também registrou o valor máximo e mínimo de Ua.sup no dia monitorado (Tabela 14). Solo nu (SO) apresentou a menor amplitude e maior máxima, seguido da laje impermeabilizada (LI) com a maior mínima. Os valores da Ua.sup máxima foram bem próximos entre si e a maioria ocorreu no início da manhã, enquanto os valores mínimos foram registrados nos mesmos horários que a Ua.ex mínima ocorreu ou com algumas horas de atraso (máximo 3h no SO).

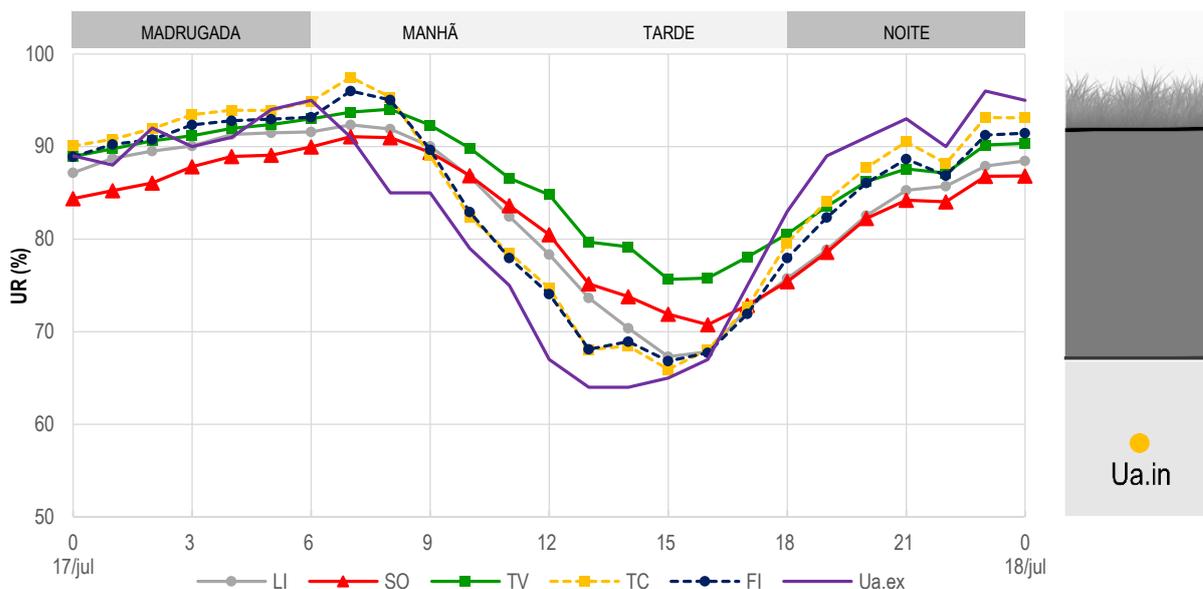
Tabela 14 - Ua.sup máxima, Ua.sup mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019

Ua.sup	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
LI	94,2	79,2	15,0
SO	89,2	75,3	13,9
TV-zj	95,8	77,2	18,6
TC	96,0	60,9	35,1
FI	96,5	58,2	38,3
Ua.ex	96,0	64,0	32,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando a **umidade relativa do ar no interior da célula teste** (Ua.in) é analisada, percebe-se grande proximidade de todas as coberturas entre elas e com a umidade relativa do ar externo no período da madrugada, não ultrapassando uma diferença de 5,92%, valor bem próximo aos $\pm 5,0\%$ da precisão do equipamento para umidades relativas acima de 85%, como é o caso dos dados nesses horários. No período da noite, as diferenças entre as coberturas só alcançaram 6,3% mas, quando SO é comparado a Ua.ex, as diferenças ficaram entre 5,86% (22h) e 10,4% (19h), valores consideráveis. Em ambos os períodos o sistema solo nu apresentou os menores valores da Ua.in, assim como na variável anterior (Ua.sup) (Figura 72).

Figura 72 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas no dia 17/07/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos períodos manhã e tarde (7h as 16h), todas as coberturas apresentaram valores de umidade relativa do ar interno maiores que os valores externos. Telha cerâmica (TC) e fibrocimento (FI) apresentaram valores praticamente iguais, enquanto telhado verde (TV-zj) chegou a uma diferença de 15,6% da Ua.ex, e a 11,58% das telhas no mesmo horário (13h). As diferenças entre TV-zj e SO e LI não ultrapassaram o valor de 6,47%. Ou seja, durante o dia, a cobertura que apresentou os melhores resultados (aumento da Ua.in) foi a cobertura com telhado verde, que também apresentou a menor variação de umidade entre todas as coberturas (18,4%), enquanto a maior foi registrada na telha cerâmica (31,2%), como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade no dia 17/07/2019

Ua.in	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
LI	93,3	67,3	26,0
SO	91,0	70,7	20,3
TV-zj	94,0	75,6	18,4
TC	97,4	65,9	31,5
FI	95,9	66,8	29,1
Ua.ex	96,0	64,0	32,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.4 Considerações sobre os resultados da Etapa 01

As temperaturas monitoradas nesta etapa apresentam o telhado verde (TV-zj) com a menor amplitude térmica em todas as variáveis. O albedo se mostra como importante parâmetro

no aumento das temperaturas superficiais externas ($T_{s.ex}$), indicando que a coloração do solo ou até mesmo as folhas das plantas podem ter influência nessa variável. A adição do solo ou das camadas do telhado verde na laje provocou a redução da temperatura superficial interna ($T_{s.in}$) em cerca de $5,0^{\circ}\text{C}$, mostrando a importância da massa térmica no desempenho dessa cobertura. Nessa mesma variável, os valores próximos de transmitância térmica permitiram que o comportamento de SO e TV-zj fossem semelhantes. Na temperatura do ar próximo à superfície interna da cobertura ($T_{a.sup}$), SO e TV-zj continuaram com valores próximos, principalmente durante o dia, embora SO se apresentou mais aquecido durante madrugada e noite. A análise da temperatura do ar no interior da célula teste ($T_{a.in}$) permitiu concluir que houve um menor aquecimento no período diurno com a utilização do telhado verde, mas seu comportamento foi próximo do sistema com solo nu. Ambos possuem as menores $T_{a.in}$ máximas, maiores mínimas, menores amplitudes, e o SO obteve o maior atraso térmico dessa variável. Apesar das diferenças na composição e na $T_{s.ex}$, SO e TV-zj apresentaram desempenhos próximos nas variáveis do ambiente interno, importantes para o conforto térmico do usuário.

No comportamento das umidades monitoradas, o telhado verde manteve altos valores em comparação às coberturas convencionais (telhas cerâmica e fibrocimento). Na umidade superficial externa ($U_{s.ex}$), os valores no telhado verde foram maiores que nas demais coberturas, chegando a aumentar seu teor de umidade durante o dia, enquanto os valores externos ($U_{a.ex}$) reduziam drasticamente. Além disso, seus valores mínimos de $U_{s.ex}$ permaneceram próximos aos valores máximos das outras coberturas, influência da camada de vegetação. A utilização da estrutura laje permitiu que a umidade superficial interna ($U_{s.in}$) se apresentasse maior que 60% em todas as coberturas que a utilizavam (LI, SO e TV-zj), dentre elas o TV-zj elevou mais a $U_{s.in}$ que o SO. Na umidade do ar próximo à superfície interna ($U_{a.sup}$), a laje permitiu valores maiores que nas coberturas com telha entre 9h e 17h. Por fim, as umidades do ar interno ($U_{a.in}$) têm valores bem próximos entre as coberturas durante a noite, mas a maior porcentagem de $U_{a.in}$ no período diurno foi encontrada no telhado verde, seguida de SO e LI.

5.2 Etapa 02 - Influência da espécie vegetal

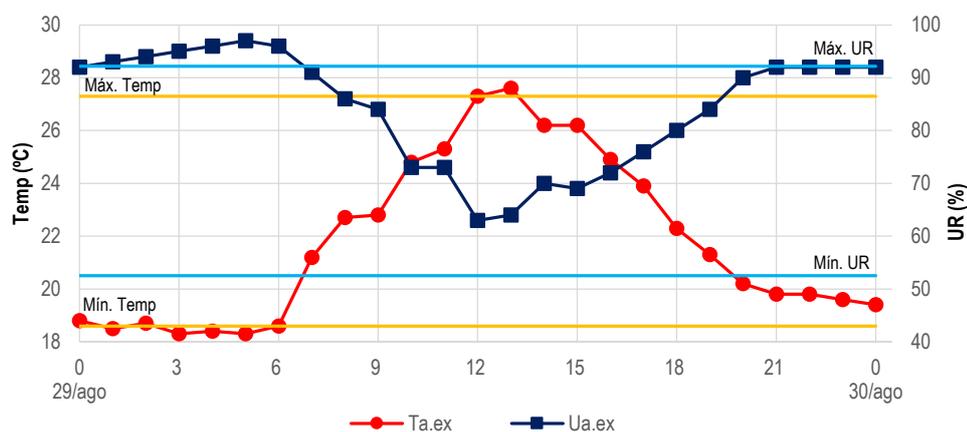
Primeiro será apresentado um relato sobre as características climáticas do dia de monitoramento desta etapa, 29 de agosto de 2019⁴⁸, escolhido por motivos de praticidade e logística para a coleta dos dados, seguido da análise da temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) e umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) monitoradas.

⁴⁸ Dias após o plantio de cada espécie na célula teste: *Desmodium triflorum* - 28 dias; *Callisia repens* - 29 dias; *Zoysia japonica* - 58 dias.

5.2.1 Comportamento climático

No gráfico da Figura 73, estão ilustrados os comportamentos da temperatura e umidade relativa do ar externo (Ta.ex e Ua.ex, respectivamente) no dia 29 de agosto de 2019, que pode ser considerado típico para o período quente e úmido de Arapiraca. Nos horários 12h e 13h, a Ta.ex (temperatura do ar externo) alcançou e superou a média das máximas temperaturas do ar do mês de agosto, chegando aos 27,6°C (13h), o que caracteriza um dia quente. De maneira semelhante ocorre com a Ua.ex (umidade relativa do ar externo), pois ela também alcançou e superou a média das máximas umidades relativas do ar para agosto durante toda a madrugada e das 21h às 0h, chegando a 97% (5h), mas não ficou abaixo da média das mínimas umidades relativas do ar para esse mês (52,5%), evidenciando um dia úmido.

Figura 73 - Gráfico do comportamento da Ta.ex e Ua.ex no dia 29/08/2019 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de agosto, de acordo com Silva (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor

Esse dia monitorado apresentou uma amplitude térmica de 9,3°C, 0,6°C maior que a amplitude média para o mês de agosto e uma variação de umidade menor (5,7%) que a variação média das umidades relativas (Tabela 16).

Tabela 16 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática no dia 29/08/2019

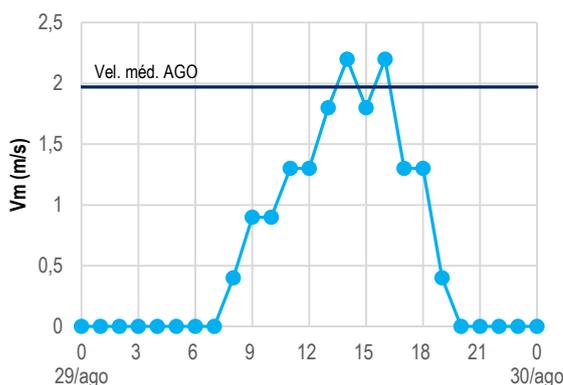
	29/08/2019		Média mensal - AGO SILVA (2019)	
	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)
Máxima	27,6	97,0	27,3	92,2
Mínima	18,3	63,0	18,6	52,5
Amplitude / Variação	9,3	34,0	8,7	39,7

Fonte: Elaborado pelo autor

Não houve precipitação no dia monitorado. A ventilação apresentou um período de calma das 0h às 7h (madrugada e início da manhã) e das 20h às 0h (final do período noturno),

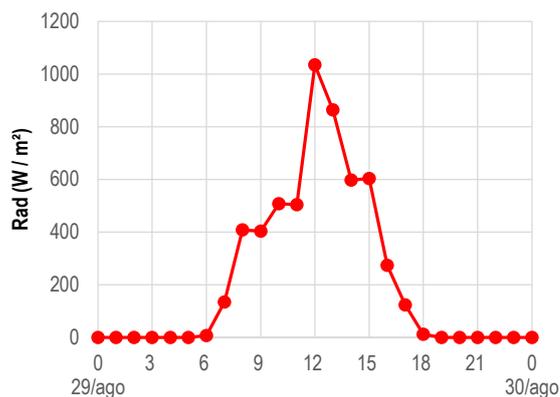
com uma velocidade média diária de 0,63m/s, estando próximo da média de velocidade do ar para o mês de agosto (1,97m/s) apenas das 13h às 16h (Figura 74). Não houve monitoramento da direção predominante da ventilação. Quanto à radiação solar, o comportamento da parábola indica a presença de nebulosidade, embora não seja possível comprovar com imagens hemisféricas do céu, pois não foi realizado o monitoramento dessa variável. A Figura 75 apresenta o comportamento gráfico da radiação solar global, com pico de 1035,0W/m² às 12h.

Figura 74 - Gráfico do comportamento da velocidade média do ar no dia 29/08/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 75 - Gráfico do comportamento da radiação solar global no dia 29/08/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

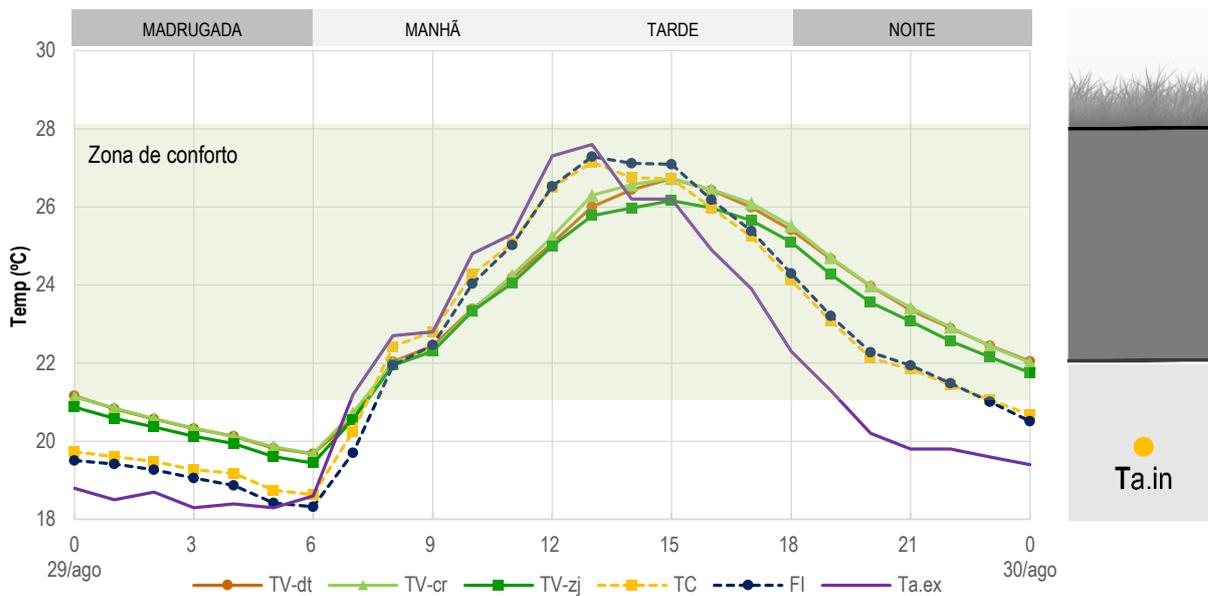
De maneira geral, o dia 29 de agosto de 2019 foi típico para o período quente e úmido, sem precipitação, velocidade do ar diária abaixo da média para o mês de agosto, em sua maioria, e radiação solar com pico acima de 1000,0W/m², apesar de aparentar ser um dia com grande nebulosidade.

5.2.2 Temperatura do ar interno (Ta.in)

Na Figura 76 estão expressos graficamente o comportamento da Ta.in nos cinco sistemas de cobertura, nos quais as três células teste com telhado verde foram bastante semelhantes entre si, principalmente durante o período da manhã. As maiores diferenças de resfriamento com relação à temperatura do ar externo (Ta.ex – cor roxo) ocorreram às 12h (2,23°C–TV-dt, 2,06°C–TV-cr e 2,30°C–TV-zj), e de aquecimento às 20h (3,77°C–TV-dt, 3,77°C–TV-cr e 3,35°C–TV-zj), como mostram a Tabela 17⁴⁹ e a Figura 77.

⁴⁹ O sinal negativo (-) dos valores na Tabela 17 indica redução da Ta.in na célula teste em comparação a Ta.ex naquele horário.

Figura 76 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste no dia 29/08/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado



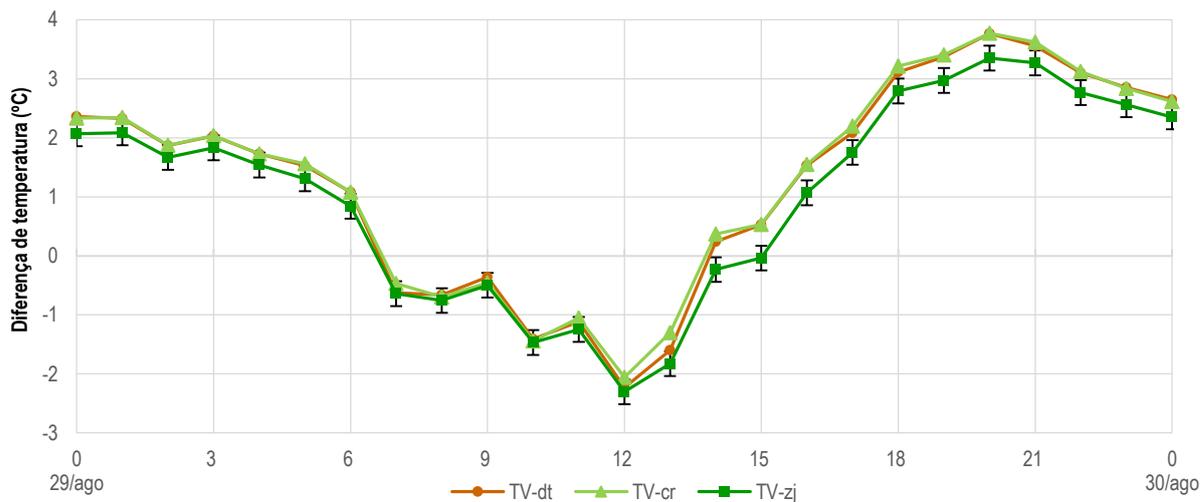
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 - Diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com telhado verde e a Ta.ex

	29 AGO																							30 AGO	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
TV-dt	2,36	2,33	1,87	2,03	1,73	1,53	1,08	-0,63	-0,66	-0,36	-1,41	-1,11	-2,23	-1,60	0,24	0,53	1,53	2,08	3,11	3,37	3,77	3,56	3,10	2,85	2,65
TV-cr	2,33	2,34	1,88	2,04	1,73	1,56	1,08	-0,47	-0,69	-0,46	-1,44	-1,05	-2,06	-1,30	0,37	0,53	1,55	2,20	3,21	3,41	3,77	3,62	3,13	2,84	2,61
TV-zj	2,07	2,08	1,67	1,83	1,54	1,31	0,84	-0,64	-0,76	-0,50	-1,47	-1,25	-2,30	-1,83	-0,23	-0,04	1,07	1,75	2,79	2,97	3,35	3,27	2,77	2,56	2,35

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 77 – Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com telhado verde e a Ta.ex, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 0,21^\circ\text{C}$) no gráfico do TV-zj



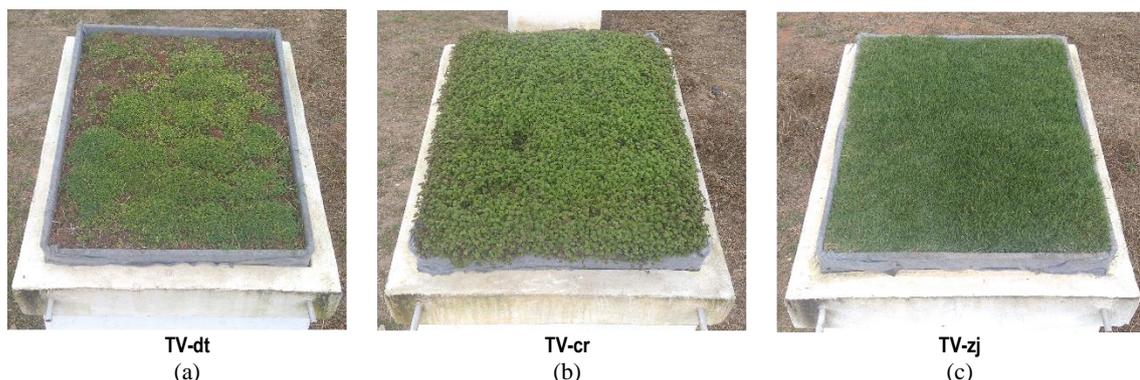
Fonte: Elaborado pelo autor

De modo geral, o telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj – cor verde escuro) apresentou menores valores em todos os períodos monitorados (madrugada, manhã, tarde e noite),

chegando a ser 0,6°C (14h) menor que a Ta.in da célula teste com *Callisia repens* (TV-cr – cor verde claro). Segundo Savi (2015), a *Zoysia tenuifolia* permite a formação de uma massa densa e uniforme na cobertura, reduzindo a troca de calor do substrato com o meio externo, esse mesmo efeito pode ser aplicado a *Zoysia japonica*, por serem espécies do mesmo gênero e morfologicamente semelhantes, explicando os seus menores valores internos.

Há uma grande diferença visual de cobertura do solo entre as espécies *Callisia repens* e *Desmodium triflorum* (Figura 78), já que esta última não conseguiu cobrir a totalidade do substrato (condição de não estabelecimento da vegetação segundo os critérios de Farrell et. al. (2012)), enquanto a outra, além de cobrir 100% da área, avançou os limites do “caixote vazado” de madeira. Apesar disso, o telhado verde com *Desmodium triflorum* (TV-dt – cor marrom) e com *Callisia repens* (TV-cr – cor verde claro) apresentaram pouca diferença gráfica quando se avalia todo o monitoramento da Ta.in, chegando apenas a 0,3°C de diferença às 13h, valor próximo à precisão do equipamento ($\pm 0,21^\circ\text{C}$).

Figura 78 - Aparência dos telhados verdes com (a) *Desmodium triflorum*, (b) *Callisia repens* e (c) *Zoysia japonica*



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de alguns autores citarem que a copa da vegetação tem influência no desempenho térmico do telhado verde (CARVALHO, TONELLO, MIRANDA, 2018; LIZ, MIZGIER, GÜTHS, 2016), essa variável não teve influência na temperatura do ar interno nesta pesquisa, uma vez que TV-cr e TV-dr apresentaram valores bastante próximos durante todo o monitoramento. Leva-se a entender que os efeitos do sombreamento do substrato promovido pela *Callisia repens* foram compensados pela retirada de calor no processo de evaporação da água do substrato exposto da *Desmodium triflorum*, confirmando o que Mechelen, Dutoit e Hermy (2015) dizem sobre as plantas impedirem a evaporação do solo e reduzirem o potencial do telhado verde de resfriar a cobertura. Além disso, plantas com metabolismo CAM (Metabolismo do Ácido das Crassuláceas), como a *Callisia repens*, podem apresentar temperaturas superficiais maiores que das outras espécies, por terem uma menor transpiração (CAO et. al.,

2019), mas essa variável poderá ser melhor vista na análise das temperaturas na Etapa 03, onde serão analisadas as temperaturas superficiais das coberturas.

Pode-se inferir que a variação da espécie vegetal não foi influente no desempenho térmico das células TV-dt e TV-cr, sobretudo no período diurno, uma vez que os três telhados verdes não apresentaram diferenças significativas entre si (valores menores que 0,24°C). Valores consideráveis de variação entre as espécies só aparecem a partir das 14h e são oriundos das diferentes capacidades de armazenar calor do sistema completo (laje, drenagem, substrato e vegetação) e atrasar sua emissão para o ambiente interno.

Em relação à zona de conforto para o dia 29 de agosto de 2019⁵⁰, nenhuma das coberturas ultrapassou o limite superior, mas a temperatura do ar interno (Ta.in) de todas elas ficou abaixo do limite inferior (21,08°C), principalmente na madrugada, quando os sistemas com telhado verde se apresentaram mais aquecidos que os demais, sobretudo TV-dt e TV-cr.

Quanto aos parâmetros (Tabela 18), a célula teste com *Zoysia japonica* obteve melhores resultados de amplitude térmica, amortecimento das máximas e atraso térmico da máxima, enquanto que *Callisia repens* e *Desmodium triflorum* se destacaram no amortecimento das mínimas e atraso térmico da máxima. É importante destacar que os parâmetros calculados para TV-dt e TV-cr resultaram em valores idênticos, apesar da diferença significativa de cobertura do solo apresentada pelas espécies.

Tabela 18 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 29/08/2019

Ta.in	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
				Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
TV-dt	26,7	19,7	7,0	-0,9	1,4	2	1
TV-cr	26,7	19,7	7,0	-0,9	1,4	2	1
TV-zj	26,2	19,4	6,8	-1,4	1,1	2	1
TC	27,1	18,6	8,5	-0,5	0,3	0	1
FI	27,3	18,3	9,0	-0,3	0,0	0	1
Ta.ex	27,6	18,3	9,3	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

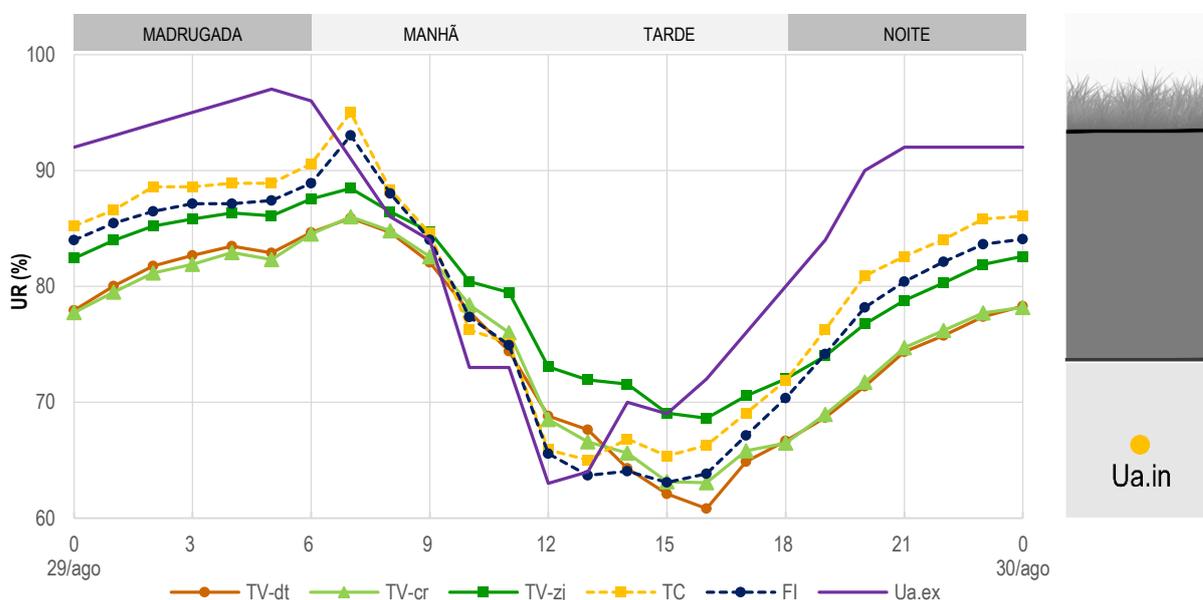
5.2.3 Umidade relativa do ar interno (Ua.in)

O gráfico da Figura 79 expõe o comportamento da umidade relativa do ar interno (Ua.in) monitorada no dia 29 de agosto de 2019. As espécies *Desmodium triflorum* e *Callisia repens*

⁵⁰ Ver Zona de Conforto para o dia 29/08/2019 no Apêndice D

nos telhados verdes TV-dr (cor marrom) e TV-cr (cor verde claro), respectivamente, não apresentaram diferenças consideráveis entre si (acima de $\pm 3,5\%$, precisão do equipamento), todas foram menores que 2,24% (16h). Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017) também não encontraram diferenças significativas na umidade relativa do ar interno de células teste com diferentes espécies no telhado verde (*Ajuda reptans* e *Arachis pintoi*). Já a espécie *Zoysia japonica* permitiu que o TV-zj (cor verde escuro) permanecesse com valores maiores que as outras coberturas verdes durante todo o monitoramento. Apesar disso, as diferenças nos períodos madrugada e noite foram bem próximas à precisão do equipamento, mas no período diurno, sobretudo durante a tarde, o TV-zj apresentou valores maiores, entre 4,23% e 7,8%.

Figura 79 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas no dia 29/08/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

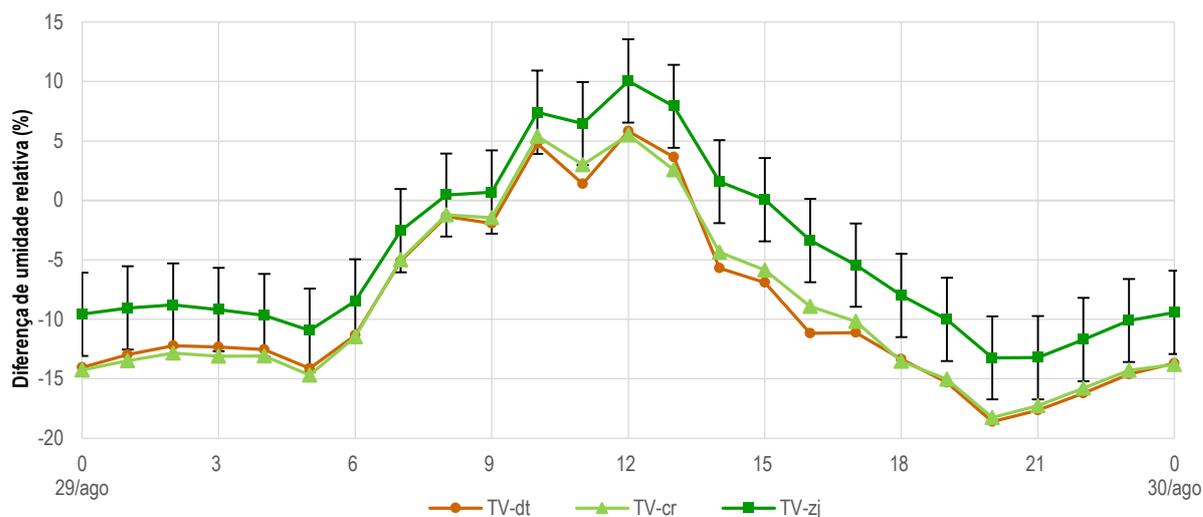
Quando os valores da Ua.in (umidade relativa do ar interno) são comparados ao comportamento da Ua.ex (umidade relativa do ar externo – cor roxo), entre 9h e 13h todas as coberturas se apresentaram mais úmidas que os valores externos, tendo o TV-zj apresentado os maiores valores. Nos demais horários, a maioria das coberturas se apresentaram com valores de umidade menores que os valores externos, tendo o TV-dt e TV-cr se destacado com as menores umidades relativas nesses horários. As maiores diferenças de aumento da Ua.in em relação à Ua.ex ocorreram às 12h (5,8%–TV-dt, 5,5%–TV-cr e 10,0%–TV-zj), e de redução às 20h (18,6%–TV-dt, 18,3%–TV-cr e 13,3%–TV-zj), como mostra a Tabela 19⁵¹. Diferenças consideráveis (acima da faixa de precisão) apenas são encontradas entre às 12h e 21h (Figura 80).

⁵¹ O sinal negativo (-) e o sinal positivo (+) dos valores na Tabela 19 indicam, respectivamente, redução e aumento da Ua.in na célula teste em comparação a Ua.ex naquele horário.

Tabela 19 - Diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com telhado verde e a Ua.ex

	29 AGO																							30 AGO	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
TV-dt	-14,1	-13,0	-12,2	-12,3	-12,5	-14,1	-11,3	-5,1	-1,4	-1,9	4,8	1,4	5,8	3,6	-5,7	-6,9	-11,2	-11,1	-13,3	-15,3	-18,6	-17,7	-16,2	-14,6	-13,7
TV-cr	-14,3	-13,5	-12,9	-13,1	-13,1	-14,7	-11,5	-5,0	-1,2	-1,5	5,4	3,0	5,5	2,6	-4,4	-5,9	-8,9	-10,2	-13,5	-15,1	-18,3	-17,3	-15,8	-14,3	-13,8
TV-zj	-9,6	-9,0	-8,8	-9,2	-9,7	-10,9	-8,5	-2,5	0,5	0,7	7,4	6,5	10,0	7,9	1,6	0,1	-3,4	-5,4	-8,0	-10,0	-13,3	-13,2	-11,7	-10,1	-9,4

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 80 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com telhado verde e a Ua.ex, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$) no gráfico do TV-zj

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 20 apresenta os valores máximos e mínimos da Ua.in (umidade relativa do ar interno) juntamente com a variação de umidade dessa variável.

Tabela 20 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade no dia 29/08/2019

Ua.in	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
TV-dt	85,9	60,8	25,1
TV-cr	86,0	63,0	23,0
TV-zj	88,4	68,6	19,8
TC	94,9	65,0	29,9
FI	93,0	63,1	29,9
Ua.ex	97,0	63,0	34,0

Fonte: Elaborado pelo autor

As coberturas com telha (cerâmica – TC e fibrocimento – FI) tiveram a maior variação de umidade relativa (ΔU), 29,9%, enquanto TV-zj a menor, 19,8%. TV-dt foi a cobertura que apresentou os menores valores tanto das máximas como das mínimas Ua.in. Para o período

quente e úmido é desejável que a umidade seja reduzida no interior do ambiente e, nesse contexto, *Zoysia japonica* se comportou melhor no período diurno e *Desmodium triflorum* e *Callisia repens* nos demais horários.

5.2.4 Considerações sobre os resultados da Etapa 02

Na análise das variáveis do ar interno nas células teste desta etapa, as espécies *Zoysia japonica* (TV-zj), *Callisia repens* (TV-cr) e *Desmodium triflorum* (TV-dt) apresentaram desempenhos similares, tanto na temperatura do ar como na umidade relativa do ar interno, apesar das pequenas diferenças entre os valores encontrados no telhado verde com *Zoysia japonica* e nos outros dois telhados verdes, e das diferenças na cobertura do substrato de cada espécie. Quanto aos parâmetros de $T_{a.in}$ e $U_{a.in}$, embora o TV-zj tenha reduzido a amplitude térmica e tenha sido mais eficiente para o amortecimento das $T_{a.in}$ máximas, atraso térmico das $T_{a.in}$ mínimas e na menor variação de umidade, as diferenças com os parâmetros dos telhados verde com *Callisia repens* e *Desmodium triflorum* são pequenas e próximas à precisão do equipamento.

5.3 Etapa 03 – Influência da vegetação

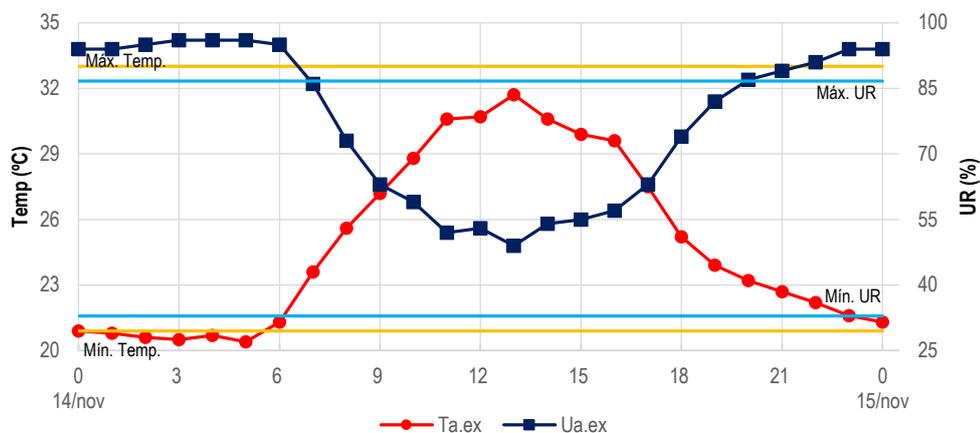
Inicialmente serão apresentados os dados climáticos do dia monitorado, 14 de novembro de 2019⁵², selecionado por motivos de praticidade e logística para a coleta dos dados, seguidos dos resultados de temperatura e umidade, utilizando a mesma sequência de análise das variáveis apresentada na Etapa 01.

5.3.1 Comportamento climático

Os dados apresentados no gráfico da Figura 81 correspondem ao comportamento da temperatura e umidade relativa do ar externo no dia 14 de novembro de 2019. Durante o período diurno, nenhuma das variáveis ultrapassou os valores médios máximos de temperatura (33,0°C) e mínimos de umidade relativa do ar (32,9%) para do mês de novembro, caracterizando um dia típico do período quente e seco. Durante toda a madrugada (0h às 6h), a temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$) permaneceu abaixo da média das mínimas, chegando a 20,4°C às 5h, enquanto seu pico de 31,7°C ocorreu às 13h. A umidade relativa do ar externo ($U_{a.ex}$) atingiu o mínimo de 49% (13h) e o máximo de 96% (3h, 4h e 5h), permanecendo acima da média das máximas durante toda a madrugada e após as 21h.

⁵² Dias após o plantio de cada espécie na célula teste utilizada nessa etapa: *Callisia repens* – 106 dias; *Zoysia japonica* – 135 dias.

Figura 81 - Gráfico do comportamento da Ta.ex e Ua.ex no dia 14/11/2019 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de novembro, de acordo com Silva (2019)



Fonte - Elaborado pelo autor

Com uma amplitude térmica de $11,3^{\circ}\text{C}$, $0,8^{\circ}\text{C}$ menor que a amplitude média para o mês de novembro, e uma variação de umidade menor (6,8%) que a variação média das umidades relativas (Tabela 21), o dia monitorado não apresentou características marcantes para o período quente e seco, mas um comportamento de uma fase de transição entre as estações úmida e seca.

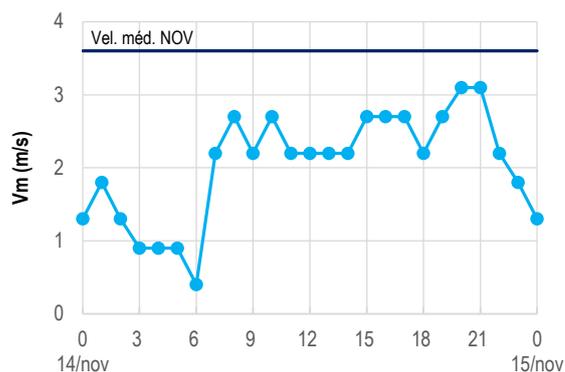
Tabela 21 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática no dia 14/11/2019

	14/11/2019		Média mensal - NOV SILVA (2019)	
	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)
Máxima	31,7	96,0	33,0	86,7
Mínima	20,4	49,0	20,9	32,9
Amplitude / Variação	11,3	47,0	12,1	53,8

Fonte: Elaborado pelo autor

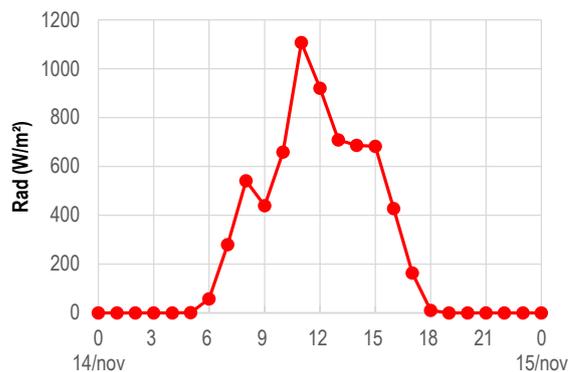
Os dados de precipitação foram nulos para esse dia. A ventilação apresentou uma velocidade média diária de $2,0\text{m/s}$ e permaneceu abaixo da velocidade média do ar para o mês de novembro ($3,6\text{m/s}$) durante as 24h, apesar de não apresentar período de calmaria em nenhum horário, como apresenta a Figura 82. Não houve monitoramento da direção predominante da ventilação. O comportamento da radiação solar demonstra a presença de nebulosidade no céu, principalmente entre às 7h e 15h, e as fotos hemisféricas do céu podem constatar esse evento. Apenas no início (6h) e fim do dia (16h e 17h) o céu se apresentou claro, nos demais horários a presença das nuvens caracterizou um céu parcialmente encoberto. Na Figura 83 é apresentado o comportamento gráfico da radiação solar global, que teve pico de $1107,0\text{ W/m}^2$ às 11h, e as imagens hemisféricas do céu são dispostas por horário no Quadro 23.

Figura 82 - Gráfico do comportamento da velocidade média do ar no dia 14/11/2019



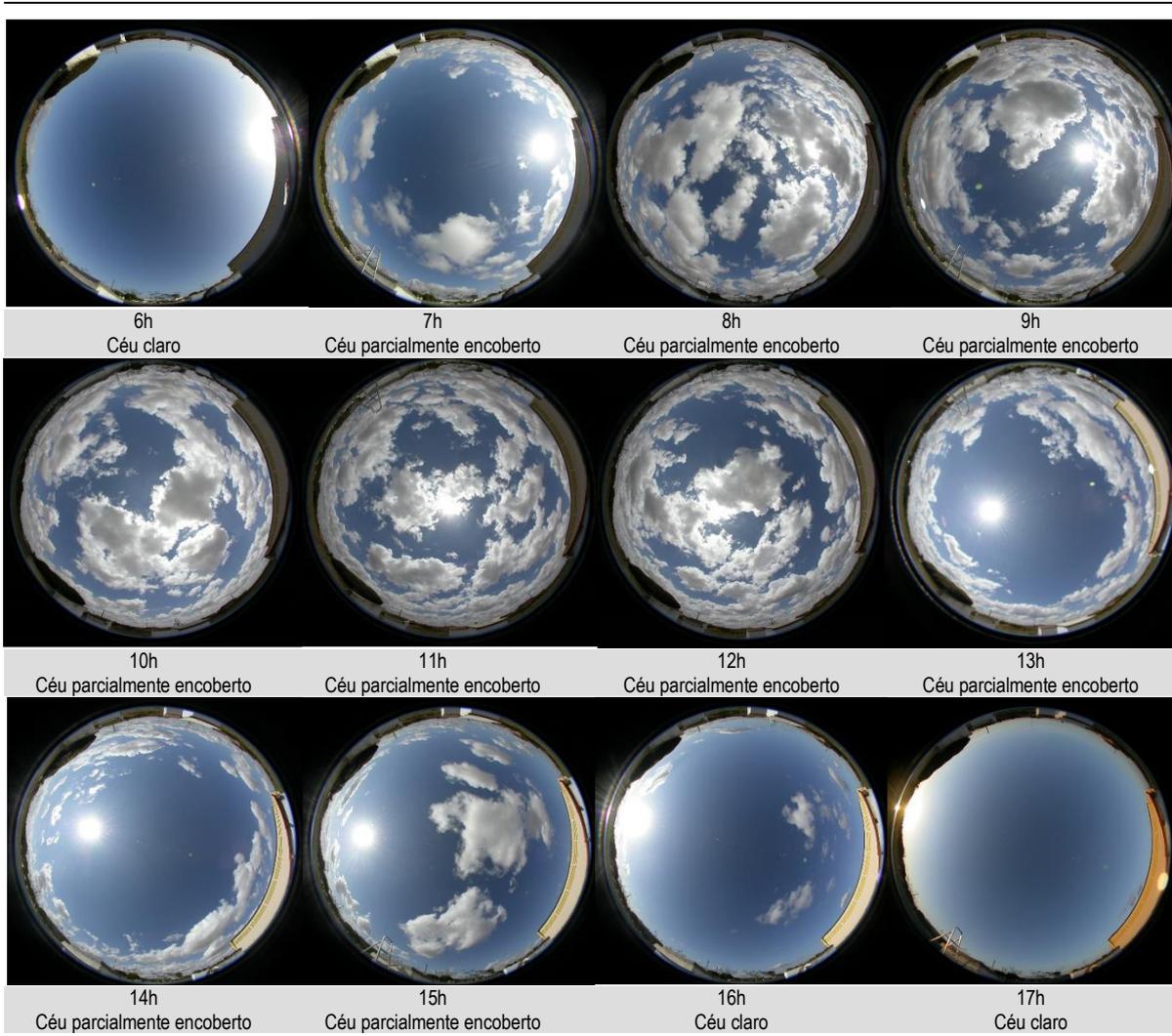
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 83 - Gráfico do comportamento da radiação solar global no dia 14/11/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 23 - Classificação do tipo de céu e fotos hemisféricas da abóbada celeste das 6h às 17h



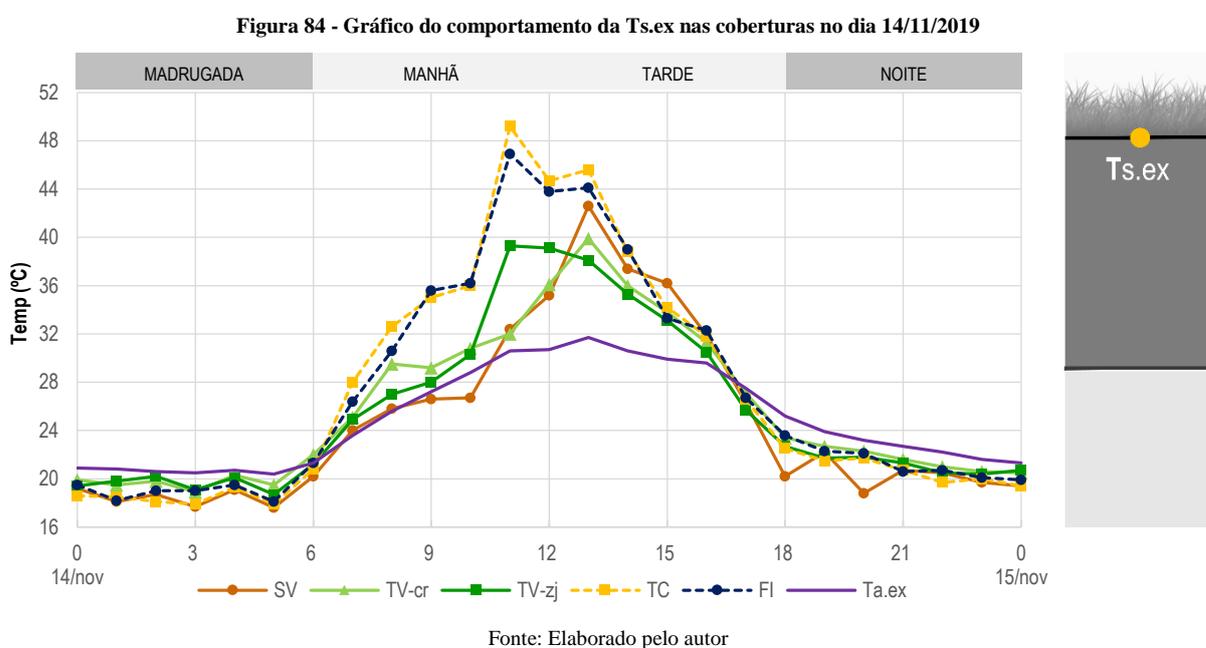
Fonte: Elaborado pelo autor

Sintetizando, o dia monitorado foi característico da transição entre o período quente e úmido e o quente e seco, sem precipitação, com velocidade do ar abaixo da média para o mês

de novembro e sem calmaria, céu parcialmente encoberto no período diurno mas com radiação solar global com pico acima de $1000,0\text{W}/\text{m}^2$.

5.3.2 Temperaturas ($T_{s.ex}$, $T_{s.in}$, $T_{a.sup}$ e $T_{a.in}$)

Os valores médios da **temperatura superficial externa** ($T_{s.ex}$) monitorados nos sistemas de cobertura estão expressos no gráfico da Figura 84⁵³. Nos períodos madrugada e noite, todas as coberturas apresentaram valores menores que a temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$ – cor roxo). Durante o período de influência da radiação solar fica evidente o diferente comportamento das temperaturas superficiais, assim como aconteceu com a $T_{s.ex}$ da Etapa 01, devido às diferentes capacidades de absorção da radiação de cada cobertura, oriundas das propriedades dos materiais e da vegetação.



De maneira geral, apenas entre as 13h e 17h o sistema de telhado verde sem vegetação (SV – cor marrom) teve $T_{s.ex}$ (temperatura superficial externa) maior que os sistemas de telhado verde com vegetação (TV-cr e TV-zj, cores verde claro e escuro, respectivamente). Os gráficos dos telhados verdes com *Callisia repens* (TV-cr) e *Zoysia japonica* (TV-zj) apresentaram oscilações entre si no período diurno uma vez que, no início da manhã e final da tarde, o TV-cr apresentou valores mais elevados que o TV-zj, chegando a uma diferença de $2,5^{\circ}\text{C}$ (8h). Nos períodos com radiação solar mais elevada (11h e 12h), o comportamento se inverte e o TV-zj (telhado verde com *Zoysia japonica*) esteve $7,3^{\circ}\text{C}$ mais aquecido, devido à menor altura da vegetação no TV-zj permitir que a cobertura esteja mais sujeita a variação de radiação. Esses

⁵³ No Apêndice F estão todos os registros termográficos das coberturas para todos os horários em que os sistemas foram monitorados (0h do dia 14/11/2019 a 0h do dia 15/11/2019)

resultados corroboram com os valores apresentados por Savi (2015) e Liu et. al. (2012), quando apresentam maiores valores de temperaturas superficiais em espécies suculentas e que apresentam cores mais escuras, características da espécie *Callisia repens*. No estudo de Cao et.al. (2019) essa espécie chega a 44,1°C de Ts.ex, e nesta pesquisa atingiu o pico de 39,9°C às 13h.

A cobertura sem vegetação (SV) registrou o maior valor máximo de temperatura superficial externa (42,6°C – 13h) entre os três sistemas com laje e o menor valor mínimo (17,6°C – 5h) da Ts.ex monitorada em todas as coberturas. A cobertura com telha cerâmica (TC) apresentou a maior amplitude térmica (31,3°C), cerca de 10,7°C maior que a amplitude registrada no telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj – 20,6°C). A menor máxima foi encontrada no TV-zj, que teve 39,3°C de pico, cerca de 0,6°C de diferença do telhado verde com *Callisia repens* (TV-cr), que, por sua vez, apresentou a maior mínima (18,9°C) entre todas as coberturas.

A análise do parâmetro amplitude térmica (Tabela 22) permite verificar que a vegetação permitiu uma redução mínima de 4,0°C na amplitude térmica, quando comparada à cobertura sem vegetação (SV). Apesar do TV-cr possuir visualmente maior massa vegetal e altura, o TV-zj foi quem apresentou a maior redução da amplitude, devido às plantas se apresentarem mais densas e a troca de calor com o meio externo ser reduzida (SAVI, 2015). Além disso, a presença da vegetação foi mais eficaz na redução das temperaturas superficiais externas máximas, enquanto que na ausência de vegetação, o sistema foi mais eficiente para a redução das mínimas.

Tabela 22 - Ts.ex máxima, Ts.in mínima e amplitude térmica no dia 14/11/2019

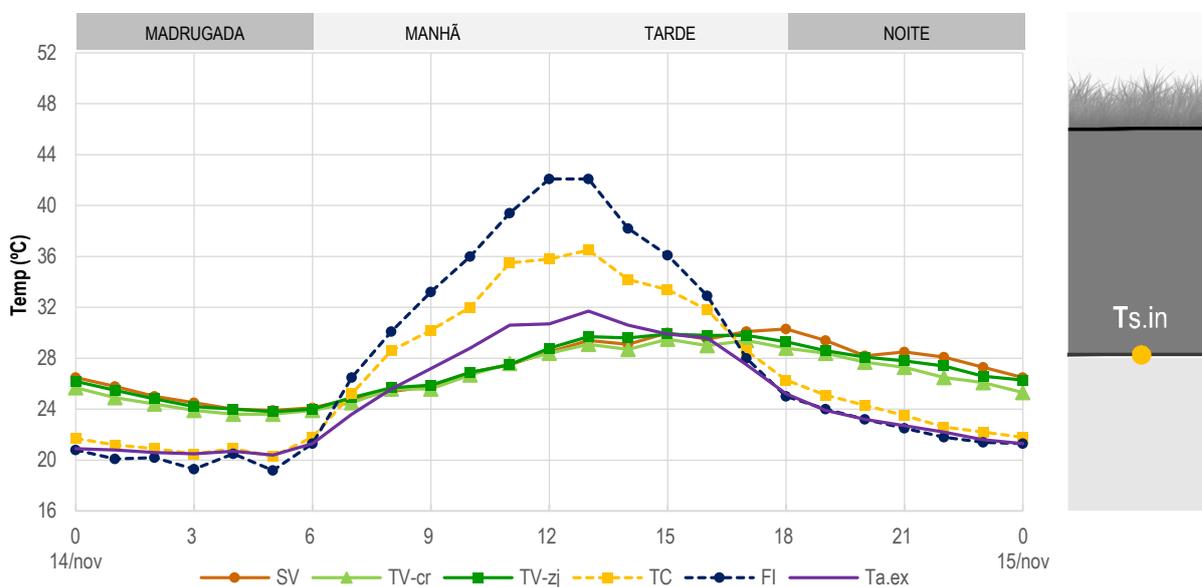
Ts.ex	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)
SV	42,6	17,6	25,0
TV-cr	39,9	18,9	21,0
TV-zj	39,3	18,7	20,6
TC	49,2	17,9	31,3
FI	46,9	18,1	28,8
Ta.ex	31,7	20,4	11,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 85 estão apresentados graficamente os valores da **temperatura superficial interna** (Ts.in) coletada nesta etapa. O comportamento dos sistemas com laje é bem semelhante ao comportamento do TV-zj e SO na Etapa 01 (ver Figura 66 na seção 5.1.2), pois os telhados verdes com *Callisia repens* (TV-cr – cor verde claro), *Zoysia japonica* (TV-zj – cor verde escuro) e o sistema sem vegetação (SV – cor marrom) atingiram os menores valores da Ts.in

diurnas e maiores durante o período noturno, não superando a máxima registrada da temperatura do ar externo ($T_{a.ex} - 31,7^{\circ}\text{C}$) nem ficando abaixo da mínima $T_{a.ex}$ ($20,4^{\circ}\text{C}$).

Figura 85 - Gráfico do comportamento da $T_{s.in}$ nas coberturas no dia 14/11/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Entre as 4h e 13h, as diferenças entre as temperaturas superficiais internas foram pequenas, chegando apenas a $0,4^{\circ}\text{C}$, nos demais horários podem chegar a $1,6^{\circ}\text{C}$ (16h – diferença entre a $T_{s.in}$ no SV e TV-zj). Na maior parte das 24h de monitoramento, o sistema TV-cr (telhado verde com *Callisia repens*) apresentou os menores valores de $T_{s.in}$, enquanto o SV (telhado verde sem vegetação) foi o mais aquecido das 0h às 3h e entre as 17 e 0h, ou seja, nos horários em que a influência da radiação é pequena ou nula, indicando que esse comportamento é resultado das características do material.

Apesar do SV possuir uma transmitância térmica menor ($0,80\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) que o telhado verde ($0,96\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), ele possui um albedo levemente menor ($0,20$) que uma superfície vegetada ($0,25$) e, diferente do telhado verde em que as plantas utilizam a radiação para seu processo de fotossíntese, no solo exposto a radiação é utilizada para o aumento da temperatura superficial externa ($T_{s.ex}$), que acaba refletindo na $T_{s.in}$. Liz (2016) analisando o fluxo de calor na superfície de contato superior da laje de concreto em sistemas de telhado verde com e sem vegetação, encontrou um fluxo de calor máximo cerca de $58,4\%$ maior na cobertura sem vegetação que no telhado verde com vegetação.

Quanto ao parâmetro amplitude térmica (Tabela 23), a cobertura com telha de fibrocimento (FI) obteve uma amplitude de $22,9^{\circ}\text{C}$ (maior valor) enquanto que o telhado verde com a espécie *Callisia repens* (TV-cr) apresentou apenas $5,9^{\circ}\text{C}$ de ΔT . Dentre as três coberturas com

laje, o sistema SV apresentou a maior amplitude e maior $T_{s.in}$ máxima que os telhados verdes. Liz (2016), analisando o fator decremental⁵⁴, encontrou uma redução de 42% desse parâmetro oriundo da adição da vegetação no telhado verde, indicando uma maior redução da amplitude da temperatura superficial no telhado verde com vegetação.

Tabela 23 - $T_{s.in}$ máxima, $T_{s.in}$ mínima e amplitude térmica no dia 14/11/2019

$T_{s.in}$	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)
SV	30,3	23,9	6,4
TV-cr	29,5	23,6	5,9
TV-zj	29,9	23,8	6,1
TC	36,5	20,3	16,2
FI	42,1	19,2	22,9
$T_{a.ex}$	31,7	20,4	11,3

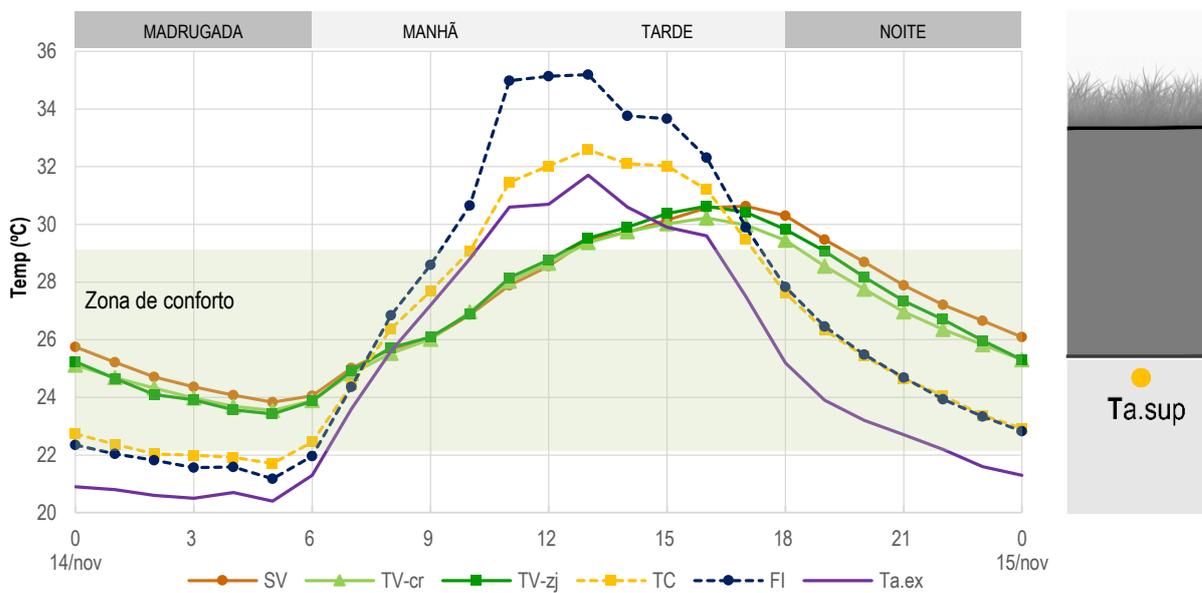
Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento da **temperatura do ar próximo a superfície interna** ($T_{a.sup}$ – Figura 86) dos sistemas com laje (SV, TV-cr e TV-zj) é semelhante ao encontrado na variável anterior ($T_{s.in}$). Os valores das três coberturas foram próximos durante o monitoramento, principalmente durante a manhã, mas nos períodos de madrugada e noite a cobertura sem vegetação (SV) permaneceu mais aquecida que as demais. Essa semelhança de comportamento entre as duas variáveis ($T_{s.in}$ e $T_{a.sup}$) já foi observada na Etapa 01 e ocorre devido à proximidade dos pontos de medição, em que a $T_{s.in}$ utiliza a superfície da cobertura enquanto a $T_{a.sup}$ utiliza o ar próximo a ela, cerca de 3,0cm de distância da cobertura. Segundo Parizotto e Lamberts (2011), as propriedades difusas do substrato e da drenagem, adicionadas à massa térmica da estrutura de suporte da coberta, atrasam o processo de transferência de calor na cobertura, por isso os valores da $T_{a.sup}$ no SV são mais elevados. Entre SV, TV-cr e TV-zj as diferenças chegaram a quase 1,0°C no período noturno (SV e TV-cr às 20h – 0,94°C). Entre as espécies *Callisia repens* e *Zoysia japonica*, diferenças maiores que 0,3°C foram encontradas das 15h às 22h, quando TV-cr apresentou menores valores que o TV-zj. Com relação à zona de conforto para o dia 14/11/2019⁵⁵, as coberturas com telhas ultrapassaram os limites máximos e mínimos e as coberturas com laje ficaram acima apenas do limite superior (29,09°C), com uma diferença máxima de 1,51°C, enquanto que a TC teve seu pico de $T_{a.sup}$ 3,51°C acima desse limite.

⁵⁴ “O fator decremental é a razão entre a amplitude de temperatura na superfície interna de contato e a amplitude externa” (LIZ, 2016, p.69). Ele “indica a redução de temperatura na superfície de contato em comparação com a temperatura do ar externo, no ciclo de um dia. [...] É diretamente proporcional a amplitude de temperatura na superfície de contato, ou seja, quanto maior a variação na temperatura da superfície, maior o fator decremental.” (LIZ, 2016, p. 90).

⁵⁵ Ver zona de conforto para o dia 14/11/2019 no Apêndice D

Figura 86 - Gráfico do comportamento da Ta.sup nas células teste no dia 14/11/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado



Fonte: Elaborado pelo autor

A amplitude térmica foi idêntica nos sistemas SV e TV-cr (Tabela 24). Embora o sistema sem vegetação (SV) tenha proporcionado o maior atraso térmico entre os cinco sistemas monitorados e tenha sido mais eficiente no amortecimento das mínimas Ta.sup, o telhado verde com *Callisia repens* (TV-cr) apresentou a menor máxima Ta.sup e foi mais eficiente para reduzir os valores máximos, comportamento desejável, uma vez que o período monitorado é quente e seco. Quanto ao atraso térmico, SV apresentou um atraso de 4h do valor máximo de Ta.sup, diferente dos resultados apresentados por Liz (2016), em que a vegetação permitiu um maior atraso (5,95h) que no sistema sem vegetação (5,10h).

Tabela 24 - Ta.sup máxima, Ta.sup mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 14/11/2019

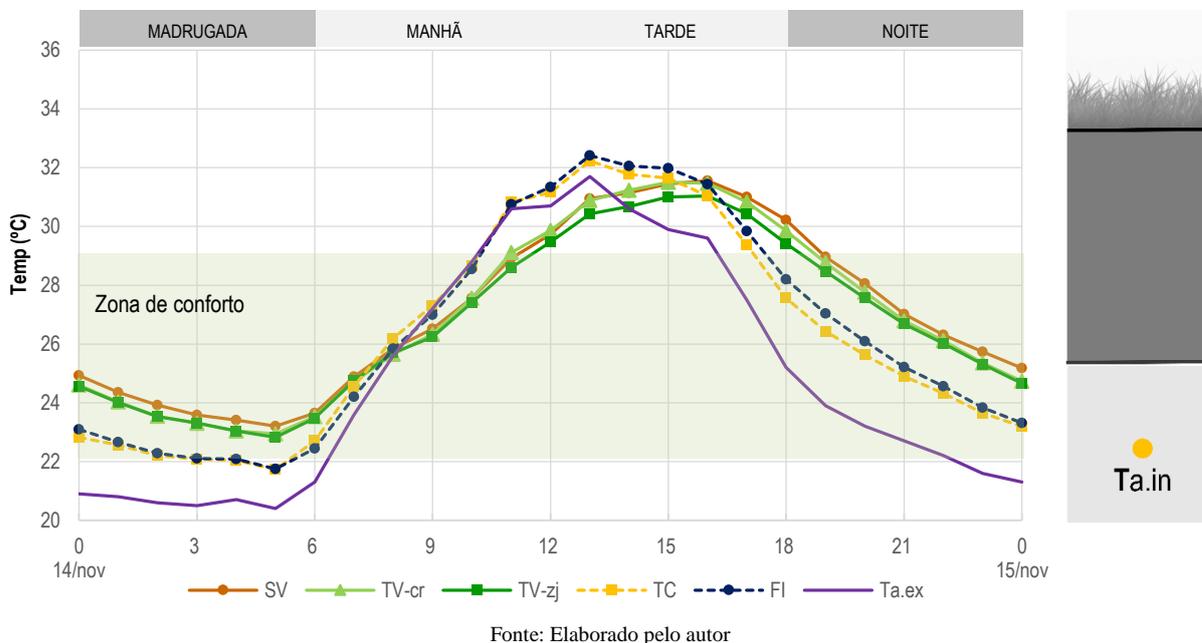
Ta.sup	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
				Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
SV	30,5	23,8	6,7	-1,2	3,4	4	0
TV-cr	30,2	23,5	6,7	-1,5	3,1	3	0
TV-zj	30,6	23,4	7,2	-1,1	3,0	3	0
TC	32,6	21,7	10,9	0,9	1,3	0	0
FI	35,2	21,2	14,0	3,5	0,8	0	0
Ta.ex	31,7	20,4	11,3	-	-	-	-

Fonte - Elaborado pelo autor

A **temperatura do ar interno** (Ta.in) monitorada no dia 14 de novembro de 2019 é apresentada graficamente na Figura 87. A Ta.in no sistema sem vegetação (SV) repete o mesmo padrão de comportamento encontrado nas variáveis anteriores (Ts.in, Ta.sup), permanecendo

mais elevada que nos demais sistemas no final da tarde, noite e madrugada, alcançando uma diferença com o TV-zj de $0,81^{\circ}\text{C}$ às 18h.

Figura 87 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste no dia 14/11/2019, com destaque (tarja na cor verde) para a faixa de conforto do dia monitorado



Entre as 6h e 10h, as diferenças entre SV e os telhados verdes foram pequenas, menores que $0,3^{\circ}\text{C}$. Nos demais horários, TV-zj se comportou com os menores valores da Ta.in enquanto TV-cr foi mais próxima da temperatura do ar interno no sistema sem vegetação (SV) (exceção apenas no fim da noite e início da madrugada), diferente das variáveis anteriores em que geralmente era o mais afastado do SV. Comportamento semelhante foi verificado na Etapa 02 (seção 5.2.2) em que a Ta.in monitorada no telhado verde com *Callisia repens* ficou bastante próxima aos valores encontrados no telhado verde com *Desmodium triflorum*, que não possuía a totalidade de cobertura vegetal do substrato, condição amplificada no sistema sem vegetação (SV).

Todas as coberturas avançaram os $29,09^{\circ}\text{C}$, limite superior da zona de conforto para o dia 14/11/2019. O TV-zj foi o sistema que permaneceu mais próximo desse limite entre as cinco coberturas. Ele também foi o único que teve seu pico de temperatura do ar interno (Ta.in) abaixo ($0,7^{\circ}\text{C}$) da temperatura do ar externo (Ta.ex), apesar de ter apresentado um atraso de 3h na ocorrência desse valor máximo, o mesmo encontrado no sistema sem vegetação (SV).

A menor amplitude térmica ($8,2^{\circ}\text{C}$) e a menor máxima ($31,0^{\circ}\text{C}$) foram encontradas no telhado verde com *Zoysia japonica*, mas a cobertura sem vegetação (SV) apresentou amplitude bem próxima ($8,3^{\circ}\text{C}$) e se destacou no amortecimento das mínimas, assim como na análise dos parâmetros da variável anterior (Ta.sup) (Tabela 25).

Tabela 25 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico no dia 14/11/2019

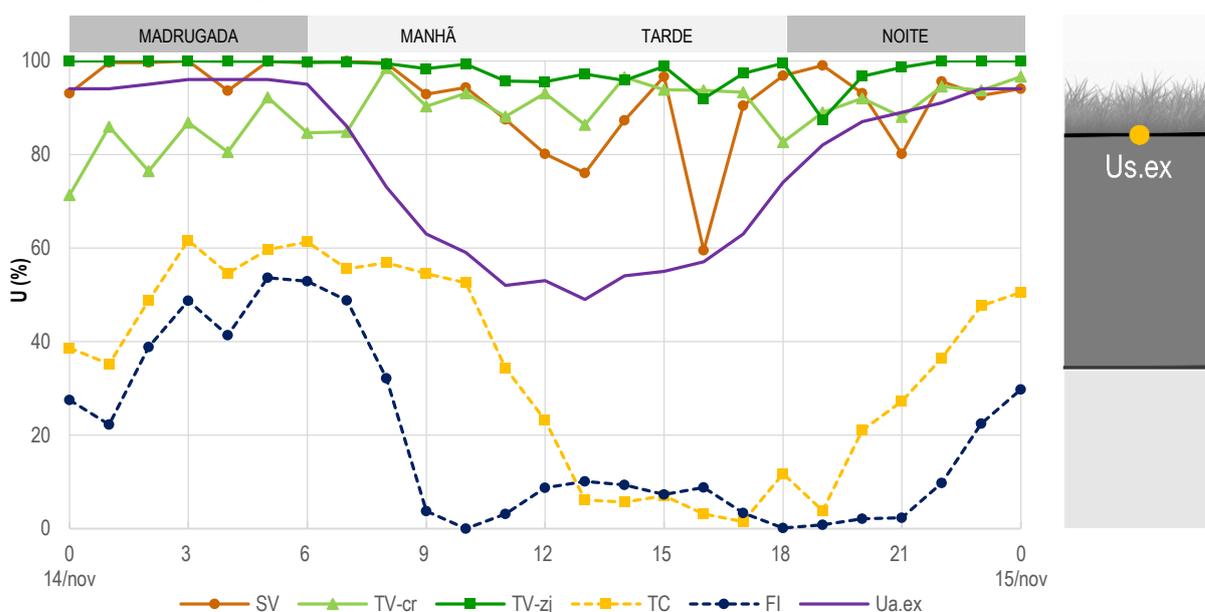
Ta.in	Máxima (°C)	Mínima (°C)	ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
				Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
SV	31,5	23,2	8,3	-0,2	2,8	3	0
TV-cr	31,5	22,9	8,6	-0,2	2,5	2	0
TV-zj	31,0	22,8	8,2	-0,7	2,4	3	0
TC	32,2	21,7	10,5	0,5	1,3	0	0
FI	32,4	21,7	10,7	0,7	1,3	0	0
Ta.ex	31,7	20,4	11,3	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.3 Umidades (Us.ex, Us.in, Ua.sup e Ua.in)

O gráfico da **umidade superficial externa** (Us.ex) monitorada na Etapa 03 (presença/ausência da vegetação – novembro de 2019, período quente e seco), apresenta o telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj – cor verde escuro) com valores bem próximos ao valor máximo (100%) com mais frequência que a mesma cobertura apresentou na Etapa 01 (desempenho térmico - julho de 2019, período quente e úmido), possivelmente devido à maior estabilização da espécie na cobertura. Na Etapa 01 o monitoramento foi realizado após 15 dias do plantio, enquanto nesta etapa foram 120 dias a mais, que permitiram a Us.ex permanecer acima dos 87% em todo o dia monitorado (Figura 88).

Figura 88 - Gráfico do comportamento da Us.ex nas coberturas no dia 14/11/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

O menor valor relativo da umidade superficial externa na espécie *Callisia repens* (TV-cr – cor verde claro) ocorreu às 0h (71,3%), mas durante a maior parte do período monitorado,

ele permaneceu acima de 80%, assim como a cobertura sem vegetação (SV – cor marrom), que teve seu menor valor às 16h (59,5%). É importante lembrar que o sistema SV recebeu irrigação nos mesmos horários e dias que os telhados verdes, já que o foco desta etapa foi a análise da influência da presença da vegetação, e ela deve ser a única variável entre as coberturas.

Diferente dos telhados verdes, o sistema sem cobertura vegetal apresentou grandes oscilações da Us.ex, principalmente no período diurno, uma vez que a ausência de sombreamento e a incidência direta da radiação solar provocaram uma evaporação do conteúdo de umidade mais rápida na superfície do substrato. Esses efeitos permitiram que essa cobertura alcançasse a maior variação de umidade (40,5%) entre as três coberturas com laje (Tabela 26). A altura e densidade da massa vegetal proporcionada pela espécie *Callisia repens* no TV-cr levaram essa cobertura a apresentar valores de Us.ex menores que nas demais coberturas durante a madrugada, pois a camada de ar criada pela vegetação funciona como isolante para a cobertura.

Tabela 26 - Us.ex máxima, Us.ex mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019

Us.ex	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
SV	100,0	59,5	40,5
TV-cr	98,5	71,3	27,2
TV-zj	100,0	87,5	12,5
TC	61,6	1,5	60,1
FI	53,6	0	53,6
Ua.ex	96,0	49,0	47,0

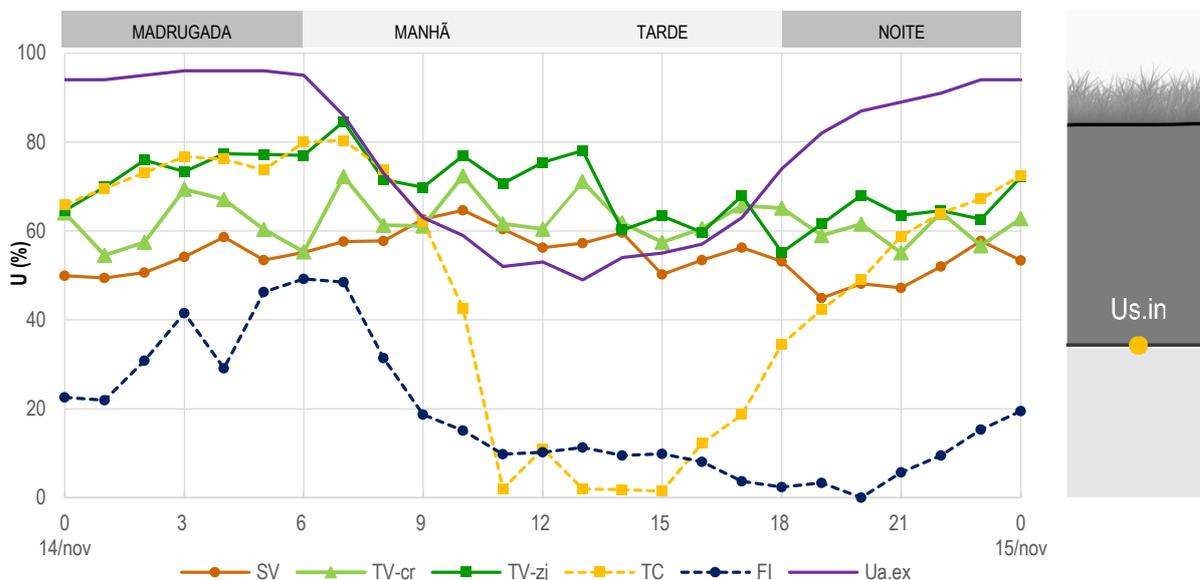
Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores máximos de umidade superficial externa foram alcançados pelo telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj), que apresentou a menor variação de umidade entre todas as coberturas (12,5%), resultado da maior estabilização da espécie e da camada densa que o conjunto folhas, caules, raízes e substrato formam. A cobertura com telha de fibrocimento (FI) apresentou os menores valores tanto de máxima como de mínima Us.ex, assim como observado na Etapa 01 (ver Tabela 12 na seção 5.1.3), enquanto a maior variação de umidade ocorreu na cobertura com telha cerâmica (TC – 60,1%).

Ao contrário da Us.ex, a **umidade superficial interna** (Us.in) nos sistemas com laje (SV, TV-cr e TV-zj) se apresentou menor que 80% durante todo o monitoramento, mas não ficou abaixo de 44% (Figura 89). Até às 13h a presença de vegetação permitiu maiores valores de Us.in que no sistema sem cobertura vegetal. As maiores diferenças ocorreram na espécie *Zoysia japonica*, que às 7h apresentou 64,9% de Us.in e o SV, 57,6%. Além disso, a Us.in

encontrada pela *Zoysia japonica* (TV-zj) foi maior que na cobertura com *Callisia repens* (TV-cr). A partir das 13h, os valores de $U_{s.in}$ nessas três coberturas se aproximaram e oscilaram entre eles, mas a cobertura sem vegetação continuou com os menores valores, devido à boa parte da umidade ser perdida na evaporação com o solo exposto.

Figura 89 - Gráfico do comportamento da $U_{s.in}$ nas coberturas no dia 14/11/2019



Os resultados dos parâmetros calculados (Tabela 27) são bem semelhantes aos encontrados na umidade superficial externa desta etapa. Telhado verde com *Zoysia japonica* teve os maiores valores de $U_{s.in}$, a telha de fibrocimento os menores, e telha cerâmica a maior variação de umidade. Nesta variável, o sistema sem vegetação não apresentou altos valores de umidade, pelo contrário, apresentou a menor máxima entre as coberturas com laje (64,6%). A menor variação de umidade foi encontrada no TV-cr (17,9%) enquanto o TV-zj, que apresentou a menor ΔU da $U_{s.ex}$, agora possui o maior valor entre as coberturas com laje (29,4%).

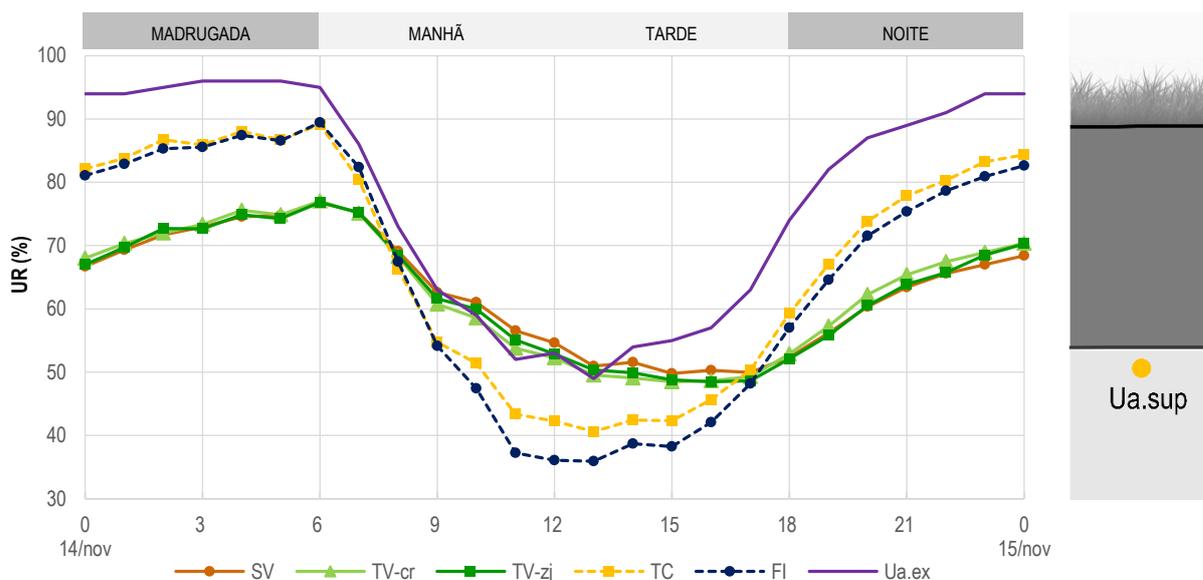
Tabela 27 - $U_{s.in}$ máxima, $U_{s.in}$ mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019

$U_{s.in}$	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
SV	64,6	44,9	19,7
TV-cr	72,4	54,5	17,9
TV-zj	84,6	55,2	29,4
TC	80,4	1,5	78,9
FI	46,9	0	46,9
Ua.ex	96,0	49,0	47,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores da **umidade relativa do ar próximo a superfície interna** ($U_{a.sup}$) apresentaram grandes diferenças de comportamento entre as células teste com telhas (TC e FI), laje (SV, TV-cr e TV-zj) e os valores externos de umidade ($U_{a.ex}$) (Figura 90). As diferenças na $U_{a.sup}$ oriundas das diferentes espécies ou pela ausência de vegetação no telhado verde não foram significativas, pois só atingiram 2,7% (TV-cr e SV às 11h), valor menor que a precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$).

Figura 90 - Gráfico do comportamento da $U_{a.sup}$ nas coberturas no dia 14/11/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Os telhados verdes e a cobertura sem vegetação se apresentaram eficazes na redução da umidade relativa no período noturno, pois se comportaram com menores valores do que TC e FI, além de estarem mais afastados do gráfico da $U_{a.ex}$ que no período quente e úmido (ver Figura 71 na seção 5.1.3), com diferenças acima de 20% nos períodos de madrugada e noite (por exemplo, às 20h a $U_{a.sup}$ no SV é de 60,3% e a $U_{a.ex}$ é 87%, uma diferença de 26,7%). Apenas entre 9h e 15h as coberturas com laje ficaram com valores bem próximos a $U_{a.ex}$, nos demais horários elas se apresentaram com valores menores que os externos.

A ausência de diferenças entre TV-cr, TV-zj e SV se reflete nos parâmetros $U_{a.sup}$ máxima, mínima e variação de umidade, como mostra a Tabela 28. Apesar da menor ΔU ter sido alcançada pelo sistema sem vegetação (SV), as coberturas com telhado verde apresentaram valores bem próximos a ele (1,5% para TV-cr e 1,3% para TV-zj). Esse mesmo comportamento ocorreu nas máximas e mínimas $U_{a.sup}$. A maior variação de umidade foi encontrada na cobertura com telha de fibrocimento (53,5%), que também apresentou a maior máxima (89,4%)

e a menor mínima (35,9%), por ser uma telha bastante suscetível às variáveis externas, consequência de sua baixa espessura.

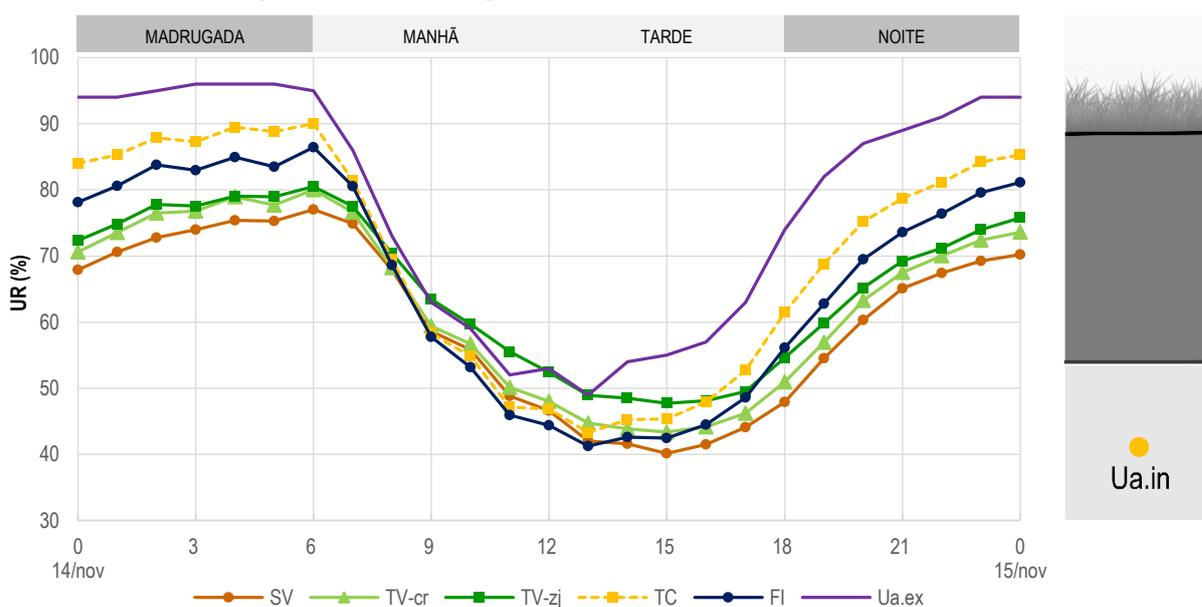
Tabela 28 – Ua.sup máxima, Ua.sup mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019

Ua.sup	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
SV	76,8	49,8	27,0
TV-cr	77,0	48,5	28,5
TV-zj	76,8	48,5	28,3
TC	89,1	40,6	48,5
FI	89,4	35,9	53,5
Ua.ex	96,0	49,0	47,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, quanto à **umidade relativa do ar interno** (Ua.in), há diferenças gráficas mais perceptíveis entre SV, TV-cr e TV-zj (Figura 91). A espécie *Zoysia japonica* foi a única que permitiu que a Ua.in de sua célula teste ficasse acima da Ua.ex, mesmo assim, a maior diferença, registrada às 11h, não é maior que 3,5% (Ua.in no TV-zj é 55,5% e Ua.ex é 52%). Com relação à presença da vegetação, os valores apresentados por SV foram menores que nos telhados verdes durante todo o monitoramento. O TV-zj apresentou os maiores valores de Ua.in e o TV-cr teve comportamento próximo ao TV-zj nos períodos madrugada e noite, e próximo ao SV durante manhã e tarde. A maior diferença encontrada (7,6%) ocorreu às 15h, quando a célula com TV-zj apresentou 47,7% de Ua.in e o SV, 40,1%.

Figura 91 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas no dia 14/11/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Os menores valores de umidade do ar interno (máx.: 77,0% e mín.: 40,1%) foram encontrados no sistema sem vegetação (SV), enquanto os maiores (máx.:90,0% e mín.:47,1%) ocorreram na telha cerâmica (TC) e no telhado verde com *Zoysia japonica* (TV-zj), respectivamente (Tabela 29). A menor variação de umidade foi encontrada no TV-zj (32,7%) e a maior no TC (46,7%), assim como na análise da ΔU da Ua.in nas duas etapas anteriores, Etapa 01 e 02 (ver Tabelas 15 e 20 nas seções 5.1.3 e 5.2.3, respectivamente).

Tabela 29 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade no dia 14/11/2019

Ua.in	Máxima (%)	Mínima (%)	ΔU Variação de umidade (%)
SV	77,0	40,1	36,9
TV-cr	80,0	43,3	36,7
TV-zj	80,4	47,7	32,7
TC	90,0	43,3	46,7
FI	86,4	41,2	45,2
Ua.ex	96,0	49,0	47,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.4 Considerações sobre os resultados da Etapa 03

Analisando os diferentes comportamentos nas temperaturas monitoradas oriundos da presença/ausência de vegetação nas coberturas desta etapa, percebe-se que na temperatura superficial externa (Ts.ex) o sistema sem vegetação (SV) apresentou uma amplitude térmica pelo menos 4,0°C maior que nos telhados verdes (TV-cr e TV-zj), obtendo também a menor mínima Ts.ex e maiores valores máximos de Ts.ex que nos sistemas com *Zoysia japonica* e *Callisia repens*. Na temperatura superficial interna (Ts.in), SV continuou com uma amplitude térmica maior que os telhados verdes. Quanto à temperatura do ar próximo à superfície interna (Ta.sup), apenas durante madrugada e noite foram registradas diferenças em torno de 1,0°C entre SV e TV-cr. Essas mesmas coberturas apresentaram amplitude térmica igual, que também foi a menor entre todas as coberturas. Já o atraso térmico foi maior no sistema sem vegetação que nos dois telhados verdes. Na temperatura do ar interno da célula teste (Ta.in), SV se comportou com valores mais elevados que as coberturas com vegetação no final da tarde, noite e madrugada. Quanto aos parâmetros dessa variável, de maneira geral, são muito próximos entre os telhados verdes (TV-cr e TV-zj) e o sistema sem vegetação (SV).

A umidade superficial externa (Us.ex) nas coberturas SV, TV-cr e TV-zj ficou majoritariamente acima de 80% em todo o monitoramento, em que o sistema sem vegetação se comportou com uma maior variação de umidade que os telhados verdes. Os valores da umidade

superficial interna (Us.in) ficaram abaixo dos 80%, mas não foram menores que 40%. Nessa variável, a cobertura SV apresentou menores valores que as coberturas vegetadas (TV-cr e TV-zj). Quanto à umidade relativa do ar próximo à superfície interna (Ua.sup), não há diferenças significativas entre essas três coberturas e seus parâmetros analisados também são bastante próximos. Por fim, o comportamento da umidade relativa do ar interno (Ua.in) apresentou diferenças que chegaram a 7% (15h), quando a presença de vegetação aumentou o conteúdo de umidade no interior da célula teste.

5.4 Etapa 04 – Influência da irrigação

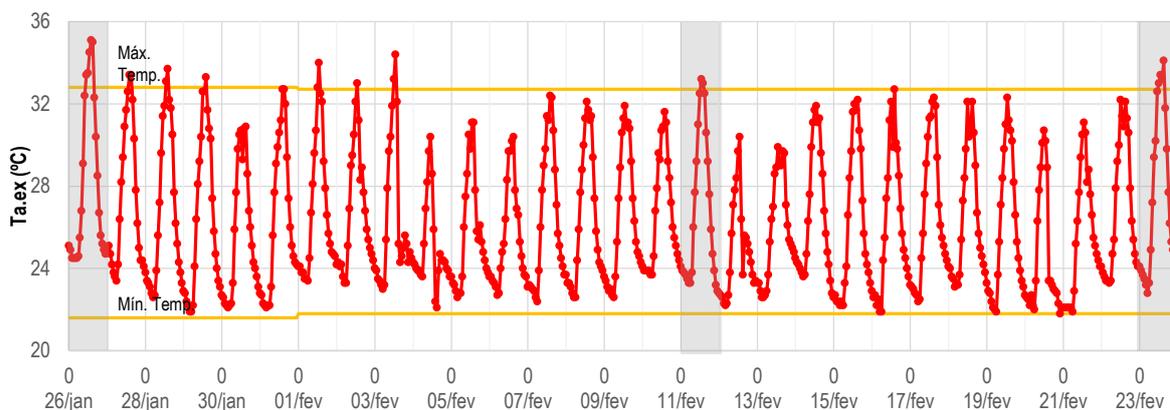
Nesta etapa, diferente das anteriores, o período de monitoramento foi de aproximadamente um mês (26 de janeiro a 23 de fevereiro de 2020 – 29 dias)⁵⁶. Serão apresentados os dados do comportamento climático desse período e, na análise da temperatura do ar interno (Ta.in) e umidade relativa do ar interno (Ua.in), três dias típicos do período quente e seco terão destaque pois caracterizam diferentes fases do tratamento de irrigação, serão eles: 26 de janeiro de 2020 (início), 11 de fevereiro de 2020 (durante) e 23 de fevereiro de 2020 (fim). Esses dias foram escolhidos por apresentarem os seguintes comportamentos: temperatura do ar externo (Ta.ex) acima ou bastante próxima a média das máximas para o mês correspondente; umidade relativa do ar externo (Ua.ex) abaixo ou bastante próxima à média das mínimas para o mês analisado; radiação solar global com o mínimo de influência da nebulosidade; e ausência de precipitação, pelo menos no dia anterior.

5.4.1 Comportamento climático

As Figuras 92, 93 e 94 apresentam, respectivamente, os gráficos do comportamento da temperatura do ar externo (Ta.ex), umidade relativa do ar externo (Ua.ex) e pluviosidade (Plu) no período entre 26 de janeiro e 23 de fevereiro de 2020.

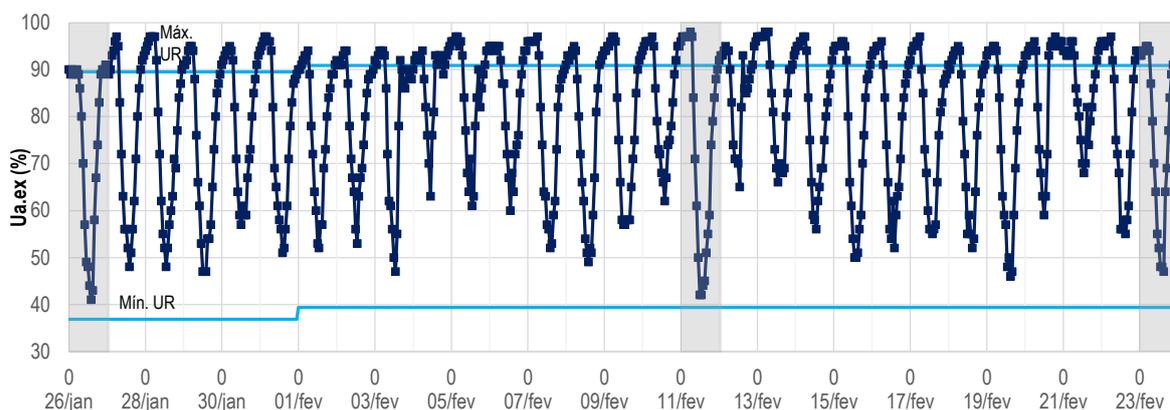
⁵⁶ O primeiro dia de monitoramento corresponde ao 24º dia de estabelecimento da *Zoysia japonica* nas três células teste, uma vez que para a padronização do experimento foi necessário o plantio da grama-esmeralda em todas as células teste no dia 02 de janeiro de 2020.

Figura 92 - Gráfico do comportamento da Ta.ex de 26/01/2020 a 23/02/2020 e média das temperaturas mínimas e máximas diárias para os meses de janeiro e fevereiro, de acordo com Silva (2019)



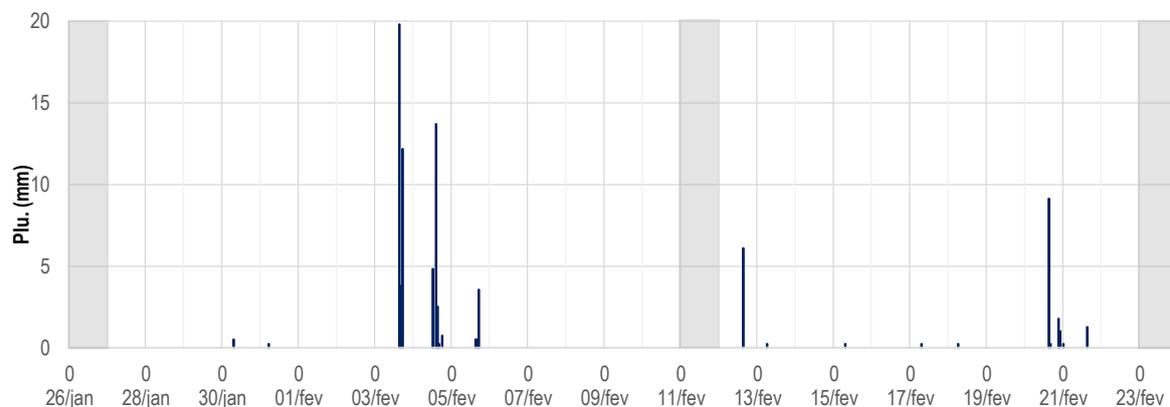
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 93 - Gráfico do comportamento da Ua.ex de 26/01/2020 a 23/02/2020 e média das umidades relativas mínimas e máximas diárias para os meses de janeiro e fevereiro, de acordo com Silva (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 94 - Gráfico do comportamento da pluviosidade de 26/01/2020 a 23/02/2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Nos 29 dias de coleta de dados, apenas alguns deles (26 a 29/01/2020, e 01, 02, 03, 11 e 23/02/2020) atingiram temperaturas do ar máximas maiores que a média das máximas para

os meses de janeiro (32,8°C) e fevereiro (32,7°C). O valor mais alto foi atingido às 14h do dia 26/01/2020 (35,1°C), enquanto o mais baixo (22,8°C) ocorreu às 22h do dia 20/02/2020 e coincidiu com a média das mínimas para o mês de fevereiro. A umidade relativa do ar externo ultrapassou a média das máximas (90,9%) e, apesar de não se apresentar menor que a média das mínimas (39,4%) em nenhum dia, chegou a valores bem próximos, como é o caso dos dias 26 de janeiro, 03, 08, 11, 19 e 23 de fevereiro, nos quais a umidade relativa do ar atingiu 41% às 14h do dia 26/01/2020.

Dias que apresentaram temperatura do ar acima da média das máximas temperaturas e umidade relativa do ar abaixo ou bastante próximo à média das mínimas umidades relativas podem ser caracterizados como típicos para o período quente e seco do clima em estudo, assim os dias 26 de janeiro, 11 de fevereiro e 23 de fevereiro se enquadram nessa categoria. Apesar dos altos valores de Ta.ex (temperatura do ar externo) e da Ua.ex (umidade relativa do ar externo) registrados nesses dias, apenas a variação da umidade no dia 11 de fevereiro e a amplitude da temperatura no dia 23 de fevereiro ficaram acima dos valores de variação e amplitude calculados a partir das médias mensais de cada mês, como apresenta a Tabela 30.

Tabela 30 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020

	26/01/2020		11/02/2020		23/02/2020		Média mensal - JAN SILVA (2019)		Média mensal - FEV SILVA (2019)	
	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)
Máxima	35,1	91,0	33,2	98,0	34,1	95,0	32,8	89,5	32,7	90,9
Mínima	24,5	41,0	23,3	42,0	22,8	47,0	21,6	36,9	21,8	39,4
Amplitude / Variação	10,6	50,0	9,9	56,0	11,3	48,0	11,2	52,9	10,9	51,5

Fonte: Elaborado pelo autor

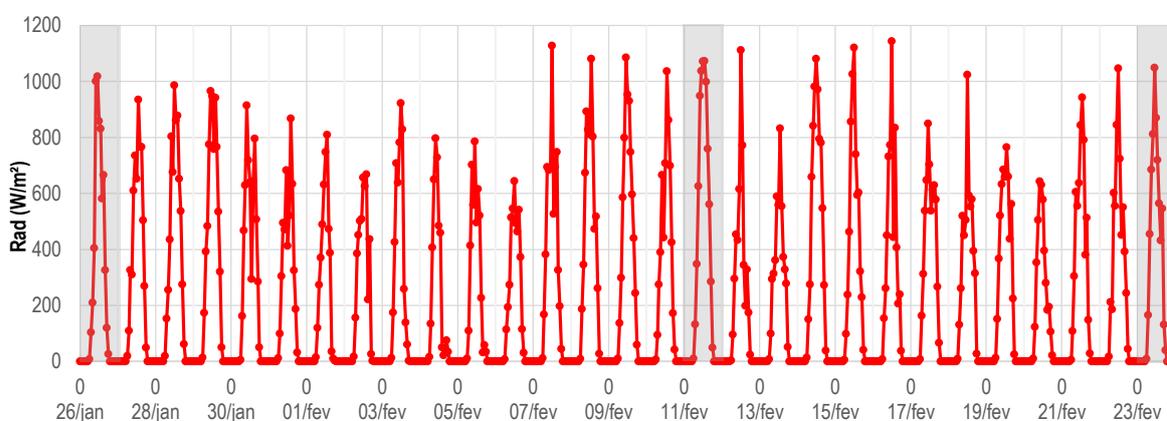
Como apresentado na Figura 94, a estação meteorológica registrou precipitação significativa (acima de 1,00mm) em alguns dias do período monitorado, foram eles: 03, 04, 05, 12, 20 e 21 de janeiro de 2020, com 35,81mm, 22,10mm, 4,58mm, 6,10mm, 12,19mm e 1,52mm de pluviosidade diária, respectivamente. Nesses dias, as chuvas ocorreram majoritariamente entre às 14h e 18h, com ocorrências também entre às 21 e 0h. Os dias 26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020 não apresentaram precipitação⁵⁷.

Quanto aos dados de velocidade do ar, o anemômetro da estação meteorológica Davis® Vantage Pro2™, utilizada para o monitoramento das variáveis ambientais, apresentou erros no registro dessa variável, por isso os dados de ventilação dessa etapa foram descartados.

⁵⁷ O último dia que ocorreu chuva antes do período monitorado foi 23 de fevereiro, com valores horários de 0,25mm (0, 2 e 17h), 2,29mm (18h) e 2,54mm (19h), totalizando 5,58mm de precipitação diária para o dia 23/02/2020.

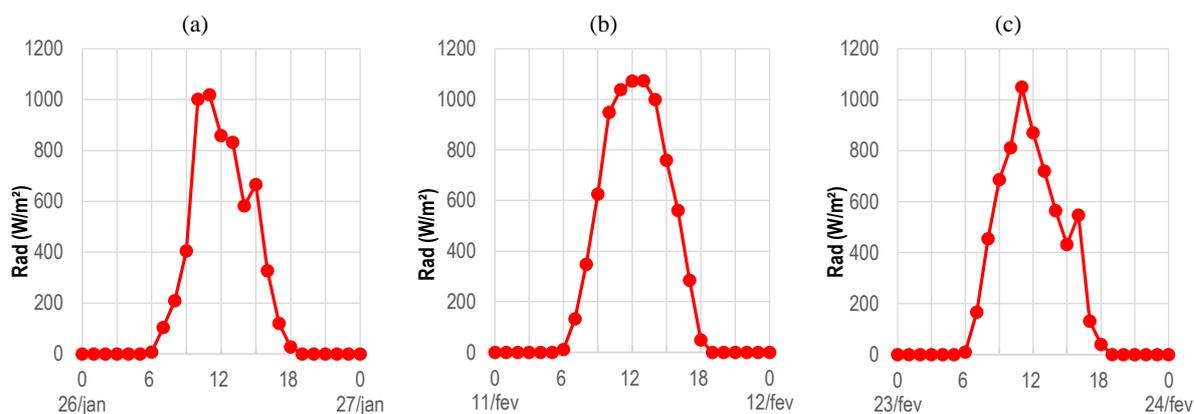
Os dados de radiação solar desse período são apresentados no gráfico da Figura 95. A maioria dos dias monitorados apresentou pico de radiação menor que $1000,0\text{W/m}^2$. O maior valor, $1144,0\text{W/m}^2$, ocorreu às 12h no dia 16/02/2020, enquanto os dias 26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020 apresentam picos de $1019,0\text{W/m}^2$ (11h), $1074,0\text{W/m}^2$ (13h) e $1050,0\text{W/m}^2$ (11h), respectivamente. Pelo comportamento da parábola da radiação solar global nesses dias, apenas o dia 11/02/2020 não aparenta presença de nebulosidade devido ao comportamento gráfico contínuo ascendente e descendente, diferente dos outros dois dias que indicam influência das nuvens no comportamento da radiação entre as 10 e 15h (Figura 96).

Figura 95 - Gráfico do comportamento da radiação solar global de 26/01/2020 a 23/02/2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 96 - Gráficos do comportamento da radiação solar global nos dias (a) 26/01/2020, (b) 11/02/2020 e (c) 23/02/2020

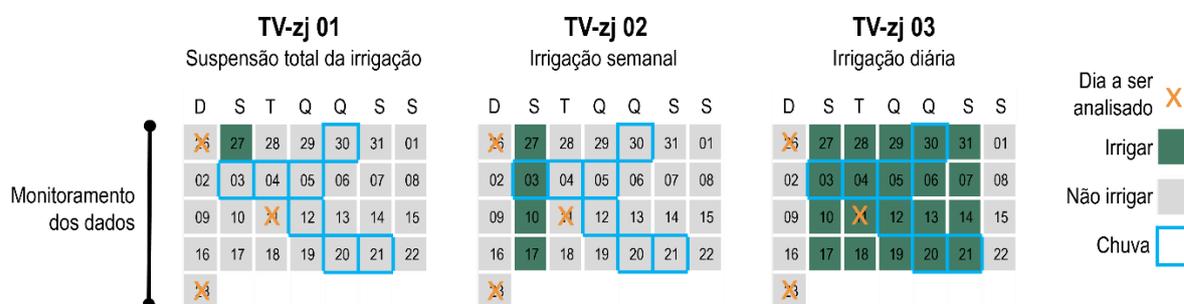


Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados apresentados mostram que os dias 26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020 se caracterizam como típicos do período quente e seco, sem precipitação e com radiação solar acima de $1000,0\text{W/m}^2$.

A ocorrência de chuvas durante o período de monitoramento teve impacto no comportamento da vegetação nas células teste, uma vez que algumas coberturas deveriam passar determinados períodos de tempo sem receber água. Por outro lado, a alternância de períodos com chuva e ensolarados permitiu estudar o comportamento do telhado verde de maneira natural, sem nenhuma manutenção. Houve a coincidência de dias de irrigação e precipitação, já que a primeira foi realizada no período da manhã e a chuva ocorreu geralmente durante a tarde. A Figura 97 ilustra o período de monitoramento com destaque para os dias em que a cada telhado verde recebeu água por irrigação ou chuva⁵⁸, além dos dias típicos a serem analisados particularmente (26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020).

Figura 97 - Período de monitoramento da Etapa 04 com destaque para os tratamentos de irrigação e a ocorrência de precipitação

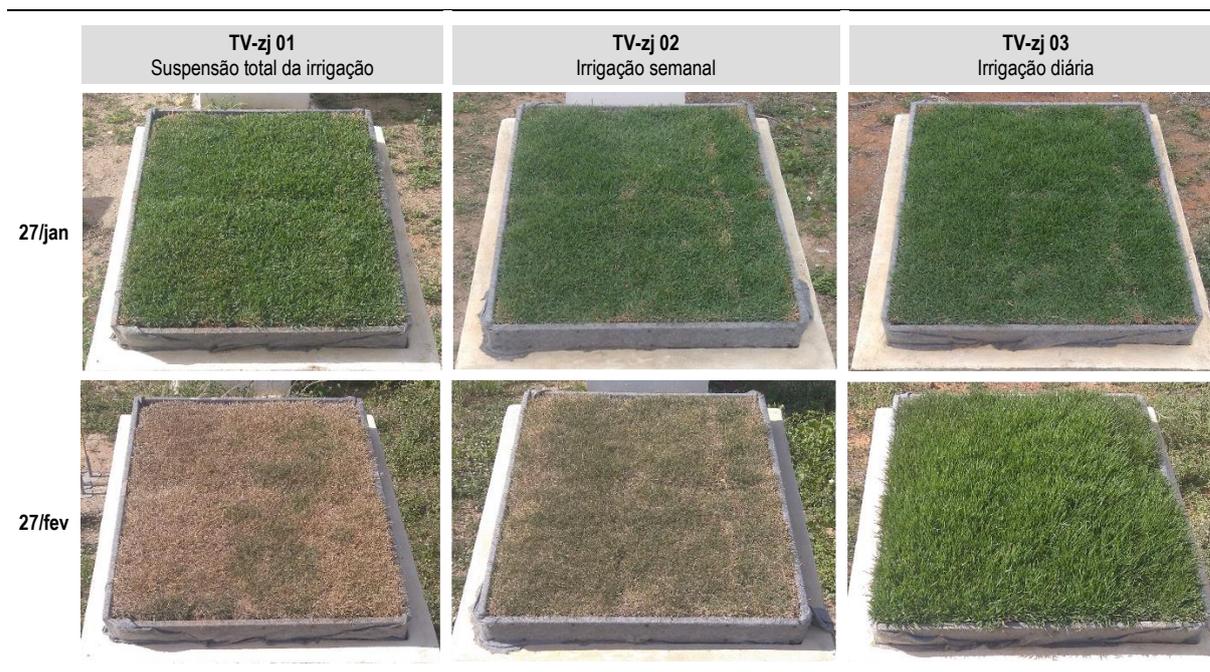


Fonte: Elaborado pelo autor

Os diferentes tratamentos de irrigação durante os 29 dias de monitoramento provocaram impactos na aparência e desenvolvimento da *Zoysia japonica*, como ilustra o Quadro 24. Apesar dessa reação da espécie vegetal já ser esperada, a ausência de irrigação diária nos telhados verdes TV-zj 01 e TV-zj 02 não foi tão severa devido à ocorrência de chuvas pelo menos uma vez em cada uma das quatro semanas de monitoramento.

⁵⁸ Apenas os dias que registraram precipitação maior que 0,25mm foram considerados como dias de chuva na Figura 97. Valores iguais ou menores que 0,25mm podem ter sido oriundos da condensação do vapor de água da atmosfera, ou seja do orvalho, e não da precipitação.

Quadro 24 – Aparência inicial (27/01/2020) e final (27/02/2020) da cobertura vegetal nas células teste durante o período de monitoramento da Etapa 04 (irrigação)⁵⁹



Fonte: Elaborado pelo autor

A irrigação diária no TV-zj 03 permitiu um alto crescimento e desenvolvimento da vegetação, mantendo sua coloração verde e seu estado saudável do início ao fim do monitoramento. Os outros telhados verdes tiveram o crescimento das plantas bastante reduzido e as folhas se apresentaram secas e murchas, consequência do déficit de água. Apesar disso, há manchas na coloração verde escura nessas coberturas, principalmente no TV-zj 02 (irrigação semanal), que são folhas apenas murchas, resultado da irrigação ou da precipitação ocorrida no período monitorado.

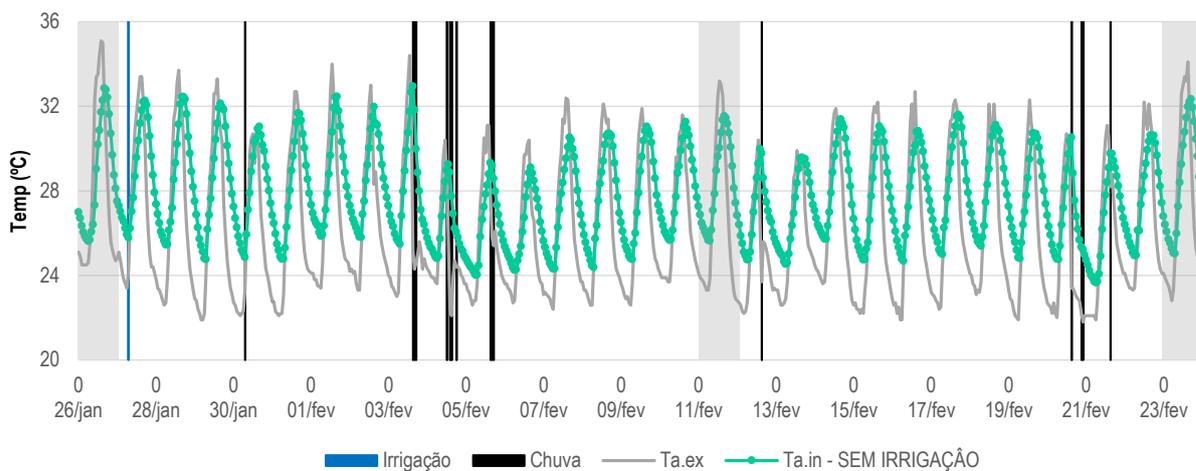
5.4.2 Temperatura do ar interno (Ta.in)

Os gráficos das Figuras 98, 99 e 100 ilustram, respectivamente, o comportamento da temperatura do ar interno nas três coberturas com telhado verde e seus respectivos tratamentos de irrigação⁶⁰: sem irrigação (TV-zj 01), irrigação semanal (TV-zj 02) e irrigação diária (TV-zj 03). Neles está destacado os eventos de irrigação que cada cobertura recebeu (linha vertical na cor azul) e a ocorrência de chuva (linha vertical na cor preto). Graficamente, não há diferenças de comportamento da Ta.in decorrentes do evento irrigação, apenas quando ocorre a precipitação.

⁵⁹ O Apêndice G contém o registro fotográfico da evolução da cobertura vegetal no período de monitoramento da irrigação (Etapa 04).

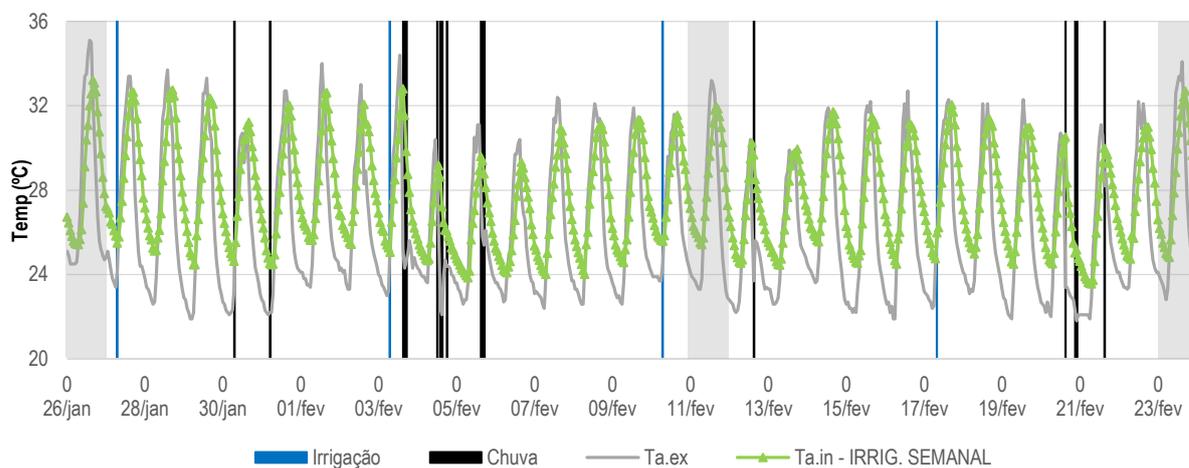
⁶⁰ Por não ser o foco de análise desta etapa, os dados da Ta.in monitorada nas células teste com telha cerâmica (TC) e telha de fibrocimento (FI) são apresentados no Apêndice H.

Figura 98 - Gráfico do comportamento da Ta.in no telhado verde Sem irrigação no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



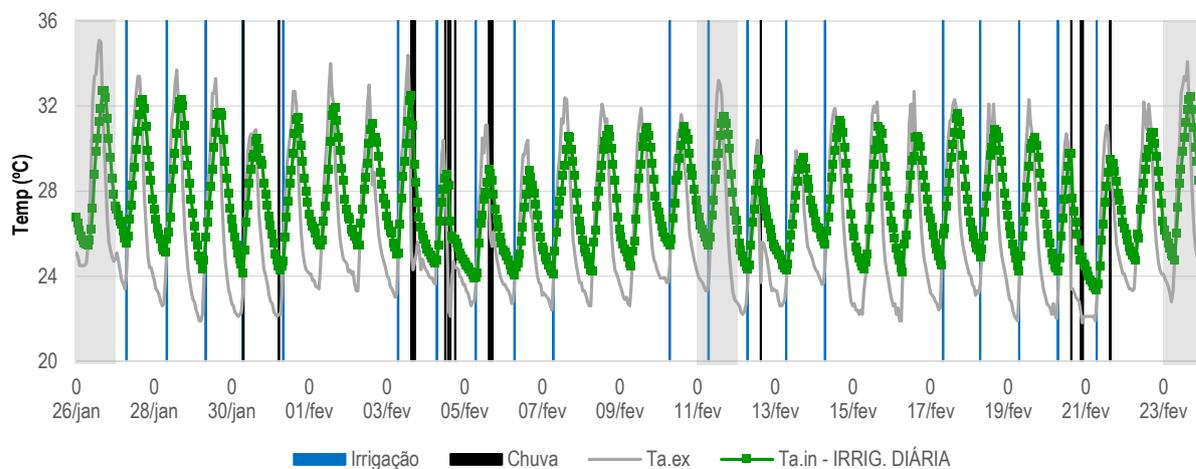
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 99 - Gráfico do comportamento da Ta.in no telhado verde com Irrigação semanal no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 100 - Gráfico do comportamento da Ta.in no telhado verde com Irrigação diária no período de 26/01/2020 a 23/02/2020

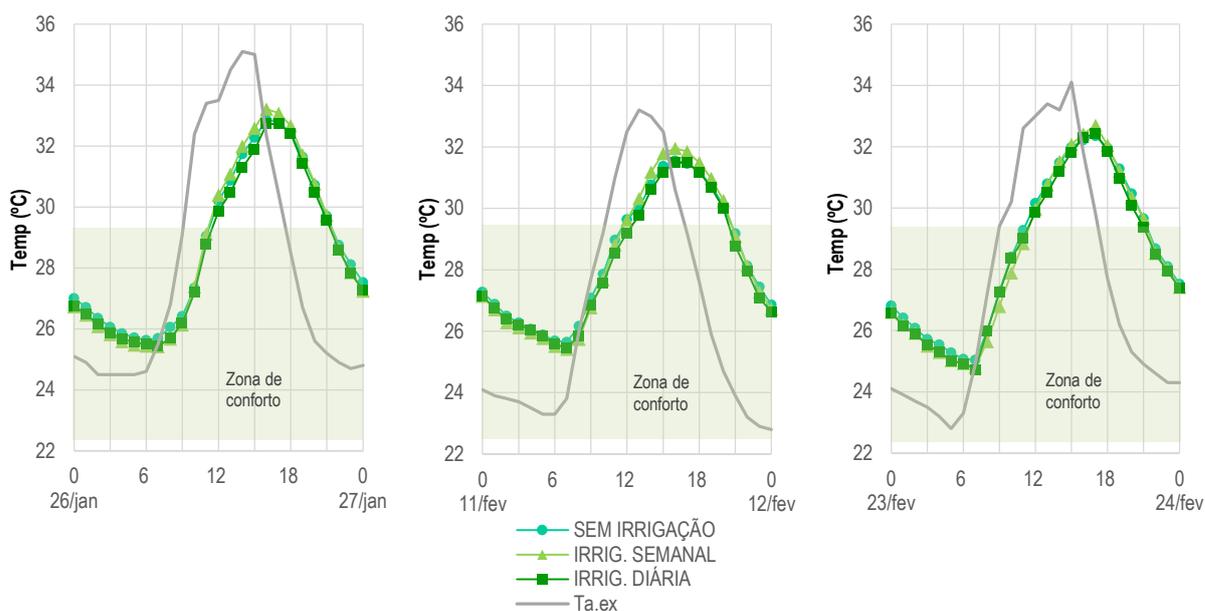


Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma análise geral do comportamento da Ta.in foram calculados os seus valores médios em cada cobertura. Os telhados verdes sem irrigação (TV-zj 01), com irrigação semanal

(TV-zj 02) e diária (TV-zj 03) apresentaram os valores 27,9°C, 27,7°C e 27,5°C de Ta.in média para o período de 29 dias, respectivamente. Houve uma pequena redução de 0,2°C com a utilização da irrigação semanal, e 0,4°C com a irrigação diária, valor considerável por ser maior que a precisão do equipamento ($\pm 0,21^\circ\text{C}$). Analisando o comportamento da Ta.in (temperatura do ar interno) nos dias 26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020 (Figura 101), percebe-se que, novamente, não há grandes diferenças quando as três coberturas são comparadas.

Figura 101 - Gráficos do comportamento da Ta.in (cor verde) nas células teste com os três tratamentos de irrigação nos dias 26/01/2020, 11 e 23/02/2020, comparada a Ta.ex (cor cinza) e a zona de conforto para o respectivo dia (tarja verde)



Fonte: Elaborado pelo autor

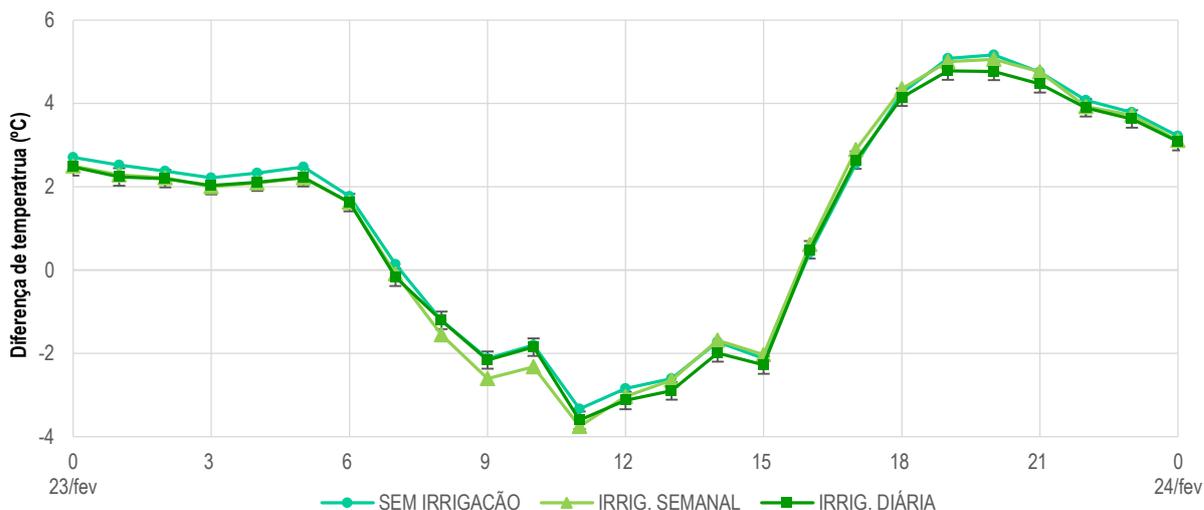
Por representar o efeito final dos diferentes tratamentos de irrigação após os 29 dias de monitoramento dos dados, foram calculadas para o dia 23/02/2020 (último dia de monitoramento) as diferenças entre a temperatura do ar interno (Ta.in) e os valores externos de temperatura do ar (Ta.ex) que resultaram nos dados apresentados numericamente na Tabela 31 e graficamente na Figura 102.

Tabela 31 - Diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ta.ex do dia 23/02/2020

	23 FEV																							24 FEV	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
SEM IR.	2,71	2,52	2,38	2,21	2,34	2,48	1,77	0,14	-1,21	-2,12	-1,80	-3,33	-2,84	-2,60	-1,72	-2,12	0,42	2,55	4,26	5,09	5,16	4,75	4,08	3,79	3,22
IR. SEM.	2,50	2,29	2,22	2,00	2,09	2,22	1,63	-0,09	-1,55	-2,61	-2,32	-3,76	-3,03	-2,64	-1,68	-2,03	0,62	2,89	4,35	5,00	5,06	4,76	3,92	3,72	3,11
IR. DIÁR.	2,48	2,24	2,20	2,03	2,11	2,22	1,62	-0,17	-1,21	-2,16	-1,85	-3,60	-3,13	-2,90	-1,99	-2,28	0,49	2,64	4,15	4,78	4,77	4,47	3,90	3,63	3,09

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 102 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ta.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ta.ex do dia 23/02/2020, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 0,21^{\circ}\text{C}$) no gráfico do telhado verde com IRRG. DIÁRIA



Fonte: Elaborado pelo autor

A maior redução ($3,33^{\circ}\text{C}$) da Ta.ex ocorreu às 11h quando o telhado verde com irrigação semanal se destacou, enquanto o telhado verde sem irrigação obteve o maior aumento da Ta.ex no período noturno ($5,16^{\circ}\text{C}$ às 20h) e foi próximo ao telhado verde com irrigação semanal ($5,06^{\circ}\text{C}$). Quando esses valores são visualizados graficamente observa-se que as diferenças entre eles são próximas à precisão do equipamento durante praticamente todo o dia monitorado (23/02/2020), embora, às 10h, ela tenha atingido $0,52^{\circ}\text{C}$ e $0,47^{\circ}\text{C}$, quando o telhado verde com irrigação semanal é comparado ao sistema sem irrigação e à irrigação diária, respectivamente. A maior diferença entre as coberturas com irrigação diária e sem irrigação foi de $0,39^{\circ}\text{C}$ (20h) no período noturno, mas não ultrapassou $0,29^{\circ}\text{C}$ (12h) durante o período diurno. Ambos foram valores próximos à precisão do equipamento ($\pm 0,21^{\circ}\text{C}$).

Chagolla-Aranda et. al. (2017) encontraram diferenças maiores que $1,0^{\circ}\text{C}$ na laje com telhado verde após o fenômeno de irrigação, mas eles analisaram temperaturas superficiais e não valores internos de temperatura do ar. Já Pianella et. al. (2017), através de simulação computacional, encontraram comportamentos semelhantes entre um telhado verde com 20,0cm de substrato e um telhado verde com 15,0cm quando não é irrigado, além de pequenas diferenças quando a irrigação é frequente e a vegetação espaçada. Uma tendência importante foi verificada no experimento de Liz (2016), no qual o comportamento das curvas de fluxo de calor tendem a se aproximar ao passar do tempo em uma cobertura com substrato úmido e outra com substrato seco, resultado da absorção de umidade na amostra seca e a evaporação da água na amostra úmida.

Os parâmetros calculados para os três dias típicos analisados apresentaram o telhado verde sem irrigação com a menor amplitude térmica e mais eficiente na redução das mínimas Ta.in, pois apresenta os maiores amortecimentos térmicos das mínimas e as maiores mínimas nos três dias. Já o telhado verde com irrigação diária se destacou na redução das máximas Ta.in com o maior amortecimento térmico dos valores máximos de temperatura do ar. Quanto ao atraso térmico, pode-se considerar que não sofreu alteração oriunda dos tratamentos de irrigação (Tabela 32)⁶¹. Apesar desses destaques, as diferenças entre os parâmetros calculados são menores ou muito próximas à precisão do equipamento.

Tabela 32 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020

	Ta.in	Ta.in		ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
		Máxima (°C)	Mínima (°C)		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
26 / JAN	Sem irrig.	32,8	25,6	7,2	-2,3	1,1	2	4
	Irrig. seman.	33,2	25,4	7,8	-1,9	0,9	2	5
	Irrig. diária	32,7	25,4	7,3	-2,4	0,9	2	5
	Ta.ex	35,1	24,5	10,6	-	-	-	-
11 / FEV	Sem irrig.	31,5	25,6	5,9	-1,7	2,8	3	2
	Irrig. seman.	31,9	25,4	6,5	-1,3	2,6	3	2
	Irrig. diária	31,5	25,4	6,1	-1,7	2,6	3	2
	Ta.ex	33,2	23,3	9,9	-	-	-	-
23 / FEV	Sem irrig.	32,5	25,0	7,5	-1,6	2,2	2	2
	Irrig. seman.	32,7	24,8	7,9	-1,4	2,0	2	2
	Irrig. diária	32,4	24,7	7,7	-1,7	1,9	2	2
	Ta.ex	34,1	22,8	11,3	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

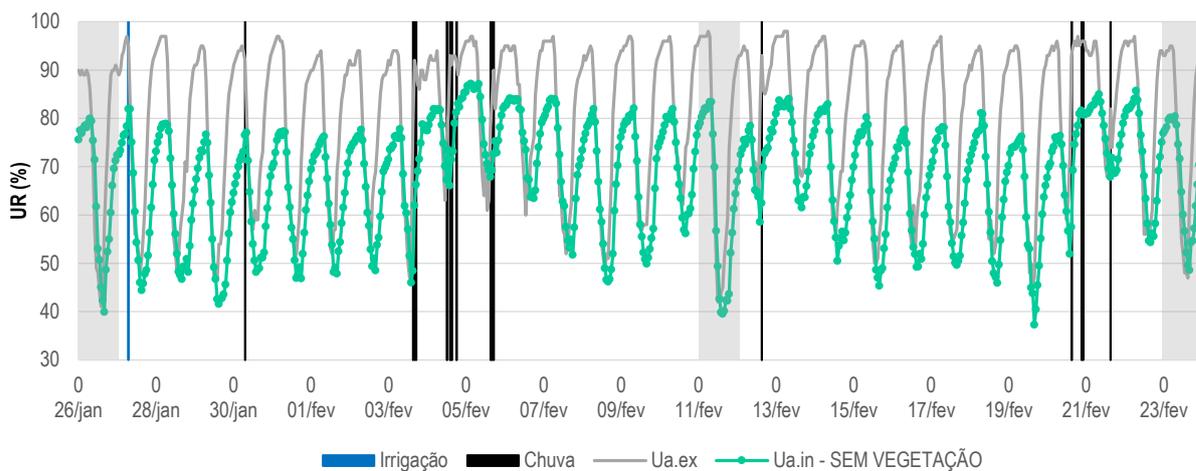
5.4.3 Umidade relativa do ar interno (Ua.in)

A Ua.in monitorada nesta etapa é apresentada graficamente nas Figuras 103, 104 e 105, que exibem os dados da cobertura sem irrigação (TV-zj 01), com irrigação semanal (TV-zj 02) e irrigação diária (TV-zj 02)⁶², além dos eventos de irrigação e chuva do período. Devido à taxa de variação dessa variável, algumas leves diferenças de valores são identificadas nos gráficos, diferente da Ta.in. Mas, novamente, as grandes mudanças de comportamento ocorrem após os eventos de chuva e não irrigação.

⁶¹ A Tabela 38 no Apêndice H apresenta os parâmetros calculados da Ta.in para todas as coberturas. Por não ser o foco de análise desta etapa, os parâmetros calculados da Ta.in nas células teste com telha cerâmica (TC) e telha de fibrocimento (FI) não são apresentados na Tabela 32.

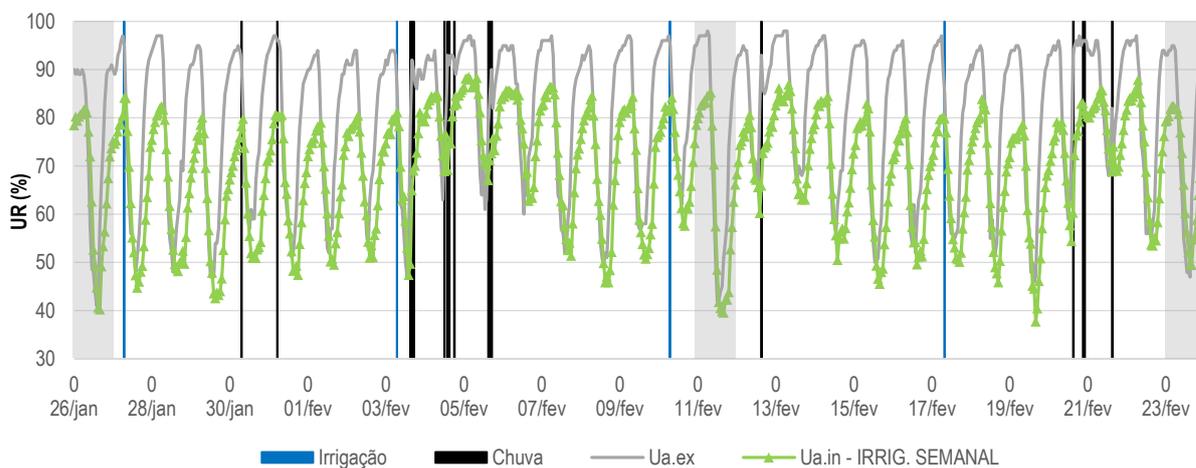
⁶² Por não ser o foco de análise desta etapa, os dados da Ua.in monitorada nas células teste com telha cerâmica (TC) e telha de fibrocimento (FI) são apresentados no Apêndice H.

Figura 103 - Gráfico do comportamento da Ua.in no telhado verde com Sem irrigação no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



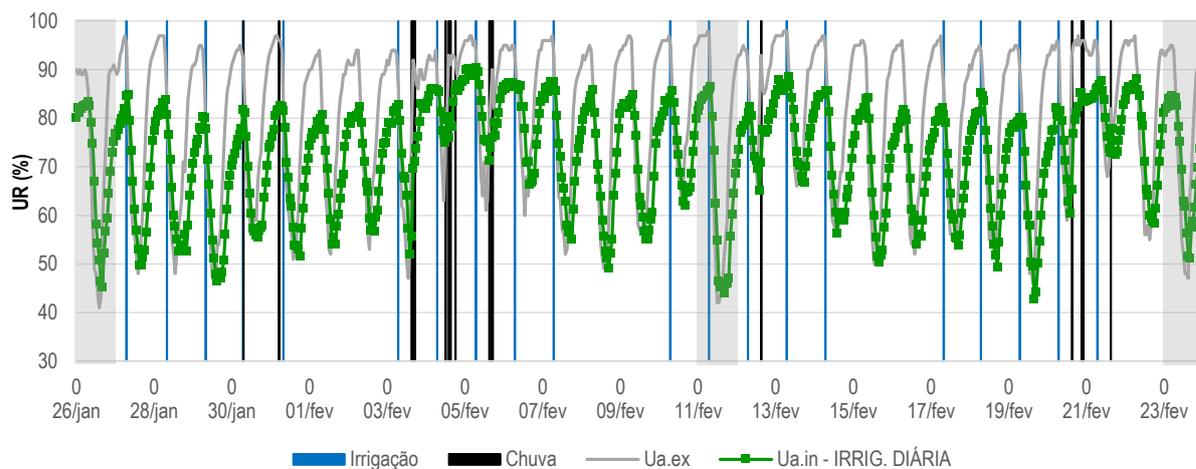
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 104 - Gráfico do comportamento da Ua.in no telhado verde com Irrigação semanal no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 105 - Gráfico do comportamento da Ua.in no telhado verde com Irrigação diária no período de 26/01/2020 a 23/02/2020

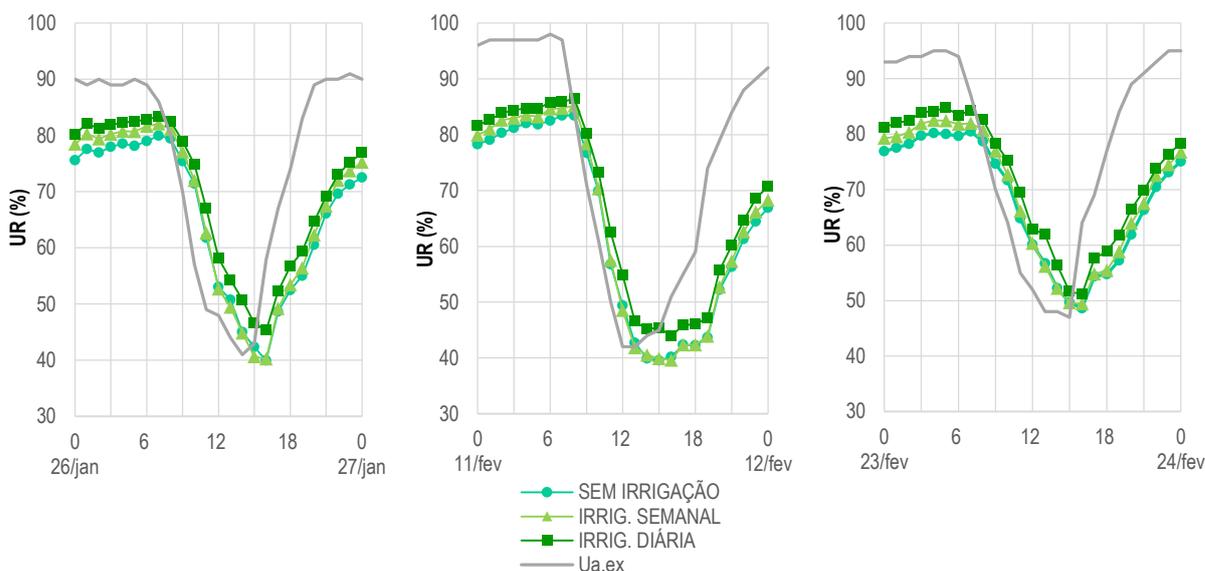


Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores médios de Ua.in apresentaram-se maiores no telhado verde com irrigação diária (TV-zj 03), seguidos da cobertura com irrigação semanal (TV-zj 02) e do telhado sem

irrigação (TV-zj 01), que apresentaram os valores 72,5%, 69,6% e 68,0%, respectivamente. De maneira geral, o comportamento foi coerente com a quantidade de água que foi inserida no substrato, que permitiu o aumento da umidade relativa do ar interno. Apesar do aumento de 4,5% da Ua.in provocado pela irrigação diária, esse valor é bem próximo à precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$). O comportamento dessa variável nos três dias típicos analisados nesta etapa (Figura 106) mostra que há poucas diferenças gráficas entre as coberturas com telhado verde, que estão mais relacionadas a leves diferenças entre os valores monitorados.

Figura 106 - Gráficos do comportamento da Ua.in (cor verde) nas células teste com os três tratamentos de irrigação nos dias 26/01/2020, 11 e 23/02/2020, comparada a Ua.ex (cor cinza)



Fonte: Elaborado pelo autor

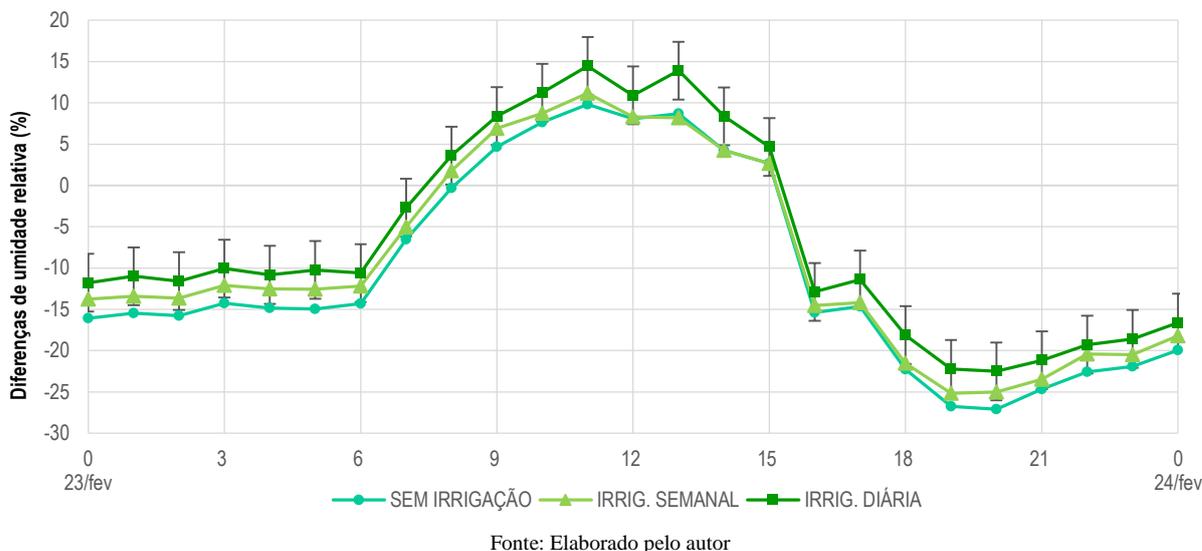
A Tabela 33 e a Figura 107 informam as diferenças entre a Ua.in e os valores externos de umidade relativa do ar (Ua.ex) para o último dia de monitoramento, 23/02/2020, que representa o efeito final dos diferentes tratamentos de irrigação nos telhados verdes após os 29 dias de monitoramento dos dados.

Tabela 33 - Diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ua.ex do dia 23/02/2020

	23 FEV																							24 FEV	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
SEM IR.	-16,1	-15,5	-15,8	-14,3	-14,8	-15,0	-14,3	-6,5	-0,3	4,7	7,6	9,8	8,1	8,7	4,2	2,7	-15,4	-14,7	-22,3	-26,8	-27,1	-24,7	-22,6	-21,9	-19,9
IR. SEM.	-13,7	-13,4	-13,7	-12,1	-12,5	-12,6	-12,2	-5,0	1,8	6,9	8,7	11,2	8,3	8,2	4,2	2,7	-14,5	-14,2	-21,6	-25,2	-25,0	-23,5	-20,4	-20,5	-18,2
IR. DIÁR.	-11,8	-11,0	-11,6	-10,1	-10,8	-10,2	-10,6	-2,7	3,6	8,4	11,2	14,5	10,9	13,9	8,4	4,7	-12,9	-11,4	-18,1	-22,2	-22,5	-21,2	-19,3	-18,6	-16,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 107 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da Ua.in nas células teste com diferentes tratamento de irrigação e a Ua.ex do dia 23/02/2020, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$) no gráfico do telhado verde com IRRIG. DIÁRIA



O maior aumento da Ua.ex ocorreu às 11h e o telhado verde com irrigação diária se destacou com o maior valor (14,5%), enquanto o telhado verde sem irrigação apresentou a maior redução da Ua.ex no período noturno (27,1%). Quando essas diferenças são comparadas à precisão do equipamento, valores significativos são encontrados comparando irrigação diária com a cobertura sem irrigação. As diferenças entre esses dois tratamentos de irrigação são maiores que 3,5% durante boa parte do monitoramento (madrugada, manhã, início da tarde e início da noite), chegando a 5,2% às 12h, uma vez que a irrigação diária permitiu aumento da Ua.in, como já identificado nos valores médios da umidade relativa interna apresentados.

Por fim, as maiores máximas e mínimas de umidade relativa do ar interno foram encontradas no telhado verde com irrigação diária, enquanto os menores valores foram observados na cobertura que teve a rega totalmente suspensa. Quanto à variação de umidade (ΔU), no final do monitoramento, o telhado verde sem irrigação apresentou a menor valor de ΔU , conforme apresentam os dados da Tabela 34⁶³. Embora esses destaques nos parâmetros tenham ocorrido, as diferenças entre eles são menores ou muito próximas aos limites de precisão do equipamento, similarmente ao que aconteceu na variável temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) desta etapa.

⁶³ A Tabela 39 no Apêndice H apresenta os parâmetros calculados da Ua.in para todas as coberturas. Por não ser o foco de análise desta etapa, os parâmetros calculados da Ua.in nas células teste com telha cerâmica (TC) e telha de fibrocimento (FI) não são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020

	Ua.in	Máxima	Mínima	ΔU
		(%)	(%)	Varição de Umidade (%)
26 / JAN	Sem irrig.	79,9	39,9	40,0
	Irrig. seman.	82,0	40,2	41,8
	Irrig. diária	83,4	45,4	38,0
	Ua.ex	91,0	41,0	50,0
11 / FEV	Sem irrig.	83,4	39,5	43,9
	Irrig. seman.	85,2	39,6	45,6
	Irrig. diária	86,4	43,9	42,5
	Ua.ex	98,0	42,0	56,0
23 / FEV	Sem irrig.	80,4	48,6	31,8
	Irrig. seman.	82,4	49,4	33,0
	Irrig. diária	84,7	51,1	33,6
	Ua.ex	95,0	47,0	48,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.4 Considerações sobre os resultados da Etapa 04

De maneira geral, as diferenças na temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) e na umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) oriundas da frequência de irrigação dos telhados verdes são pequenas e próximas à faixa de precisão do equipamento, embora os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar tenham sido coerentes com a quantidade de água que cada cobertura recebeu, considerando todos os 29 dias monitorados. Nesses valores médios, a cobertura com irrigação diária reduziu $0,4^{\circ}\text{C}$ sua $T_{a.in}$ e aumentou 4,5% a $U_{a.in}$, quando comparada à cobertura que teve rega totalmente suspensa.

Por fim, os parâmetros calculados para os três dias típicos refletem o comportamento dos dados, já que as diferenças entre eles são próximas aos limites de precisão do equipamento, apesar do telhado verde com irrigação diária ter se destacado na redução das temperaturas máximas e aumento das umidades relativas mínimas e a cobertura sem irrigação ter apresentado a menor amplitude térmica e maiores umidades relativas do ar.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a finalidade de estudar o comportamento do sistema de telhado verde no semiárido alagoano, foram analisados nesta pesquisa, o desempenho térmico do telhado verde comparado a outros sistemas de coberturas, os impactos da variação da espécie vegetal, da presença/ausência da vegetação, e da frequência de irrigação nesse comportamento. Os objetivos foram alcançados e os resultados do monitoramento de temperaturas e umidades superficiais e internas em células teste permitiram obter as seguintes conclusões acerca do desempenho térmico do telhado verde como estratégia de condicionamento passivo na cidade em estudo:

- a) O sistema de telhado verde (TV-zj) apresentou a menor amplitude térmica entre os cinco sistemas de cobertura da Etapa 01 (laje impermeabilizada, solo nu, telhado verde, telha cerâmica e fibrocimento), em todas as temperaturas monitoradas ($T_{s.ex}$, $T_{s.in}$, $T_{a.sup}$ e $T_{a.in}$) no período quente e úmido;
- b) A utilização de um telhado verde (TV-zj) com 17,0cm composto de argila expandida, manta de jardim, substrato e vegetação (*Zoysia japonica*), provocou a redução de aproximadamente 5,0°C na temperatura superficial interna quando essa cobertura é comparada à laje impermeabilizada. Redução semelhante foi encontrada utilizando uma camada de 17,0cm de solo local sem cobertura vegetal (SO);
- c) Valores próximos de transmitância térmica entre SO e TV-zj proporcionaram comportamentos semelhantes dessas coberturas nas variáveis $T_{s.in}$, $T_{a.sup}$ e $T_{a.in}$. Nessa última (temperatura do ar interno), apesar do menor aquecimento da célula teste com telhado verde no período diurno, ambas as coberturas apresentam menores máximas (25,8°C e 25,4°C, respectivamente), maiores mínimas (19,3°C e 19,2°C, respectivamente), menores amplitudes térmicas (6,5°C e 6,2°C, respectivamente), e SO o maior atraso térmico (2h) dessa variável;
- d) O telhado verde permitiu que a umidade superficial externa ($U_{s.ex}$) e a umidade relativa do ar ($U_{a.in}$) no interior da célula teste se apresentassem com valores maiores que nas demais coberturas (LI, SO, TC e FI), principalmente no período diurno;

Quanto às espécies vegetais, *Callisia repens* (TV-cr) e *Desmodium triflorum* (TV-dt) tiveram comportamentos praticamente idênticos, apesar da diferença na cobertura vegetal e da *Zoysia japonica* (TV-zj) ter apresentado valores menores que as outras espécies, em até 0,6°C na temperatura do ar interno, e valores maiores em até 7,8%, na umidade relativa do ar interno.

Analisando o comportamento das 24h de monitoramento pode-se concluir que essas três espécies estudadas apresentaram desempenhos semelhantes nas variáveis do ar interno.

A ausência de vegetação permitiu uma maior amplitude térmica no sistema SV, quando analisadas as temperaturas superficiais ($T_{s.ex}$ e $T_{s.in}$). Na temperatura do ar próximo a superfície interna ($T_{a.sup}$), SV e TV-cr apresentaram a mesma amplitude ($6,7^{\circ}\text{C}$), apesar das diferenças entre eles durante madrugada e noite terem sido próximas a $1,0^{\circ}\text{C}$. Com relação à temperatura do ar interno ($T_{a.in}$), a ausência de vegetação permitiu valores mais elevados que a presença de vegetação no final da tarde, noite e madrugada. Quanto às umidades, a umidade superficial interna ($U_{s.in}$) e a umidade relativa do ar interno no interior da célula teste ($U_{a.in}$) foram menores na ausência de vegetação.

Sobre a influência da irrigação, embora os valores médios das variáveis coletadas tenham indicado que a irrigação diária provocou uma redução de $0,4^{\circ}\text{C}$ na $T_{a.in}$ e aumento de 4,5% da $U_{a.in}$, em comparação ao sistema com rega suspensa, as diferenças oriundas da frequência de irrigação foram pequenas e próximas à precisão do equipamento.

Embora comportamentos próximos tenham sido observados entre os sistemas SO, SV e as coberturas com vegetação (TV-zj, TV-cr e TV-dt), o telhado verde foi uma estratégia eficiente para evitar amplitude térmica elevada no ambiente interno, aspecto importante para obtenção do conforto térmico, podendo também contribuir para qualidade estética e ambiental urbana. Sobretudo, pode-se destacar a influência do solo/substrato no comportamento térmico do sistema de telhado verde, não tendo muita influência a espécie vegetal utilizada e a frequência de irrigação adotada. Assim, em condições muito áridas, mesmo sem vegetação, o telhado verde apresentará bons resultados, se mostrando uma solução interessante para habitação de interesse social.

Samayoa, Martínez e Nolasco (2015b) indicaram a utilização de telhados verdes para edificações, oficinas, espaços educativos, de atenção à saúde e fortes consumidores de energia através da utilização do ar condicionado, pois os telhados verdes permitem a redução do tempo de trabalho desse aparelho, chegando a reduzir em 28% o consumo anual de energia, além dos benefícios térmicos para o usuário. Essa mesma recomendação pode ser aplicada para a cidade de Arapiraca, Alagoas, não por justificativa do consumo de energia, característica que não foi o objetivo desta pesquisa, mas pelo comportamento térmico do telhado verde. Esse sistema apresenta melhores resultados na redução das temperaturas superficiais e internas, e aumento

das umidades superficiais e internas no período diurno, portanto, edificações que tenham funcionamento entre 6h e 18h são as mais indicadas para terem telhados verdes instalados em sua cobertura.

O efeito da inércia térmica nos telhados verdes permite que, no período noturno, a temperatura do ar interno seja maior do que com a utilização de coberturas convencionais (telha cerâmica, por exemplo). Em edificações residenciais, nas quais o usuário permanece sobretudo no período noturno (noite e madrugada), esse comportamento será benéfico para resolver o desconforto por frio nesses horários. Porém, a porcentagem anual de desconforto por calor (76,1%) no clima semiárido de Arapiraca é bem maior do que por frio (6,22%). Dessa maneira, o telhado verde pode ser combinado com outras estratégias de resfriamento, como a ventilação noturna. Segundo Jiang e Tang (2017) a combinação de telhado verde e ventilação noturna permitiu reduzir entre 75% e 79% o ganho de calor e encurtar em 6h o período de ganho de calor no clima quente e úmido da cidade de Chongqing, na China.

Dentre as limitações do trabalho, esteve a seleção das espécies vegetais a partir da bibliografia e não oriunda de experiências práticas do telhado verde na região, o que levou a dificuldades no estabelecimento das plantas para a realização do monitoramento de dados. Além disso, a utilização de equipamentos manuais de leitura das variáveis superficiais limitou algumas etapas a apenas um dia de monitoramento, período que poderia ser estendido com equipamentos de leitura automática. A análise das umidades superficiais, fornecidas em valores relativos (porcentagem), foi dificultada pela ausência de estudos semelhantes na literatura, uma vez que as pesquisas que abordam umidades em telhados verdes referem-se ao conteúdo volumétrico nas camadas do sistema, principalmente no substrato, e não são apresentados em valores relativos.

Por fim, como pesquisas complementares a este estudo, podem ser abordados o desempenho híbrido da utilização do telhado verde com a ventilação noturna; o comportamento térmico de sistemas de telhado verde mais leves, baratos e possíveis de serem aplicados sobre coberturas tradicionais; o desempenho de telhados verdes com plantas espontâneas locais e espécies suculentas (características de regiões áridas e semiáridas), onde parte do substrato é exposto a radiação solar e os requerimentos de irrigação são reduzidos; e o comportamento de sistemas de cobertura compostos de solo/substrato sem vegetação (terraços), mas acrescidos de elementos de sombreamento desse substrato, como casca de pinus, tornando desnecessária a irrigação para fins de manutenção da vegetação.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15215-2**: iluminação natural – parte 2: procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **ABNT NBR 15220-1**: desempenho térmico de edificações – parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

_____. **ABNT NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

_____. **ABNT NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2003c.

AGROSYSTEM. **Vantage Pro2™ Conjunto de sensores integrados (ISS) Manual de instalação**. 2014.

ASHRAE. American National Standards Institute; American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **ANSI/ASHRAE 55-2013**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2013.

ASSIS, Eleonara S. de; SIRQUEIRA, Camila A. de; BAMBERG, Angelina M. Influência da vegetação no microclima em ambiente simulado controlado. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO, 8., 2013. Brasília. **Anais eletrônicos [...]** Brasília: 2013. CD-ROM.

BARATTO, Romulo. Avançam os trabalhos de restauro do Palácio Gustavo Capanema. Archdaily Brasil. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/786960/avancam-os-trabalhos-de-restauro-do-palacio-gustavo-capanema>>. Acesso em: 03 maio 2019.

BARROS, Alexandre Hugo Cezar; ARAÚJO FILHO, José Coelho de; SILVA, Ademar Barros da; SANTIAGO, Gabriela Ayane C. F. **Climatologia do estado de Alagoas**. 2. ed. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 f. (Dados eletrônicos – Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos) ISSN 1678-0892; 211. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/950797/climatologia-doestado-de-alagoas>>. Acesso em: 18 ago. 2019.

BASTOS, Sueynne Marcella Santana Leite. **Seleção de plantas para uso em telhados verdes extensivos na zona da mata de Pernambuco**. 2017. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <<http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/7067>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

BATISTA, Juliana Oliveira; LAMBERTS, Roberto. Classificação do desempenho térmico da casa eficiente: avaliação segundo as normas brasileiras. In: LAMBERTS et. al. **Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010, v. 1. p. 19-35. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2019.

BATISTA, Juliana Oliveira; LAMBERTS, Roberto; CÂNDIDO, Christhina Maria. Desempenho das estratégias bioclimáticas de projeto: inércia térmica e ventilação natural. In: LAMBERTS et. al. **Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LABEEE, 2010, v. 1. p. 37-57. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2019.

BEATRICE, Caio Cury. **Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22092011-151752/pt-br.php>>. Acesso em: 09 jan. 2020.

BESIR, Ahmet B.; CUCE, Erden. Green roofs and facades: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.I.], v. 82, p. 915-938, fev. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313680>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

CADETE, Eduardo Siqueira. **Análise do desempenho térmico de coberturas e subcoberturas com materiais alternativos no contexto climático do semiárido alagoano**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2020.

CADETE, Eduardo; BARBOSA, Ricardo V. B. Análise comparativa do desempenho térmico de forre PVC e de bambu para habitações de interesse social no clima semiárido. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2019, João Pessoa. **Anais eletrônicos** [...]. João Pessoa: Instituto de Educação Superior da Paraíba, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1I8aI5Uq5bXSmiYG3nm1nL_YR-LCJk20kF/view>. Acesso em: 15 jan. 2020.

CAO, Junjun; HU, Shuai; DONG, Qin; LIU, LiJiao; WANG, ZhaoLong. Green roof cooling contributed by plant species with diferente photosynthetic strategies. **Energy & Buildings**, v. 195, p. 45-50, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.046>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819300490?dgcid=rss_sd_all>. Acesso em: 06 jan. 2020.

CARVALHO, Gustavo de Castro; TONELLO, Paulo Sérgio; MIRANDA, Jarbas Honorio de. Avaliação de sistemas de telhados verdes: análise térmica em diferentes sistemas cultivados com *Callisia repens*. **RBCIAMB**, n. 49, p.66-80, set. 2018. DOI: 10.537/z2176-947820180350. Disponível em: <http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/45/469>. Acesso em: 20 dez. 2019.

CASTAÑEDA-NOLASCO, G.; VECCHIA, F. Sistema de techo alternativo para vivienda progressiva em Tuxtla Futierrez, Chiapas, México. **Ingeniería**, v. 11-2, p. 21-30, 2007.

CENTRAL ANALÍTICA. **Resultado das amostras**. Maceió: Central Analítica Alagoas, 2019.

CHAGOLLA-ARANDA, M.A.; SIMÁ, E.; XAMÁN, J.; ÁLVAREZ, G.; HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; TÉLLEZ-VELÁZQUEZ, E. Effect of irrigation on the experimental thermal performance of green roof in a semi-warm climate in Mexico. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 232-243, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.082>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881732412X>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

COSTA JUNIOR, Carlos Roberto da. **Conforto térmico em edificações rurais com telhados verdes**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal

Rural de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URPE_ecc384acea510ddd75a586e8840fb859>. Acesso em: 21 ago. 2019.

COSTA, Kátryson M. S.; SILVA, Maria N.; BARBOSA, Ricardo V. B. Reaproveitamento das caixas acartonadas (Tetra pak®) para subcoberturas (forros) como elemento de estratégia de conforto térmico em edificações em Arapiraca – AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2015, [Campinas]. **Anais eletrônicos [...]**. [Campinas]: PUC, 2015. CD-ROM.

DIAS, Adriano Ethur. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras**. 2016. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em:<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/175074>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

DURHMAN, Angela K.; ROWE, D. Bradley; RUGH, Clayton L. Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. **HortScience**, v. 42(3), p. 588-595, jun. 2007. Disponível em: <<https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/42/3/article-p588.xml#container-3757-item-3768>>. Acesso em: 11 dez. 2019.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI. 2006. 306 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/sibcs>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

FARRELL, C.; MITCHELL, R. E.; SZOTA, C.; RAYNER, J. P.; WILLIAMS, N.S.G. Green roofs for hot and dry climates: interacting effects of plant water use, succulence and substrate. **Ecological Engineering**, v. 49, p. 270-276, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoeng.2012.08.038>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857412002960>>. Acesso em: 04 jan. 2020.

FEITOSA, Renato Castiglia; WILKINSON, Sara J. Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit. **Building and Environment**, v. 140, p. 11-32, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.034>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318302944>>. Acesso em: 05 jan. 2020.

FERRAZ, Iara Lima. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7842/JOBIM,%20ALAN%20LAMBERTI.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

FERREIRA, Míryan Patrícia Tenório. **Avaliação do conforto térmico com base em critérios normativos em apartamentos representativos do programa minha casa minha vida em Maceió-AL**. 2019. 194 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

FITCHETT, Anne; GOVENDER, Privashen; VALLABH, Priya. An exploration of green roofs for indoor and exterior temperature regulation in the South African interior. **Environment, Development and Sustainability**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00413-5>. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-019-00413-5>>. Acesso em: 19 fev. 2020.

FLIR. **FLIR i3, FLIR i5, FLIR i7, Extech IRC30 Manual do utilizador**. 2010. Disponível em: <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_6419.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.

- _____. **FLIR model MR176 Imaging moisture meter plus with IGM™ Manual**. 2016.
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) (Landscape Development and Landscaping Research Society e.V.). **Green roof guidelines** - guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofs. 6. ed. Bonn: Landscape Development and Landscaping Research Society e.V., 2018. Disponível em: <<https://shop.fll.de/de/green-roof-guidelines-2018-download.html>>. Acesso em: 19 dez. 2019.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- FURTADO, Daniela Cavalcanti de Medeiros. **Traço para substrato em telhado verde** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <wellington-souza94@hotmail.com> em 28 de junho de 2019.
- GARTLAND, Lisa. **Ilhas de Calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina dos Textos, 2010.
- GIVONI, Baruch. Comfort, climate, analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11-23, 1992. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877889290047K>>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- _____. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. **Energy and Buildings**, v. 28, p. 25-32, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877889700056X>>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- GOOGLE EARTH. **Google Earth**. Website. 2020. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 07 jan. 2020.
- HURSTWIC. **Turf Houses in the Viking Age**. 2019. Disponível em: <http://www.hurstwic.org/history/articles/daily_living/text/Turf_Houses.htm>. Acesso em: 01 dez. 2019.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Arapiraca**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/arapiraca/panorama>> Acesso em: 18 de ago. 2020a.
- _____. **Cidades e Estados**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?>>. Acesso em: 28 de ago. 2020b.
- _____. **Mapa de vegetação do Brasil**. 3. ed. [S.I.]: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Diretoria de Geociências, 2004. 1 mapa, color. Escala 1:5000000. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/vegetacao>>. Acesso em: 20 set. 2019.
- IGRA. **International Green Roof Association**. 2020. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/>>. Acesso em: 07 jan. 2020.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia e Estatística. **Consulta Dados da Estação Automática: Arapiraca (AL)**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- JIANG, Lin; TANG, Mingfang. Thermal analysis of extensive green roofs combined with night ventilation for space cooling. **Energy and Buildings**. v. 156, p. 238-249, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.080>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816314128>>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- JIM, C.Y.; PENG, Lilliana L.H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 9-23, 2012. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.020>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857412002194>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

KOTTERK, Markus; GRIESER, Jürgen; BECK, Christoph; RUDOLF, Bruno; RUBEL, Frank. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlim, v. 15, p. 259-263, jun. 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. Disponível em: <<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>>. Acesso em: 06 jan. 2020.

KOZMHINSKY, Marcelo; PINHEIRO, Sara Maria Gomes, EL-DEIR, Soraya Giovanetti. **Telhados verdes: uma iniciativa sustentável**. Recife: EDUFRPE, 2016. 65p.

KOZMHINSKY, Marcelo. **Avaliação de fatores climatológicos no telhado verde de edificação no bairro do Recife**. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <<http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/7705>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

KREBS, Lisandra Fachinello. **Extensive green roof in Porto Alegre, Brasil: effect on indoor thermal in residential buildings**. 2018. 240f. Tese (Desenvolvimento e Gestão Habitacional) - Departamento de Arquitetura e Ambiente Construído, Universidade de Lund, Suíça, 2018. ISBN 978-91-87866-41-8. ISSN 1652-7666. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/188378>>. Acesso em: 01 mar. 2020.

LAMBERTS, Ricardo; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. **Eficiência energética na arquitetura**. 3º ed. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013. 366 p. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/publicacoes/livros>> Acesso em: 18 jan. 2019.

LIMA, Luiz Paulo Fernandes. **A física da irrigação**. Pau dos Ferros, RN: Universidade Federal do Ceará, 2016. 88p. Disponível em: <<https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/931/Produto%20Final%20-%20MNPEF%20-%20LIMA%2C%20L.P.F.%202016%20%28A6%29%20-%20ATUALIZADA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 09 jul. 2019.

LIU, T.-C.; SHYU, G.-S.; FANG, W.-T.; LIU, S.-Y; CHENG, B.-Y. Drought tolerance and thermal effect measurements for plants suitable for extensive green roof planting in humid subtropical climates. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 180-188, 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.043. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811005895>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

LIZ, Débora G. S. de; MIZGIER, Martin O.; GÜTHS, Saulo. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais eletrônicos [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2016. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1EO-fjTvkXL7aqgK9y5wqPamRSLsa3D-1V/view>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

LIZ, Débora Gracielle Stiegemeier de. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado extensivo para Florianópolis**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/172358>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

LIZ, Débora Stiegemeier de; ORDENS, Martin; GUTHS, Saulo. Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis. **Oculum Ensaios**, Campinas v.15 (2), p.315-333, maio – ago. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.24220/2318-0919v15n2a4053>. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.24220/2318-0919v15n2a4053>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

LOPES, Daniele Arantes Rodrigues. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-11122007-093813/pt-br.php>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

LOPES, Daniele Arantes Rodrigues; VITALLI, Patrícia D.L.; VECCHIA, Francisco. A importância das políticas públicas no fomento das coberturas verdes. In: ENCONTRO NACIONAL, 4., ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2., 2007. [Campo Grande]. **Anais eletrônicos...** [Campo Grande], 2007. Disponível em: <http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2007/2007_artigo_004.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2019.

LORENZI, Harri; SOUZA, Hermes Moreira de. **Plantas ornamentais no Brasil**: arbustivas, herbáceas e trepadeiras. 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008.

MATTOS, C.S. **Desempenho térmico de um telhado verde inserido em região semiárida**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

MECHELEN, Carmem Van; DUTOIT, Thierry; HERMY, Martin. Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: a review. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 74-90, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.007>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670715300081>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MEDEIROS, Maria Franco Trindade; FONSECA, Viviane Stern da; ANDREATA, Regina Helena Potsch. Plantas medicinais e seus usos pelos sítiantes da reserva Rio das Pedras, Mangaratiba, RJ, Brasil. **Acta bot. Bras.**, v. 18 (2), p. 391-399, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/abb/v18n2/v18n02a19.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2019.

MENEZES, Maria Francielle Santos; TEIXEIRA, Carla Fernanda Barbosa. Avaliação do desempenho térmico de telhado verde na cidade de Aracaju-SE. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2019, João Pessoa. **Anais eletrônicos [...]**. João Pessoa: Instituto de Educação Superior da Paraíba, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1I8aI5Uq5bXSmiYG3nm1nL_YRLCJk20kF/view>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MICHELS, Caren; GÜTHS, Saulo; MARINOSKI, Deivis Luis. Desempenho térmico de uma cobertura verde testada em bancada experimental. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2019, João Pessoa. **Anais eletrônicos [...]**. João Pessoa: Instituto de Educação Superior da Paraíba, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1I8aI5Uq5bXSmiYG3nm1nL_YRLCJk20kF/view>. Acesso em: 15 jan. 2020.

MINK, Gernot. **Techos verdes**: planificación, ejecución, consejos prácticos. Montecideo. Fin de Siglo, [2003?]. 86p.

MORAIS, Caroline Santana de. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos – SP**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4628>>. Acesso em: 07 set. 2019.

NASCIMENTO, Thássia Catherine Costa. **Avaliação da NBR 15575 quanto ao desempenho térmico e luminoso**: estudo de caso em Maceió-AL. 2016. 182 f. Dissertação (Mestrado em

Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

NIKON. Website. 2019. Disponível em: <<https://imaging.nikon.com/>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

NOBRE, Antônia Vilaneida Moraes; SARTORI, Ângela Lúcia Bagnatori; RESENDE, Ubirazilda Maria. As espécies de *Desmodium* Desv. (Leguminosae-Papilionoideae-Desmodieae) ocorrentes no mato Grosso do Sul. **IHERINGIA**, Sér. Bot., v. 63, n. 1, p. 37-67, jan./jun. 2008. Disponível em: <<https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/158/165>>. Acesso em: 13 set. 2019.

NOGUEIRA, Aline Maria Pereira. **Configuração urbana e microclimas: estudo em loteamento horizontal de Maceió-Alagoas**. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011. Disponível em: <http://www.fau.ufal.br/posgraduacao/deha/Dissertacoes%20nova_arquivos/AlineMariaPereira.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2020.

NUNES, Ana Maria Laurindo André. **Contribuições ao estudo de clima urbano no semiárido alagoano: análise de estratégias bioclimáticas na cidade de Arapiraca**. A influência dos tetos verdes no microclima urbano: estudo em cidade de clima semiárido (plano de trabalho). Relatório técnico PIBIC, Arapiraca, 2017.

ONSET. **HOBO® Pro v2 (U23-00x) Manual**. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/10694-Q%20U23%20Manual.pdf>. Acesso em: 30 maio 2019a.

_____. **HOBO® Temp/RH 3.5% Data Logger (UX100-003) Manual**. Disponível em: <<https://www.onsetcomp.com/support/manuals/16209-f-ux100-003-manual>>. Acesso em: 30 maio 2019b.

OSUNA-MOTTA, Iván; HERRERA-CÁCERES, Carlos; LÓPEZ-BERNAL, Oswaldo. Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. **Revista de Arquitectura**, Bogotá, v. 19(1), p. 42-55, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.1109>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320051127_Techo_plantado_como_dispositivo_de_climatizacion_pasiva_en_el_tropico>. Acesso em: 21 mar. 2020.

PARIZOTTO FILHO, Sergio. Telhado vegetado. In: LAMBERTS et. al. **Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010, v. 1. p. 89-122. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2020.

PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: a case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 1712-1722, 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.03.014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811000922>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

PASSOS, Isabela Cristina da Silva. **Clima e arquitetura habitacional em Alagoas: estratégias bioclimáticas para Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar**. 2009. 173 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/695/1/Dissertacao_IsabelaCristinadaSilvaPassos_2009.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019.

PECK, Steven W. et. al. **Greenbacks from green roofs: forcing a new industry in Canada** status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden techno-

logy diffusion. Canadá: Canada Mortgage and Housing Corporation, 1999. Disponível em: <<https://www.nps.gov/tps/sustainability/greendocs/peck-sm.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

PERUSSI, Rafael; VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 7, n. 4, p.255-236, dez. 2016. ISSN 1980-6809. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647932>. Disponível em: <<http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8647932>>. Acesso em: 24 jan. 2020.

PIANELLA, Andrea; AYE, Lu; CHEN, Zhengdong; WILLAMS, Nicholas S. G. Substrate depth vegetations and irrigation affect green roof performance in a Mediterranean Type Climate. **Sustainability**, v. 9, 1451, 2017. DOI: 10.3390/su9081451. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/8/1451>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Estudo experimental do desempenho térmico de coberturas planas** – vegetação e terraço. 1998. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/119132?locale=pt_BR>. Acesso em: 10 set. 2019.

PROJETEEE. **Projetando Edificações Energeticamente Eficientes**, 2020. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/>> Acessado em 26 jan. 2020.

RAPOSO, Fausto Miguel Ferreira. **Manual de boas práticas de coberturas verdes**. Análises de casos de estudo. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação) – Técnico Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/download-File/395146020357/Dissertacao_CobVerdes_FRaposo_R01.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2019.

REFLORA. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Website. 2020. Disponível em: <reflora.jbrj.gov.br>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ROCHA, Sérgio. Os números do mercado de telhado verde no mundo. **Instituto Cidade Jardim**. Website. [S.L.: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://blog.institutocidadejardim.com.br/2016/09/13/um-telhado-verde-nao-faz-verao-2-os-numeros-do-mercado-de-telhados-verdes-no-mundo/>>. Acesso em: 04 jan. 2020.

ROSSETI, Karina de Andrade Carvalho; NOGUEIRA, Marta Cristina de Jesus Albuquerque; NOGUEIRA, José de Souza. Interferência microclimática na utilização do telhado verde para regiões tropicais: estudo de caso em Cuiabá, MT. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 9, n. 9, p. 1959-1970, fev. 2013. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/7702/pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

ROSSETI, Karyna de Andrade Carvalho. **Efeitos do uso de telhados vegetados em ilhas de calor urbanas com simulação pelo software ENVI-Met**. 2013. 253 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

_____. **Estudo do desempenho de coberturas verdes como estratégia passiva de condicionamento térmico de edifícios na cidade de Cuiabá - MT**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2009. Disponível em: <<http://pgfa.ufmt.br/index.php/br/utilidades/arquivos/banco-de-dissertacoes-do-programa/139-karyna-de-andrade-carvalho-rosseti>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

SAADATIAN, Omidreza; SOPAN, K.; SALLEH, E.; LIM, C. H.; RIFFAT, Safa; SAADATIAN, Elham; TOUDESCHI, Arash; SULAIMAN, M. Y. A review of energy aspects of green roofs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 155-168, 2013. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211300124X>>. Acesso em: 21 jan. 2020.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, p.1466-1478, fev. 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778808000339>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

SAMAYOA, Ruber Trujillo; MARTÍNEZ, Yamile Rangel; NOLASCO, Gabriel Castañeda. Desempenho térmico del techo verde, uma alternativa viable para la edificación, em Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. **Revista Legado de Arquitectura y Diseño**, Toluca, México, n. 18, p. 103-113, jul.-dez. 2015a. ISSN 2007-3615.

_____. Potencial del techo verde, para ahorrar electricidad por aire acondicionado em la edificación. **Revista Eletrônica Nova Scientia**, v. 7(3), n. 15, p. 577-596, 2015b. ISSN 2007-0705.

SANTOS, Gilles Chaves dos. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016. Disponível em: <<https://www3.ufpe.br/ppgecam/images/documentos/Dissertacoes/2016/dissertacao%20gilles.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2019.

SANTOS, Laete dos. **Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas**. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276293466_TERMOGRAFIA_INFRAVERMELHA_em_Subestacoes_de_Alta_Tensao_Desabrigadas>. Acesso em: 09 jun. 2019.

SANTOS, Sylvana Melo dos; SILVA, Jhonata Fernandes Ferreira; SANTOS, Gilles Chaves dos; MACEDO, Patrícia Martins Torres de; GAVAZZA, Sávia. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 639-648, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.068>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619300794>>. Acesso em: 03 jan. 2020.

SARDINENI, Suresh B.; MADALA, Srikanth; BORHM, Robert F. Passive building energy savings: a review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 3617-3631, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111002504>>. Acesso em: 09 fev. 2020.

SAVI, Adriane Cordon. **Telhados verdes: uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 2015. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/42102>>. Acesso em: 16 mar. 2020.

SEE, Bridgette. Punggol Roof Garden. **Green roof website**. 2003. Disponível em: <<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=45>>. Acesso em: 01 maio 2019.

SEPLANDE, SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO E DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE ALAGOAS. **Clima**. 2. ed. [S. I.]: SEPLANDE, 2014a. 1 mapa, color. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/7162e04e-52d3-48f8-911b-58911f967d2a>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

_____. **Hipsometria**. 2. ed. [S. I.]: SEPLANDE, 2014b. 1 mapa, color. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/7162e04e-52d3-48f8-911b-58911f967d2a>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

_____. **Solos**. 2. ed. [S. I.]: SEPLANDE, 2014c. 1 mapa, color. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/b5ee52e2-5e76-49a5-bc9d-7e344c19be5b>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SETTA, Bruno Rocha Silva. Telhados verdes como políticas públicas ambientais para o município de Volta Redonda – RJ. **Revista LABVERDE**, v. 8, n. 1, p. 13-35, mar. 2017. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/121954>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

SIKA. **Sikafill® Rápido**, Impermeabilizante Acrílico Elástico para Lajes e Coberturas – Ficha do produto. 2014. Disponível em: <<https://www.sikafill.com.br/>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SILVA, Maria das Neves da. **Reaproveitamento de caixas acartonadas em subcoberturas (forro) como isolante térmico para edificações no contexto climático de Arapiraca/AL**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2015.

SILVA, Mônica Ferreira da. **Estratégias bioclimáticas para o agreste de Alagoas**: diretrizes projetuais para edificações em Arapiraca. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2017.

_____. **Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas**: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local. 2019. 185 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

SILVA, Neusiane da Costa. **Telhado verde**: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental. Belo Horizonte: 2011. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil). Escola de Engenharia da UFMG, 2011. Disponível em: <<http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/trabalhos/pg2/73.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2019.

SILVA, Wellington S.; VIEIRA, Carlos E.; BARBOSA, Ricardo V. B. Análise de desempenho térmico de cobertura com sistema de teto verde no semiárido alagoano. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2019, João Pessoa. **Anais eletrônicos** [...]. João Pessoa: Instituto de Educação Superior da Paraíba, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1I8aI5Uq5bXSmiYG3nm1nL_YR-LCJk20kF/view>. Acesso em: 15 jan. 2020.

SILVA, Wellington Souza. **Teto verde como estratégia bioclimática para o semiárido alagoano**. Arapiraca: 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas, 2018.

SUDENE. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do semiárido - Alagoas**. [S. I.]: ODNE, 2017. 1 mapa, color. Disponível em: <<http://www.sudene.gov.br/imagens/arquivos/semiarido/arquivos/alagoas-delimitacao-semiarido-dezembro2017.jpeg>>. Acesso em: 09 jun. 2019.

_____. **Delimitação do semiárido**. Website. 2020. Disponível em: <<http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

SUN, Ting; BOU-ZEID, Elie; NI, Guang-Heng. To irrigate or not to irrigate: analysis of green roof performance via a vertically-resolved hygrothermal model. **Building and Environment**,

v. 73, p. 127-237, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.004>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132313003508>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

TANG, Mingfang; ZHENG, Xing. Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days. **Applied Energy**, v. 242, p.1010-1021, mar. 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.153>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919305628>>. Acesso em: 18 jan. 2020.

TORRES, Simone Carnaúba. **Forma e conforto: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática**. 2017. 395 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano) – Centro de Artes e Comunicação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

VECCHIA, Francisco. Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental. In: ENCONTRO NACIONAL, 8., ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 2005. Maceió. **Anais eletrônicos** [...]. Maceió, 2005. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2005/ENCAC05_2146_2155.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2019.

VEIGA, Glaydson Colatino. **Imagens aéreas do canteiro experimental**. Arapiraca: [s.n.], 2018. fotografias color.

_____. **Imagens aéreas do canteiro experimental**. Arapiraca: [s.n.], 2019. fotografias color.

VERA, Sérgio; PINTO, Camilo; TABARES_VELASCO, Paulo Cesar; BUSTAMANTE, Waldo; VICTORERO, Felipe; GIRONÁS, Jorge; BONILLA, Carlos A. Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semi arid and marine climates. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 321-321, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.037>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817313178>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

VERA, Sergio; PINTO, Camilo; VICTORERO, Felipe; BUSTAMANTE, Waldo; BONILLA, Carlos; GIRONÁS, Jorge; ROJAS, Victoria. Influence of plant substrate characteristics of vegetated roofs on a supermarket energy performance located in a semiarid climate. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1171-1176, 2015. DOI: [10.1016/j.egypro.2015.11.089](http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.089). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215018214>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

VIEIRA, N. L.; DE QUEIROZ, T. M.; FAGUNDES, M. C.; DALLACORT, R. Potencial of utilization of rain water excesso for irrigation of green roof in Mato Grosso, Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, p. 857-864. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000400024>. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162013000400024&script=sci_arttext>. Acesso em: 12 fev. 2020.

WANG, Yajun; SINGH, Rajendra Prasad; FU, Dafang; ZHANG, Junyu; SHOU, Frang. Thermal study on extensive green roof integrated irrigation in northwestern arid regions of China. **Water**, v. 19, 810, 2017. DOI: [10.3390/w9110810](https://doi.org/10.3390/w9110810). Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/9/11/810>>. Acesso em: 12 fev. 2020.

WILKINSON, Sara; FEITOSA, Renato Castiglia. Retrofitting housing with lightweight green roof technology in Sydney, Australia, and Rio de Janeiro, Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 7, p. 1081-1098, 2015. DOI: [10.3390/su7011081](https://doi.org/10.3390/su7011081). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276238057_Retrofitting_Housing_with_Lightweight_Green_Roof_Technology_in_Sydney_Australia_and_Rio_de_Janeiro_Brazil>. Acesso em: 05 nov. 2019.

APÊNDICE A — Pré-teste - 06/12/2018

O pré-teste da pesquisa foi realizado no período quente e seco, no dia 06 de dezembro de 2018. Foram comparados cinco sistemas de cobertura (20% - 11° de inclinação): telha cerâmica tipo colonial (TC); telha de fibrocimento (FI); laje impermeabilizada (LI); laje impermeabilizada com 8,0cm de solo nu (SO) e laje impermeabilizada com telhado verde (TV), utilizando argila expandida (2,0cm) como drenagem, manta de jardim (filtro), substrato comercial (6,0cm), e *Zoysia japonica* (grama-esmeralda) como espécie vegetal. Foram monitoradas: temperatura superficial interna (Ts.in) e externa (Ts.ex), temperatura do ar no interior do modelo (Ta.in) e do ambiente externo (Ta.ex), além da umidade relativa do ar interno (Ua.in) e externo (Ua.ex). Finalizado o monitoramento das variáveis, os dados foram tratados para permitir a comparação entre os sistemas de cobertura, utilizando como parâmetros a amplitude térmica (ΔT), o amortecimento térmico (μ), o atraso térmico (ϕ) e a variação de umidade (ΔU).

Para a aquisição dos dados internos à célula teste (Ta.in, Ua.in), foram utilizados *data loggers* HOBO® UX100-003 da ONSET® (Quadro 25), que registram temperatura do ar (temperatura de bulbo seco) e umidade relativa do ar de ambientes internos em intervalos de 60 minutos, com uma faixa de 3,5% de precisão (ONSET, 2019b). Eles foram dispostos no centro geométrico do espaço interno das células teste, distante 50,0cm de qualquer elemento construtivo, presos em um suporte composto de uma haste em madeira com base metálica.

Quadro 25 - Hobo® UX100-003 e Hobo® U23-003003

HOBO® UX100-003 (INTERNO)		HOBO® U23-003003 (EXTERNO)																													
																															
<p>Data logger de temperatura do ar e umidade relativa do ar interno</p>		<p>Data logger de temperatura do ar e umidade relativa do ar externo. Ao lado, a proteção contra insolação direta e precipitação</p>																													
	<table border="1"> <tr> <td>Faixa</td> <td>-20°C a 70°C</td> </tr> <tr> <td>Sensor de temperatura</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Precisão</td> <td>± 0,21°C (0°C a 50°C)</td> </tr> <tr> <td>Resolução</td> <td>0,024°C a 25°C</td> </tr> <tr> <td>Sensor de umidade relativa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Faixa</td> <td>15% a 95% (sem condensação)</td> </tr> <tr> <td>Precisão</td> <td>± 3,5% (25% a 85%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)</td> </tr> </table>	Faixa	-20°C a 70°C	Sensor de temperatura		Precisão	± 0,21°C (0°C a 50°C)	Resolução	0,024°C a 25°C	Sensor de umidade relativa		Faixa	15% a 95% (sem condensação)	Precisão	± 3,5% (25% a 85%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)		<table border="1"> <tr> <td>Faixa</td> <td>-40° a 70°C</td> </tr> <tr> <td>Sensor de temperatura</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Precisão</td> <td>± 0,21°C (0°C a 50°C)</td> </tr> <tr> <td>Resolução</td> <td>0,02°C a 25°C</td> </tr> <tr> <td>Sensor de umidade relativa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Faixa</td> <td>0-100% RH -40° a 70°C</td> </tr> <tr> <td>Precisão</td> <td>± 2,5% (10% a 90%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)</td> </tr> </table>	Faixa	-40° a 70°C	Sensor de temperatura		Precisão	± 0,21°C (0°C a 50°C)	Resolução	0,02°C a 25°C	Sensor de umidade relativa		Faixa	0-100% RH -40° a 70°C	Precisão	± 2,5% (10% a 90%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)
Faixa	-20°C a 70°C																														
Sensor de temperatura																															
Precisão	± 0,21°C (0°C a 50°C)																														
Resolução	0,024°C a 25°C																														
Sensor de umidade relativa																															
Faixa	15% a 95% (sem condensação)																														
Precisão	± 3,5% (25% a 85%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)																														
Faixa	-40° a 70°C																														
Sensor de temperatura																															
Precisão	± 0,21°C (0°C a 50°C)																														
Resolução	0,02°C a 25°C																														
Sensor de umidade relativa																															
Faixa	0-100% RH -40° a 70°C																														
Precisão	± 2,5% (10% a 90%) ± 5,0% (abaixo de 25% e acima de 85%)																														
<p>Equipamento instalado no interior da célula teste</p>		<p>Equipamento instalado para monitoramento dos dados</p>																													

Fonte: Adaptado de ONSET, 2019a; ONSET, 2019b

Os dados externos ($T_{a.ex}$ e $U_{a.ex}$) foram adquiridos com um *data logger* HOBO® U23-003003 da ONSET® (Quadro 25) adaptado para a coleta de variáveis externas (possui proteção contra a radiação solar direta e precipitação). O equipamento foi instalado a 3,0m de altura do solo, em um poste pré-moldado de concreto distante 17,0m das células teste. Ele registrou dados de temperatura e umidade relativa do ar externo em um intervalo de 60 minutos.

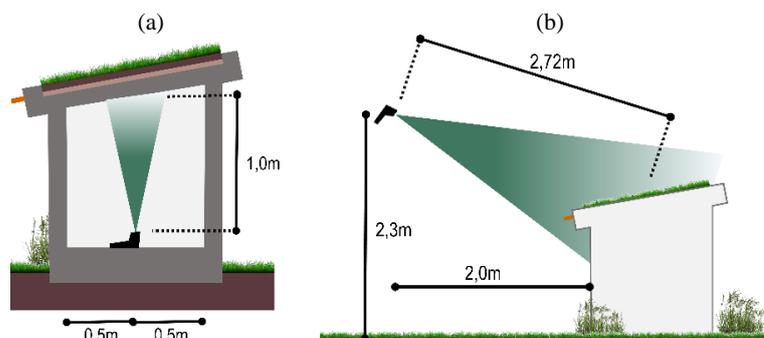
As variáveis superficiais das coberturas ($T_{s.in}$ e $T_{s.ex}$) foram obtidas a partir de imagens termográficas internas e externas registradas com uma câmera termográfica modelo FLIR i7 da FLIR® Systems (Quadro 26), com resolução 120x120 pixels e lente FOL 7mm, auxiliada pelo *software* FLIR Tools para tratamento e análise dos valores médios das imagens. Os registros termográficos foram realizados manualmente a cada 3h em um intervalo de 24h, com início às 0h do dia 06/12/2010 e térmico às 0h do dia 07/12/2018. Para a face interna das coberturas, a câmera foi posicionada próxima ao piso da célula teste, distante aproximadamente 1,0m da cobertura, enquanto para a face externa, os registros foram feitos a uma distância média de 2,72m do ponto central da face externa da cobertura, como ilustrado na Figura 108.

Quadro 26 - Câmera termográfica FLIR i7

Dados do detector	Resolução de infravermelho	120 x 120 pixels	Câmera termográfica FLIR i7
Imagens e dados ópticos	Campo de visão	25° x 25°	
	Distância de focagem mínima	0,6 m	
	Frequência das imagens	9 Hz	
Medição	Amplitude de temperaturas do objeto	0°C a +250°C	
	Precisão	± 2°C ou ± 2% de leitura, para uma temperatura ambiente de 10° a 35°C	
Armazenamento de imagens	Formato do ficheiro	JPEG padrão, inclui dados de medição de 14 bits	

Fonte: Adaptado de FLIR, 2010

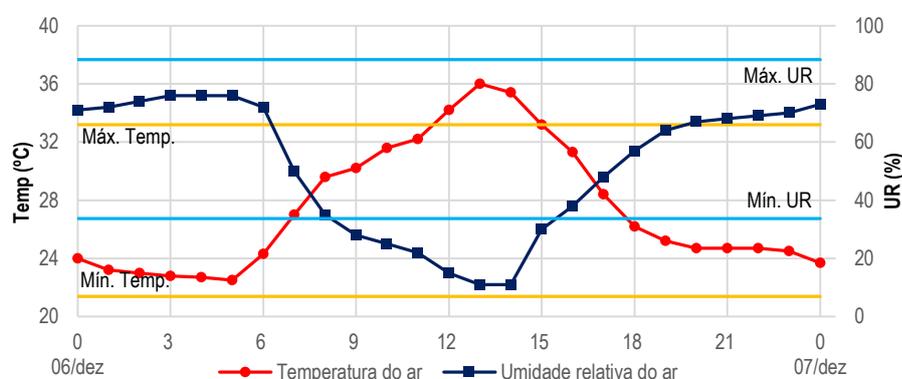
Figura 108 - Posicionamento da FLIR i7 para o registro das imagens termográficas internas (a) e externas (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

O dia 06/12/2018 pode ser caracterizado como um dia quente, extremamente seco e com elevada amplitude térmica diária, elementos típicos do período quente e seco no contexto climático do semiárido alagoano. A temperatura do ar máxima registrada pela estação meteorológica automática (A353) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) chegou a 36,0°C (13h) e a umidade relativa do ar atingiu a mínima de 11% (13h e 14h) (Figura 109 e Tabela 35). Os horários de maior aquecimento alcançaram temperaturas do ar acima da média de temperatura máxima para o mês de dezembro (33,2°C) e a umidade relativa do ar chegou a valores bastante inferiores à média da umidade mínima para o mesmo mês (33,7%).

Figura 109 - Gráfico do comportamento da temperatura do ar e umidade relativa do ar no dia 06/12/2018 e média das temperaturas e umidades relativas mínimas e máximas diárias para o mês de dezembro, de acordo com Silva (2019)



Fonte: Adaptado de INMET, 2019

Tabela 35 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática do INMET (A353) no dia 06/12/2018

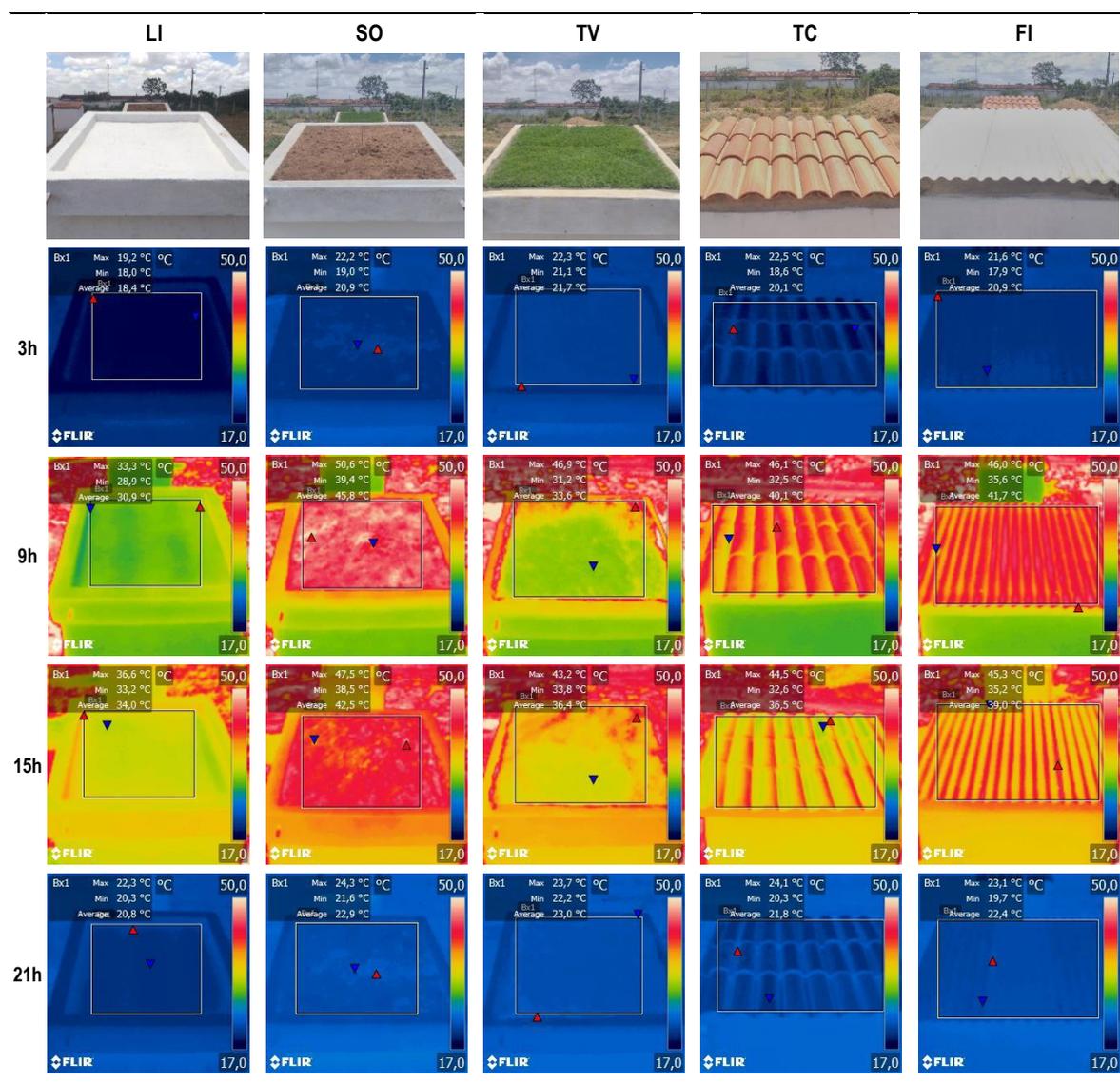
	06/12/2018		Média mensal – DEZ - SILVA (2019)	
	Temp (°C)	UR (%)	Temp (°C)	UR (%)
Máxima	36,0	76,0	33,2	88,0
Mínima	22,5	11,0	21,4	33,0
Amplitude / Variação	13,5	65,0	11,8	55,0

Fonte: Elaborado pelo autor

As imagens termográficas obtidas pela FLIR i7 permitem visualizar a radiação de infravermelhos emitida pelos objetos, que é resultante da sua temperatura superficial. O Quadro 27 apresenta algumas das imagens termográficas externas das coberturas, que permitem distinguir claramente os diferentes comportamentos das coberturas na ausência e presença de radiação solar. Durante o período noturno as variações de temperatura superficial média entre as coberturas são pequenas, alcançando 3,3°C de diferença entre os sistemas LI e TV às 3h. Já durante o dia, as características dos materiais da cobertura têm grande influência na quantidade de radiação absorvida, principalmente o albedo do material. A laje impermeabilizada (LI) apresentou as menores temperaturas superficiais externas das 6h às 15h, comportamento bastante influenciado pela cor branca da camada de impermeabilização, que caracteriza um albedo entre 0,50 e 0,90 (NOGUEIRA, 2011). Em contrapartida, o sistema laje impermeabilizada com solo nu (SO)

apresentou as maiores temperaturas superficiais externas diurnas com um albedo de 0,20 (ASSIS, SIRQUEIRA E BAMBERG, 2013), chegando a uma diferença de aproximadamente 15°C do sistema LI (laje impermeabilizada) às 9h. Apesar da célula teste com telhado verde (TV) apresentar um albedo maior que o sistema SO (0,25 segundo Oke (1987) *apud* Parizotto e Lamberts (2011)), sua temperatura superficial média durante o dia foi menor que no sistema com solo nu (SO) e mais próxima ao sistema com laje impermeabilizada (LI). Essa diferença de comportamento foi provavelmente influenciada pela quantidade de umidade na cobertura e pelos processos de evapotranspiração e fotossíntese das plantas.

Quadro 27 - Imagens termográficas externas das coberturas às 3h, 9h, 15h e 21h no dia 06/12/2018

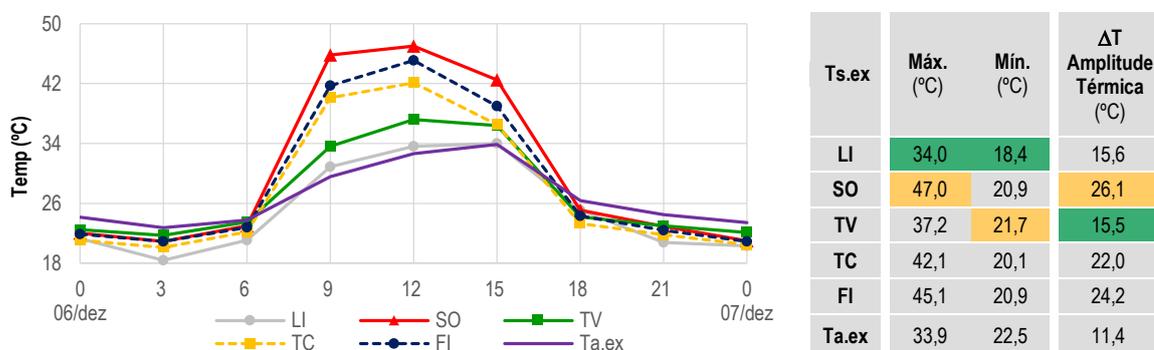


Fonte: Elaborado pelo autor

Graficamente (Figura 110) os dados de temperatura superficial externa média das células teste apresentam maiores disparidades entre as 6h e 18h, com diferenças que chegam a

14,9°C entre os sistemas de cobertura, demonstrando a influência da radiação solar nessa variável. Os sistemas de laje impermeabilizada com solo nu (SO) e cobertura com telha fibrocimento (FI) apresentam as maiores temperaturas superficiais externas diurnas, alcançando 47°C e 45,1°C, às 12h, respectivamente. O comportamento gráfico de ambos é bastante próximo, chegando a coincidir valores durante o período noturno, mostrando que os sistemas SO e FI são semelhantes quanto à absorção e liberação de calor. Os sistemas laje impermeabilizada (LI) e o telhado verde (TV) apresentaram os menores valores superficiais externos diurnos, 30,9°C e 33,6°C às 9h, respectivamente, influenciados pela cor e componentes dos sistemas de cobertura.

Figura 110 - Gráfico do comportamento da Ts.ex nas células teste, valores máximos e mínimos da Ts.ex e amplitude térmica das coberturas no dia 06/12/2018



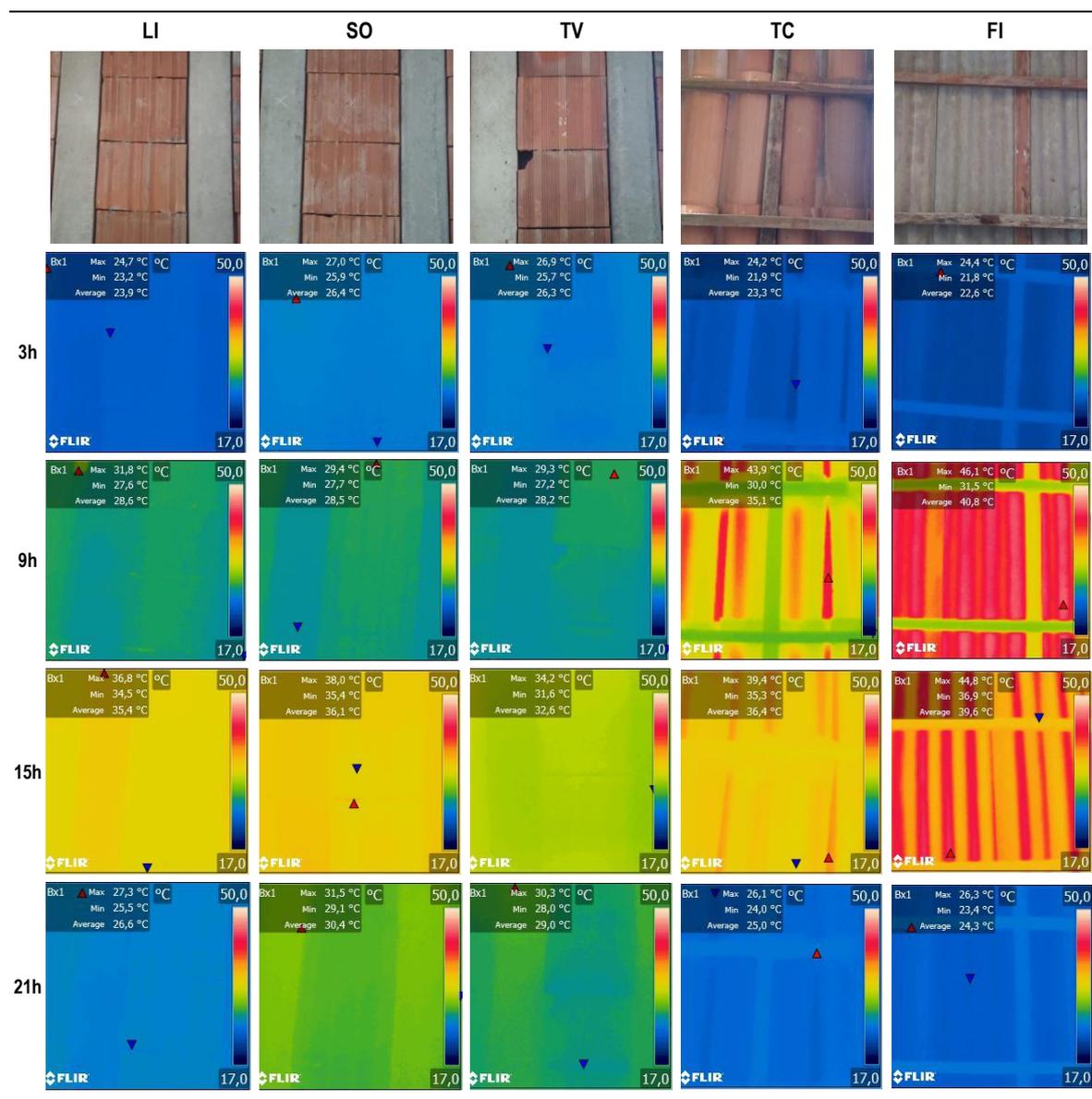
Fonte: Elaborado pelo autor

Durante o período noturno, as coberturas com telha de fibrocimento (FI) e laje impermeabilizada (LI) apresentaram temperaturas superficiais menores e próximas da telha cerâmica (TC). As maiores máximas Ts.ex diurnas foram alcançadas às 12h pelos sistemas SO e FI (47°C e 45,1°C, respectivamente) enquanto a laje impermeabilizada (LI) apresentou a mínima das máximas às 15h (34°C) e o telhado verde teve seu pico às 12h, alcançando 37,2°C, 4,9°C menos aquecido que o sistema com telha cerâmica no mesmo horário. Quanto às amplitudes térmicas, o sistema TV se destacou com uma amplitude 10,6°C menor que o sistema SO, que apresentou 26,1°C desse parâmetro, o maior valor.

As imagens termográficas internas (Quadro 28) demonstram uma grande diferença de comportamento entre os sistemas com laje (LI, SO e TV) e com telhas (TC e FI), que ganham e perdem calor mais rapidamente devido à sua alta transmitância térmica. Às 9h os sistemas laje impermeabilizada (LI), solo nu (SO) e telhado verde (TV) apresentaram pouca variação da temperatura superficial interna média (Ts.in), chegando apenas a 0,5°C. Já às 15h, TV possui Ts.in menor 3,5°C que o sistema SO e 7,0°C menor que a temperatura superficial do sistema FI. No período noturno, mais especificamente às 21h, o efeito da inércia térmica é evidente nos sistemas SO e TV, que apresentaram-se mais aquecidos que os demais cerca de 2,4°C a 6,1°C.

Após o período de exposição à radiação solar, o calor armazenado nas coberturas é emitido por radiação para o interior do ambiente. Como os sistemas SO e TV possuem mais massa térmica que os demais, eles armazenam uma maior quantidade de calor e adiam sua transmissão para o interior, o que explica as $T_{s.in}$ menores durante o dia e maiores valores no início do período noturno.

Quadro 28 - Imagens termográficas internas das coberturas às 3h, 9h, 15h e 21h no dia 06/12/2018

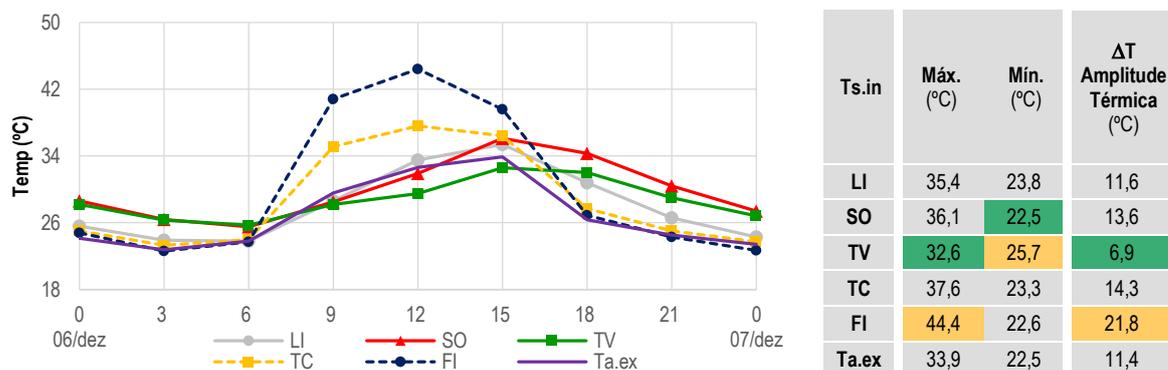


Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento gráfico da $T_{s.in}$ (temperatura superficial interna) apresentado na Figura 111 destaca SO e TV com valores bastante próximos entre si durante a madrugada, enquanto LI, TC e FI se aproximam da temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$). No período diurno, as células teste com laje (LI, SO e TV) aqueceram mais lentamente e alcançaram o pico de temperatura às 15h, enquanto os demais (TC e FI) às 12h, uma diferença de 3h entre as coberturas.

O sistema FI (telha de fibrocimento) se destaca como o menos aquecido na madrugada e noite e com temperaturas mais elevadas durante o dia, seguido por TC, LI, SO e TV. A amplitude no telhado verde foi 14,9°C menor que o valor encontrado no sistema com telha de fibrocimento (FI), que apresentou a maior amplitude entre as coberturas monitoradas (21,8°C).

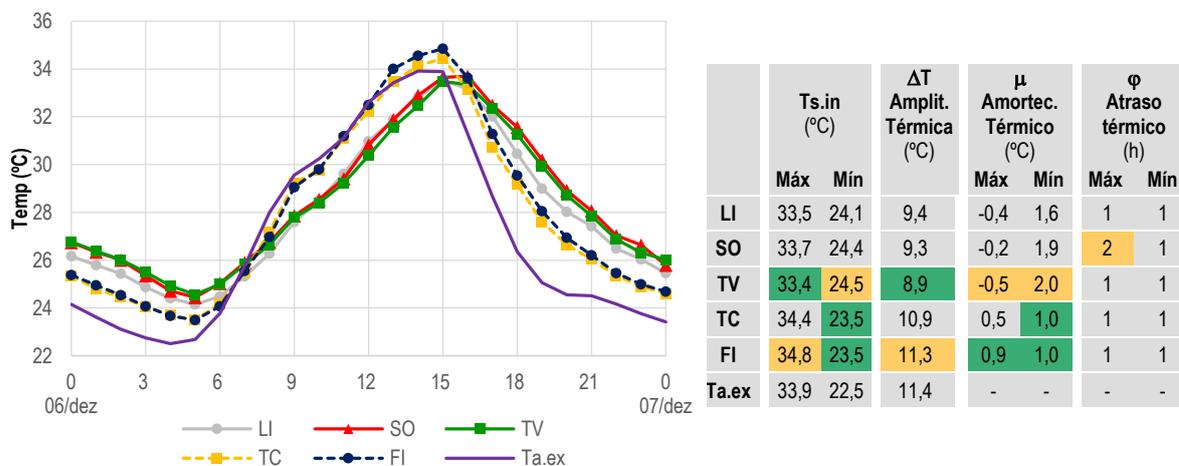
Figura 111 - Gráfico do comportamento da Ts.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ts.in e amplitude térmica das coberturas no dia 06/12/2018



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados de temperatura do ar interno (Ta.in) são apresentados na Figura 112 e demonstram grande influência da massa térmica no comportamento interno do ambiente. Os sistemas com telha apresentaram valores próximos à Ta.ex, mostrando-se menos propícios ao controle das condições extremas externas, quando comparados às demais coberturas analisadas. Já os sistemas SO e TV apresentaram valores muito próximos entre si durante todo o período monitorado, com variações que chegam apenas a 0,45°C, diferente do que ocorreu nas temperaturas superficiais (Ts.ex e Ts.in), nas quais as diferenças chegaram a 12,2°C e 3,5°C, respectivamente.

Figura 112 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas células teste, valores máximos e mínimos da Ta.in, amplitude, amortecimento e atraso térmico das coberturas no dia 06/12/2018



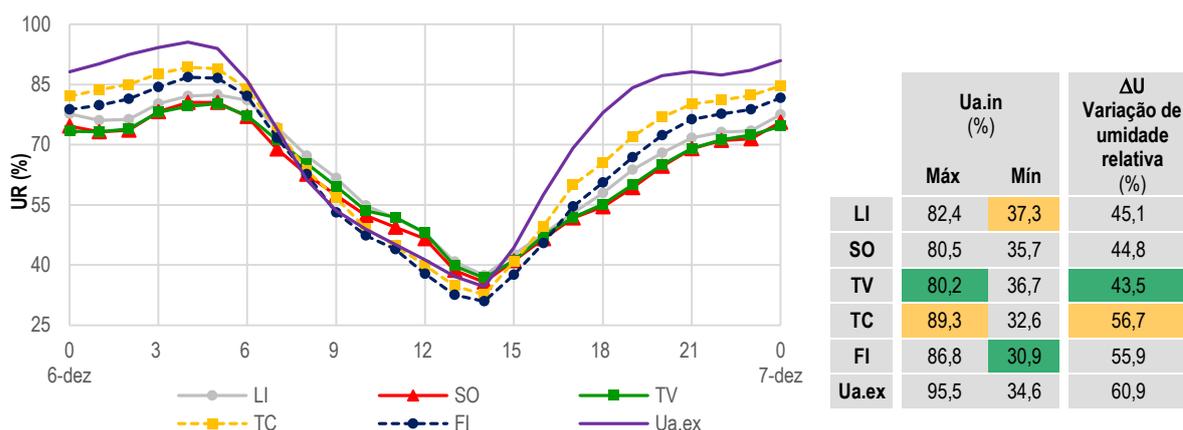
Fonte: Elaborado pelo autor

A menor amplitude térmica da Ta.in (8,9°C) foi alcançada no sistema com telhado verde (TV), enquanto a maior (11,3°C) foi registrada na telha de fibrocimento (FI), que, por sua vez,

foi próxima à amplitude externa (11,4°C). O maior amortecimento térmico das máximas $T_{a.in}$ aconteceu no TV, diferente do sistema FI, que ao invés de amortecer, apresentou-se mais aquecido 0,9°C que o ar externo. Quanto ao atraso térmico, apenas o solo nu (SO) obteve um maior atraso, 2h na máxima $T_{a.in}$, uma vez que é o sistema com maior massa térmica.

A Figura 113 apresenta o comportamento da umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$), em que os sistemas com laje (LI, SO e TV) mantêm o ambiente interno levemente mais úmido durante o dia, que as coberturas com telha (TC e FI), principalmente próximos às 12h. Durante a noite a estrutura laje evita que o pico de umidade relativa interna seja menor que os valores externos, principalmente os sistemas SO e TV. O valor máximo de $U_{a.in}$ foi registrado na cobertura TC (89,3%) enquanto o TV apresentou o mínimo das máximas (80,2%), com uma diferença de 9,1% (acima da faixa máxima de precisão do equipamento, $\pm 5,0\%$).

Figura 113 - Gráfico do comportamento da $U_{a.in}$ nas células teste, valores máximos e mínimos da $U_{a.in}$ e variação de umidade relativa do ar nas coberturas no dia 06/12/2018



Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação de coberturas vegetadas nos telhados das edificações é uma solução pertinente quanto ao seu desempenho térmico, já comprovado por muitos autores na literatura, principalmente para localidades de climas frios e temperados. Em se tratando de climas mais quentes e secos, esse sistema apresenta algumas dificuldades de implantação, como a própria escassez de água para irrigação das plantas. Apesar das diferenças nos comportamentos das variáveis superficiais e do ar interno monitoradas nas células teste, pode-se concluir que o sistema de telhado verde apresentou um bom desempenho térmico dentre as coberturas analisadas, principalmente na redução da amplitude térmica. Por fim, destaca-se o comportamento laje impermeabilizada com solo nu (SO) na temperatura do ar interno que foi semelhante ao comportamento do telhado verde (TV), apesar de ter apresentado altas temperaturas superficiais externas.

APÊNDICE B — Memorial de cálculo das transmitâncias

O site ProjetEEE - Projetando Edificações Energeticamente Eficientes (PROJETEEE, 2020) apresenta propriedades térmicas de alguns sistemas de vedações, cobertura e materiais construtivos, dentre elas, capacidade térmica, atraso e transmitância. Os sistemas de cobertura telha cerâmica (TC), telha de fibrocimento (FI) e laje impermeabilizada (LI), utilizados nesta pesquisa, foram encontrados na lista das coberturas apresentadas pelo site, portanto possuem transmitância térmica pré-calculadas: 4,55W/(m²K) para TC; 4,60W/(m²K) para FI; e 2,89W/(m²K) para LI.

Quanto às coberturas com solo nu (SO), telhado verde (TV-zj, TV-cr, TV-dt) e o telhado verde sem vegetação (SV), não corresponderam aos sistemas no site, portanto foi necessário realizar o cálculo das transmitâncias de cada cobertura a partir das Equações 1 (resistência térmica de uma camada homogênea de material sólido), 2 (resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor) e 3 (transmitância térmica de componentes, de ambiente a ambiente) disponíveis na NBR 15220-2 (Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações) (ABNT, 2003b), utilizando valores disponíveis na literatura para os parâmetros necessários (Quadro 29).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1)$$

Onde:

R = Resistência térmica de um componente (m²K/W);

e = Espessura da camada (m);

λ = Condutividade térmica do material (W/(mK)).

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (2)$$

Onde:

R_T = Resistência térmica de ambiente a ambiente (m²K/W);

R_{se} e R_{si} = Resistências superficiais externa e interna, respectivamente (m²K/W);

R_t = Resistência térmica de superfície a superfície (m²K/W).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (3)$$

Onde:

U= Transmitância térmica de um componente (W/(m²K));

R_T= Resistência térmica de ambiente a ambiente (m²K/W).

Quadro 29 - Propriedades térmicas utilizadas no cálculo da transmitância nas coberturas SO, SV e telhados verdes

Propriedade térmica		Valor	Referência
Resistência térmica da laje cerâmica 12,0cm	R _{laje}	0,35 m ² K/W	ProjetEEE (2020)
Resistência térmica de uma camada de 10,0cm de solo seco	R _{solo10}	0,4 m ² K/W	Sadineni, Madala e Boehm (2011)
Resistência térmica de um sistema de telhado verde composto por laje pré-moldada cerâmica (12,0cm), 10,0cm de terra argilosa seca e vegetação	R _{telhado verde}	0,54 m ² K/W	ProjetEEE (2020)
Condutividade térmica da argila expandida	λ _{argila}	0,16 W/mK	ABNT, 2003b
Aumento da resistência térmica proporcionado pela presença de umidade (40%) em 10,0cm de solo	R _{umid}	0,063 W/mK	Sadineni, Madala e Boehm (2011)

Fonte: Elaborado pelo autor

Cálculo da transmitância do sistema **solo nu** (SO: U_{SO}), composto de laje impermeabilizada e uma camada de 17,0cm de solo natural sem cobertura vegetal:

Dado R_{laje}=0,35m²K/W encontra-se a R_{t laje}=0,14m²K/W a partir da Equação 2, considerando que o fluxo de calor é descendente e portanto R_{se} e R_{si} correspondem a 0,04m²K/W e 0,17m²K/W respectivamente, segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2003b). Dado R_{solo10}=0,4m²K/W encontra λ_{solo}=0,25W/mK e, em consequência, R_{solo17}=0,68m²K/W a partir da Equação 1. Por fim, somando R_{se}, R_{si}, R_{t laje}, R_{solo17}, chega-se a R_{T SO}=1,03m²K/W por meio da Equação 2 e a **U_{SO}=0,97W/(m²K)** a partir da Equação 3.

Cálculo da transmitância dos sistemas de **telhado verde** (TV-zj, TV-cr, TV-dr: U_{TV}), composto de laje impermeabilizada, 7,0cm de argila expandida, 10,0cm de substrato úmido e uma camada de vegetação:

Dado λ_{argila}=0,16W/mK encontra-se R_{argila}=0,437m²K/W a partir da Equação 1. Dado R_{telhado verde}=0,54m²K/W encontra-se a R_{subs e veg}=0,19m²K/W a partir da Equação 2, considerando fluxo de calor descendente e portanto R_{se} e R_{si} correspondem a 0,04m²K/W e 0,17m²K/W respectivamente, segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2003b). Por fim, somando R_{se}, R_{si}, R_{t laje},

$R_{\text{subs e veg}}$, R_{argila} , e R_{umid} chega-se a $R_{T \text{ TV}}=1,04\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ por meio da Equação 2 e a $U_{\text{TV}}=0,96\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ a partir da Equação 3.

Cálculo da transmitância do sistema **sem vegetação** (SV: U_{TV}), composto de laje impermeabilizada, 7,0cm de argila expandida e 10,0cm de substrato úmido:

Somando R_{se} , R_{si} , R_{laje} , R_{solo10} , R_{argila} , e R_{umid} chega-se a $R_{T \text{ SV}}=1,25\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ por meio da Equação 2 e a $U_{\text{sv}}=0,80\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ a partir da Equação 3.

APÊNDICE C – Teste do fator de conversão

A Tabela 36 apresenta os dados monitorados e os dados corrigidos a partir do fator de conversão, respectivamente. Os valores coletados na célula teste 01 (CT 01) não sofreram modificações pois ela foi escolhida como padrão para gerar o fator de conversão. O monitoramento horário da temperatura do ar interno (Ta.in) e da umidade relativa do ar externo (Ua.ex) foi realizado nos dias 19, 20 e 21 de junho de 2019. As células teste se apresentavam idênticas do ponto de vista construtivo e todas possuíam cobertura com laje impermeabilizada, o sistema de cobertura descrito na seção 4.2.3. Nos gráficos das Figura 114 e 115 estão expressos os valores da temperatura e umidade relativa do ar monitorados e corrigidos, respectivamente. É possível observar que as diferenças de comportamento entre as células testes são reduzidas e os gráficos de cada variável nas três (3) células teste se alinham. Esse comportamento é importante pois prova a funcionalidade da correção dos dados e reduz ao mínimo as diferenças entre as células teste, já que durante o monitoramento das etapas desta pesquisa, a variação de comportamento entre as variáveis nas células teste foi o objeto de análise dos dados.

Tabela 36 - Dados monitorados e corrigidos do monitoramento das células teste nos dias 19, 20 e 21 de julho de 2019

Data	Hora (h)	DADOS MONITORADOS						DADOS CORRIGIDOS					
		CT 01 (HOBO 01)		CT 02 (HOBO 02)		CT 03 (HOBO 03)		CT 01 (HOBO 01)		CT 02 (HOBO 02)		CT 03 (HOBO 03)	
		Ta.in (°C)	Ua.in (°C)										
19/jul	00	21,75	91,26	21,78	93,61	21,97	92,93	21,75	91,26	21,70	90,98	21,81	90,67
	01	21,39	91,25	21,47	93,83	21,63	92,92	21,39	91,25	21,37	91,20	21,45	90,81
	02	21,01	91,43	21,16	94,05	21,30	93,12	21,01	91,43	21,00	91,67	21,07	91,26
	03	20,75	91,81	20,94	94,52	21,06	93,33	20,75	91,81	20,77	92,25	20,80	91,82
	04	20,63	92,43	20,82	94,52	20,92	93,79	20,63	92,43	20,63	92,45	20,68	92,52
	05	20,49	92,21	20,70	94,76	20,80	93,78	20,49	92,21	20,50	92,44	20,54	92,26
	06	20,30	92,63	20,51	94,75	20,61	94,01	20,30	92,63	20,32	92,94	20,37	92,60
	07	20,70	94,02	20,82	96,70	20,70	94,76	20,70	94,02	20,69	94,71	20,62	93,67
	08	21,78	94,33	21,82	95,64	21,70	94,58	21,78	94,33	21,67	93,69	21,80	93,16
	09	22,64	92,32	22,69	95,43	22,54	95,15	22,64	92,32	22,53	92,92	22,70	92,03
	10	23,50	91,33	23,48	94,95	23,33	95,21	23,50	91,33	23,43	92,34	23,56	91,24
	11	24,42	87,74	24,30	91,77	24,15	92,83	24,42	87,74	24,42	88,53	24,52	87,09
	12	25,34	82,34	25,05	87,44	24,95	88,52	25,34	82,34	25,26	83,84	25,39	82,54
13	26,09	75,88	25,63	80,45	25,60	83,49	26,09	75,88	26,01	76,66	26,10	77,33	
14	26,53	71,41	25,97	76,59	25,99	80,52	26,53	71,41	26,42	72,05	26,51	73,06	
15	26,77	68,71	26,14	73,93	26,14	78,10	26,77	68,71	26,56	69,74	26,63	71,25	
16	26,36	70,67	25,90	74,95	25,99	77,61	26,36	70,67	26,20	71,10	26,29	71,39	
17	25,87	75,01	25,53	79,29	25,68	80,62	25,87	75,01	25,73	76,23	25,69	76,52	
18	25,00	78,56	24,76	82,56	25,02	83,50	25,00	78,56	24,91	79,24	24,95	79,54	
19	24,20	81,99	24,01	85,15	24,30	85,52	24,20	81,99	24,13	82,29	24,19	82,19	
20	23,57	84,92	23,48	87,88	23,69	87,88	23,57	84,92	23,57	85,43	23,58	85,15	

(continua)

(continuação)

19/jul	21	23,02	86,72	22,95	89,31	23,12	88,98	23,02	86,72	22,99	87,07	23,00	86,95
	22	22,52	87,28	22,49	90,35	22,61	90,17	22,52	87,28	22,52	88,19	22,49	87,87
	23	22,09	88,32	22,11	91,67	22,18	91,28	22,09	88,32	22,08	89,17	22,05	89,01
20/jul	00	21,70	89,28	21,78	92,49	21,82	91,86	21,70	89,28	21,70	89,85	21,66	89,60
	01	21,47	89,96	21,56	92,91	21,61	92,27	21,47	89,96	21,47	90,29	21,43	90,16
	02	21,11	90,30	21,25	92,90	21,30	92,46	21,11	90,30	21,10	90,52	21,07	90,61
	03	20,77	90,65	20,92	93,10	20,99	92,66	20,77	90,65	20,74	90,83	20,73	91,15
	04	20,46	90,64	20,68	93,31	20,73	92,87	20,46	90,64	20,49	91,25	20,49	91,59
	05	20,30	91,20	20,49	93,77	20,54	93,08	20,30	91,20	20,29	91,45	20,28	91,55
	06	20,27	91,99	20,49	94,00	20,51	93,53	20,27	91,99	20,30	92,19	20,27	92,12
	07	20,63	92,64	20,82	95,03	20,75	94,51	20,63	92,64	20,69	93,04	20,67	93,42
	08	21,56	93,83	21,73	95,91	21,49	94,31	21,56	93,83	21,58	93,96	21,58	92,89
	09	22,52	92,96	22,69	95,16	22,45	94,63	22,52	92,96	22,53	92,65	22,61	91,50
	10	23,81	88,35	23,96	90,39	23,62	91,94	23,81	88,35	23,91	87,78	23,85	87,97
	11	24,71	82,77	24,68	85,02	24,39	87,89	24,71	82,77	24,80	81,78	24,76	82,15
	12	25,07	81,86	24,92	84,53	24,80	85,14	25,07	81,86	25,14	80,93	25,24	79,15
	13	25,58	83,60	25,39	86,58	25,24	87,01	25,58	83,60	25,77	82,79	25,73	80,85
	14	25,87	77,07	25,60	81,17	25,46	83,38	25,87	77,07	26,06	76,63	25,98	75,92
	15	25,94	75,84	25,75	79,60	25,58	81,08	25,94	75,84	26,17	75,41	26,07	74,24
	16	26,09	75,10	25,90	79,19	25,75	80,98	26,09	75,10	26,20	75,34	26,04	74,77
	17	25,63	79,61	25,48	82,13	25,60	82,84	25,63	79,61	25,68	79,07	25,62	78,74
	18	25,26	81,19	25,17	84,77	25,22	85,13	25,26	81,19	25,32	81,45	25,14	81,17
	19	24,54	83,52	24,51	86,45	24,61	86,58	24,54	83,52	24,63	83,59	24,51	83,25
	20	23,84	85,03	23,69	87,43	23,79	87,58	23,84	85,03	23,78	84,99	23,68	84,85
	21	23,26	86,72	23,21	88,82	23,26	88,66	23,26	86,72	23,25	86,58	23,14	86,62
	22	22,69	87,57	22,64	89,47	22,76	89,64	22,69	87,57	22,66	87,32	22,64	87,35
23	22,16	87,87	22,21	90,16	22,28	90,34	22,16	87,87	22,17	87,65	22,14	88,07	
21/jul	00	21,58	88,16	21,70	90,50	21,73	90,69	21,58	88,16	21,63	87,87	21,57	88,43
	01	21,16	89,10	21,27	91,44	21,32	91,44	21,16	89,10	21,18	88,81	21,14	89,33
	02	20,77	90,11	20,94	92,03	20,99	91,82	20,77	90,11	20,79	89,65	20,76	89,97
	03	20,46	91,21	20,65	92,86	20,70	92,22	20,46	91,21	20,48	90,59	20,45	90,71
	04	20,44	93,07	20,61	94,50	20,61	93,31	20,44	93,07	20,42	92,44	20,37	92,03
	05	20,42	92,42	20,61	94,25	20,63	93,54	20,42	92,42	20,41	91,94	20,38	92,02
	06	20,44	92,00	20,58	93,31	20,61	93,31	20,44	92,00	20,39	91,49	20,37	91,90
	07	20,61	92,64	20,70	93,54	20,73	93,32	20,61	92,64	20,57	91,56	20,65	92,22
	08	21,82	89,62	22,06	92,08	21,68	93,14	21,82	89,62	21,91	90,13	21,78	91,73
	09	23,17	85,66	23,41	87,88	22,85	90,54	23,17	85,66	23,25	85,37	23,01	87,42
	10	23,89	84,55	23,91	86,72	23,57	88,99	23,89	84,55	23,86	84,11	23,80	85,02
	11	25,07	77,07	24,85	80,50	24,54	84,08	25,07	77,07	24,97	77,26	24,91	78,34
	12	26,04	69,30	25,82	72,32	25,39	77,80	26,04	69,30	26,04	68,72	25,82	71,81
	13	26,68	67,43	26,19	71,24	26,02	74,88	26,68	67,43	26,57	67,45	26,51	68,73
	14	27,07	66,82	26,53	71,15	26,46	73,79	27,07	66,82	26,99	66,61	26,98	66,32
	15	27,04	67,30	26,60	70,88	26,58	73,20	27,04	67,30	27,03	66,70	27,07	66,36
	16	26,65	71,05	26,38	74,23	26,48	76,88	26,65	71,05	26,69	70,38	26,77	70,66
	17	25,94	76,27	25,82	78,65	26,12	79,74	25,94	76,27	26,02	75,59	26,13	75,63
	18	25,17	77,19	25,05	79,56	25,41	80,21	25,17	77,19	25,20	76,24	25,34	76,24
	19	24,73	79,58	24,59	82,07	24,88	82,97	24,73	79,58	24,71	79,21	24,77	79,64
	20	24,10	82,00	24,08	83,97	24,37	84,66	24,10	82,00	24,17	81,53	24,26	81,93
	21	23,53	83,88	23,53	85,92	23,79	85,78	23,53	83,88	23,57	83,68	23,67	83,75
22	23,19	85,79	23,19	87,29	23,38	87,73	23,19	85,79	23,21	85,13	23,26	85,43	

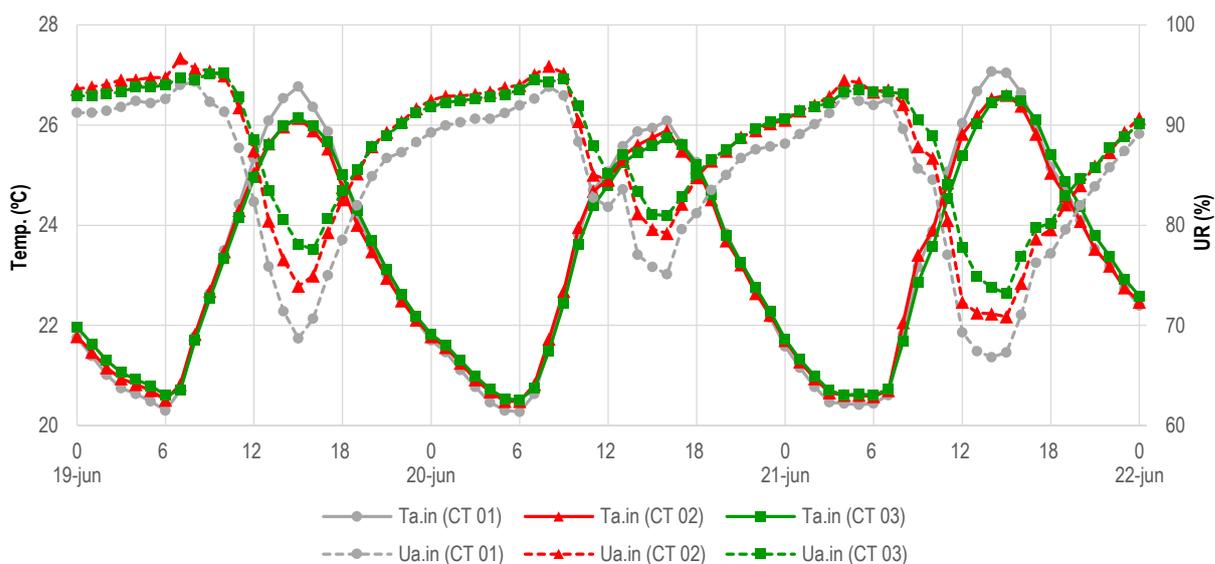
(continua)

(continuação)

21/jul	23	22,73	87,43	22,76	89,30	22,93	88,81	22,73	87,43	22,73	86,80	22,79	86,54
22/jul	00	22,40	89,13	22,47	90,71	22,59	90,17	22,40	89,13	22,40	88,08	22,43	87,91

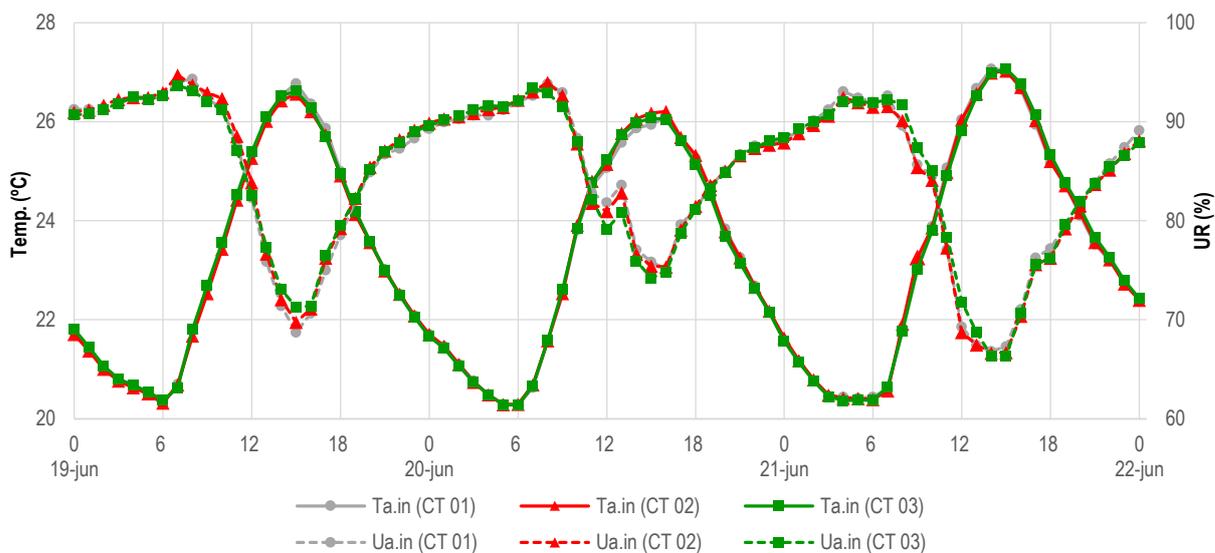
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 114 - Gráfico do comportamento da Ta.in e da Ua.in monitoradas nas células teste de 19 a 21/06/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 115 - Gráfico do comportamento da Ta.in e da Ua.in corrigidas nas células teste de 19 a 21/06/2019



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE D — Cálculo da Zona de Conforto

A Zona de conforto para os dias monitorados foi calculada a partir da T_{pmo} , temperatura média prevalente do ar exterior (*Prevailing Mean Outdoor Air Temperature*), citada na ASHRAE 55/2013 e na BS EN 15231/2007⁶⁴ (*Running Mean Outdoor Temperature*). Ela refere-se a uma temperatura representativa de um dia com histórico de temperaturas externas correspondente aos sete (7) dias anteriores, simulando o contexto climático em que o ocupante da edificação estava inserido. A Equação 4 apresenta o cálculo da T_{pmo} , que consiste na média aritmética das temperaturas médias diárias do ar exterior de um período de sete (7) dias (NASCIMENTO, 2016).

$$T_{pmo} = (1 - \alpha) T_{me(n-1)} + \alpha T_{rm(n-1)} \quad (4)$$

Onde:

T_{pmo} = Temperatura média prevalente do ar no exterior;

$T_{me(n-1)}$ = Temperatura média do ar no exterior, para o dia anterior;

$T_{rm(n-1)}$ = Temperatura média corrente do ar no exterior, para o dia anterior.

α = Constante entre 0 e 1 (foi utilizado 0,8, semelhante a Nascimento (2016) em sua avaliação da NBR 15575 com estudo de caso na cidade de Maceió-AL).

A partir do valor da T_{pmo} foram calculados os limites superior e inferior (Equações 5 e 6) da zona de conforto, utilizando um nível de aceitabilidade de 80% para o conforto térmico (ASHRAE, 2013). Para cada dia e/ou período monitorado, foram calculadas as temperaturas médias do ar exterior (T_{me}), a temperatura média prevalente do ar exterior (T_{pmo}) e os limites superior e inferior da Zona de Conforto já citada (Quadros 30, 31, 32, Tabela 37 e Figura 116).

$$\text{Limite superior: } T_{o_s} = 0,31T_{pmo} + 21,3 \quad (5)$$

$$\text{Limite inferior: } T_{o_i} = 0,31T_{pmo} + 14,3 \quad (6)$$

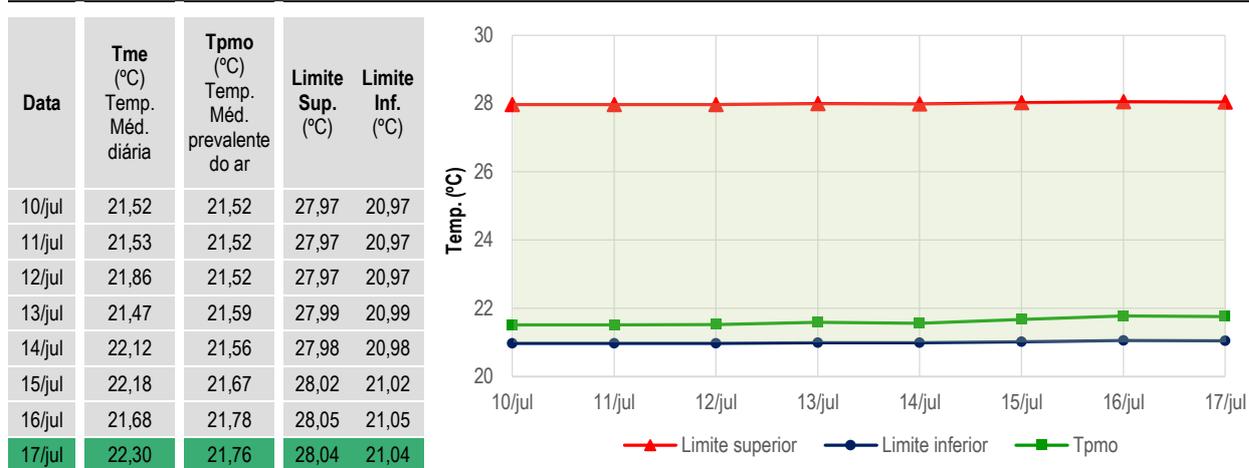
Onde:

T_o = Valor limite da temperatura operativa do ambiente interior;

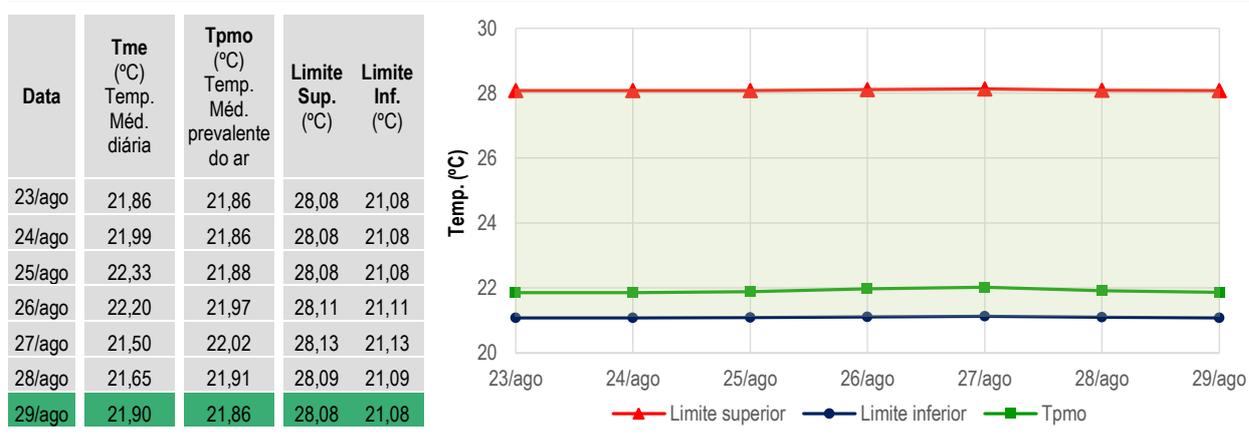
T_{pmo} = Temperatura média prevalente do ar no exterior.

⁶⁴ A norma BS EN 15231/2007 é a versão inglesa (*BSI – British Standard*) da norma europeia que foi aprovada em 26 de março de 2007 pelo CEN, Comitê Europeu de Padronização (*European Committee for Standardization*), que dispõe de suporte para a padronização em diversas áreas e setores, dentre eles, construção, segurança, energia, comida, saúde, máquinas, serviços, transporte etc (NASCIMENTO, 2016).

Quadro 30 – Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 10 a 17/07/2019 e seu comportamento gráfico



Quadro 31 – Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 23 a 29/08/2019 e seu comportamento gráfico



Quadro 32 – Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 07 a 14/11/2019 e seu comportamento gráfico

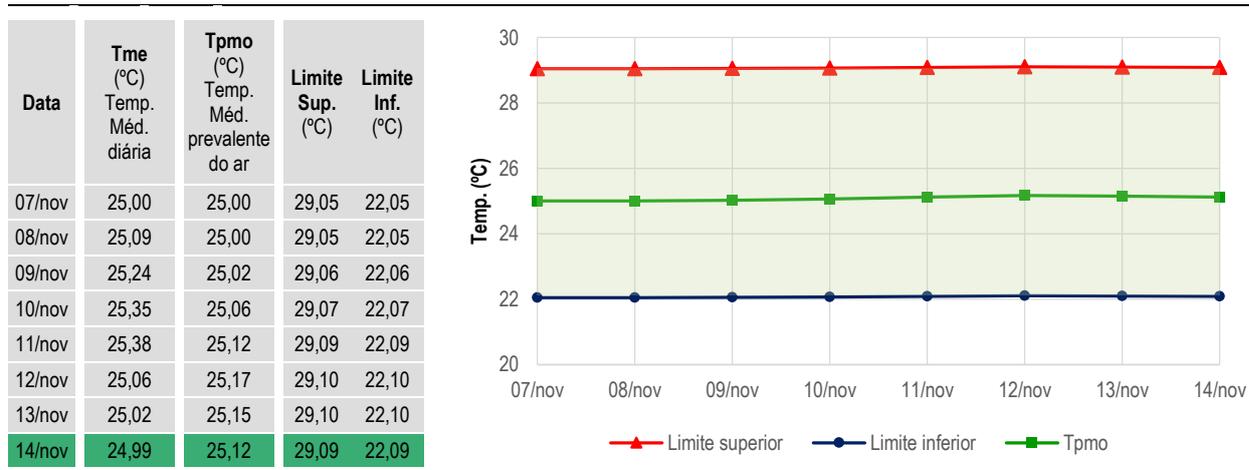
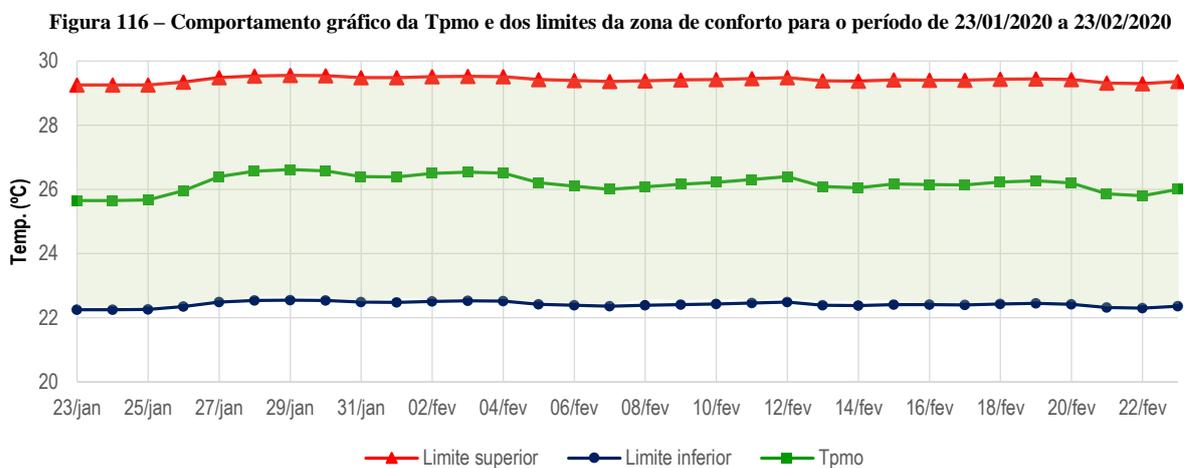


Tabela 37 - Tpmo e limites da zona de conforto para o período de 23/01/2020 a 23/02/2020

Data	Tme (°C) Temp. Méd. diária	Tpmo (°C) Temp. Méd. prevalente do ar	Limite Sup. (°C)	Limite Inf. (°C)	Data	Tme (°C) Temp. Méd. diária	Tpmo (°C) Temp. Méd. prevalente do ar	Limite Sup. (°C)	Limite Inf. (°C)
23/jan	25,65	25,65	29,25	22,25	08/fev	26,49	26,08	29,38	22,38
24/jan	25,76	25,65	29,25	22,25	09/fev	26,46	26,16	29,41	22,41
25/jan	27,10	25,67	29,26	22,26	10/fev	26,67	26,22	29,43	22,43
26/jan	28,18	25,96	29,35	22,35	11/fev	26,77	26,31	29,46	22,46
27/jan	27,26	26,40	29,48	22,48	12/fev	24,85	26,40	29,48	22,48
28/jan	26,80	26,57	29,54	22,54	13/fev	25,88	26,09	29,39	22,39
29/jan	26,43	26,62	29,55	22,55	14/fev	26,65	26,05	29,38	22,38
30/jan	25,70	26,58	29,54	22,54	15/fev	26,08	26,17	29,41	22,41
31/jan	26,34	26,40	29,48	22,48	16/fev	26,10	26,15	29,41	22,41
01/fev	26,91	26,39	29,48	22,48	17/fev	26,60	26,14	29,40	22,40
02/fev	26,73	26,49	29,51	22,51	18/fev	26,43	26,23	29,43	22,43
03/fev	26,36	26,54	29,53	22,53	19/fev	25,92	26,27	29,44	22,44
04/fev	25,01	26,50	29,52	22,52	20/fev	24,50	26,20	29,42	22,42
05/fev	25,70	26,21	29,42	22,42	21/fev	25,55	25,86	29,32	22,32
06/fev	25,57	26,10	29,39	22,39	22/fev	26,81	25,80	29,30	22,30
07/fev	26,41	26,00	29,36	22,36	23/fev	27,38	26,00	29,36	22,36

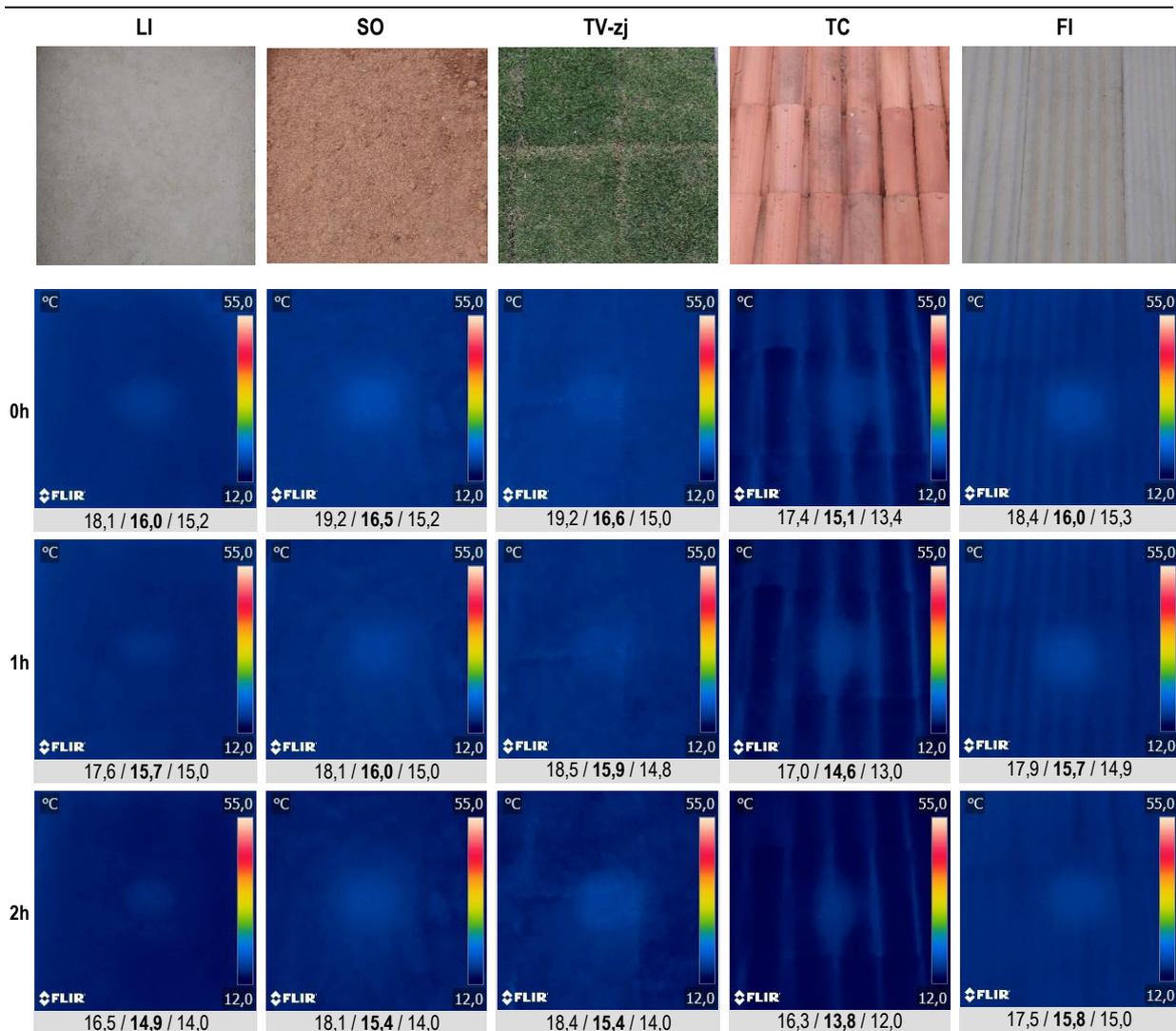
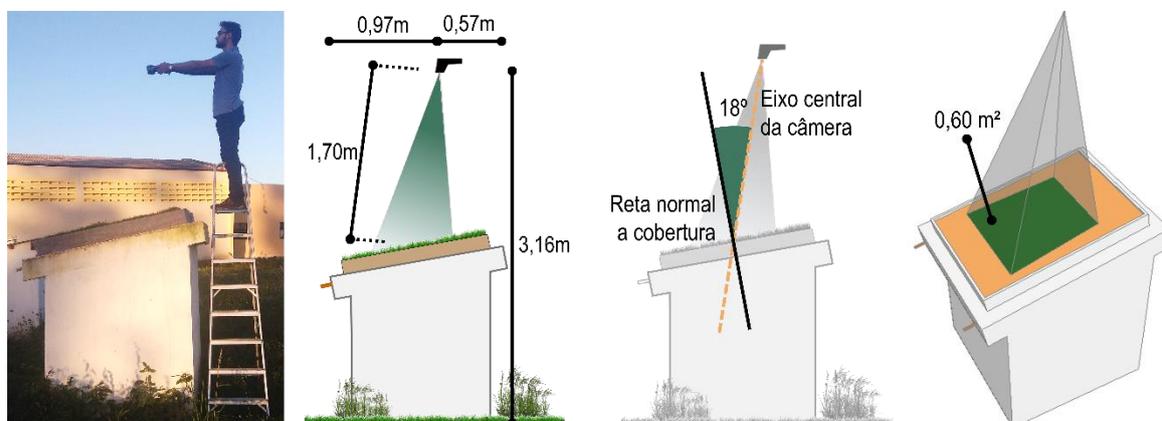
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

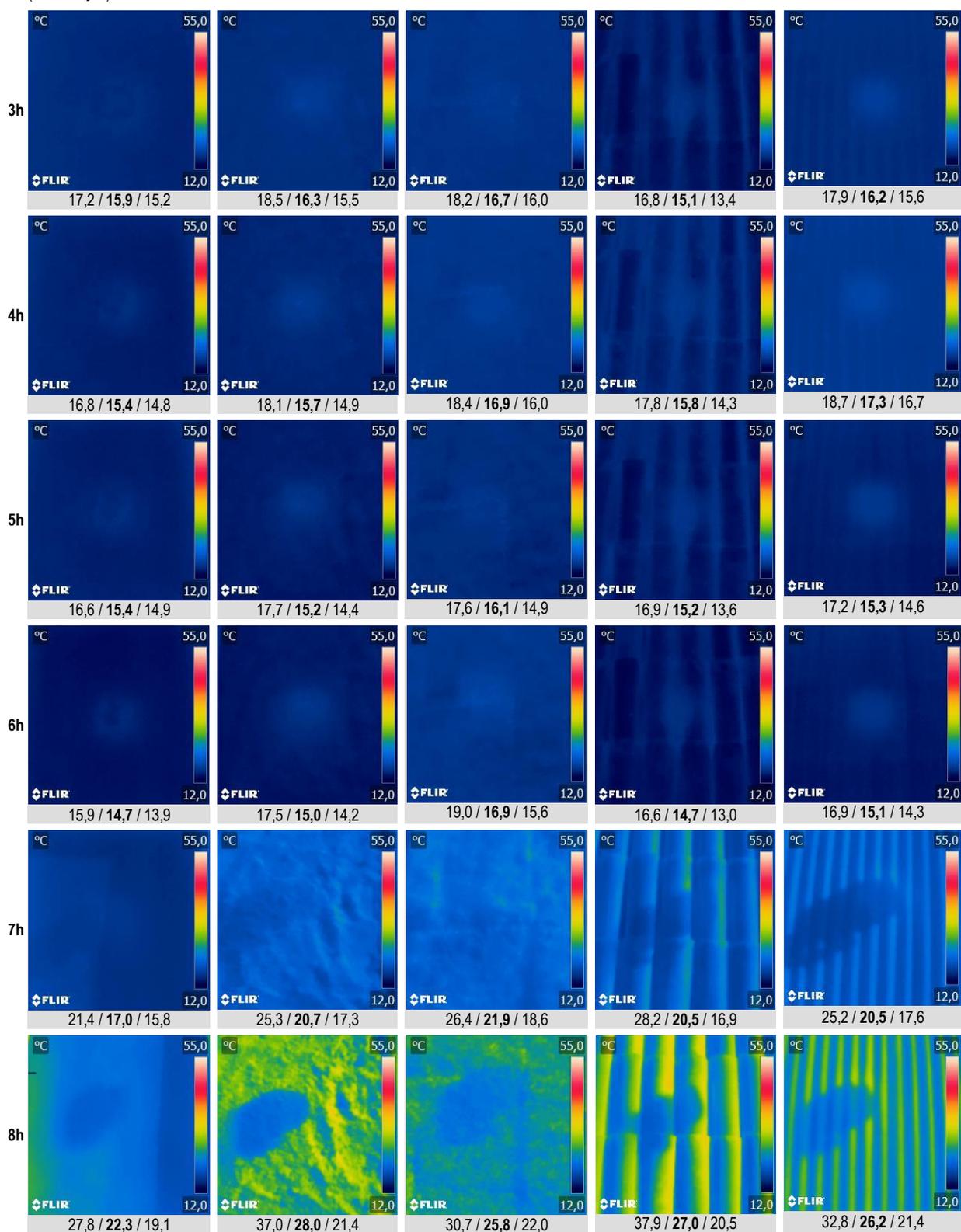
APÊNDICE E — Imagens termográficas - 17/07/2019

Quadro 33 - Imagens termográficas da face externa das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.ex (°C)



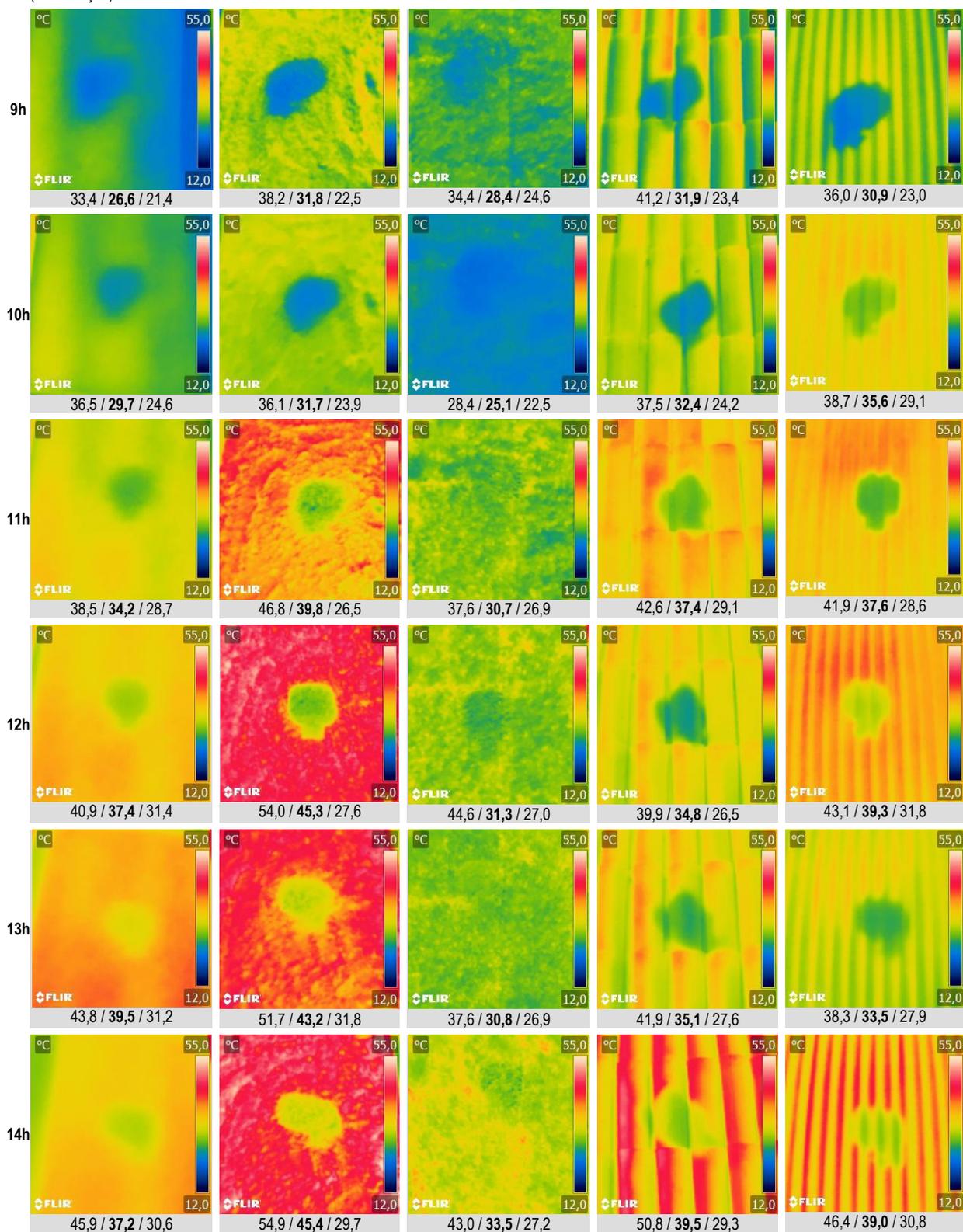
(continua)

(continuação)



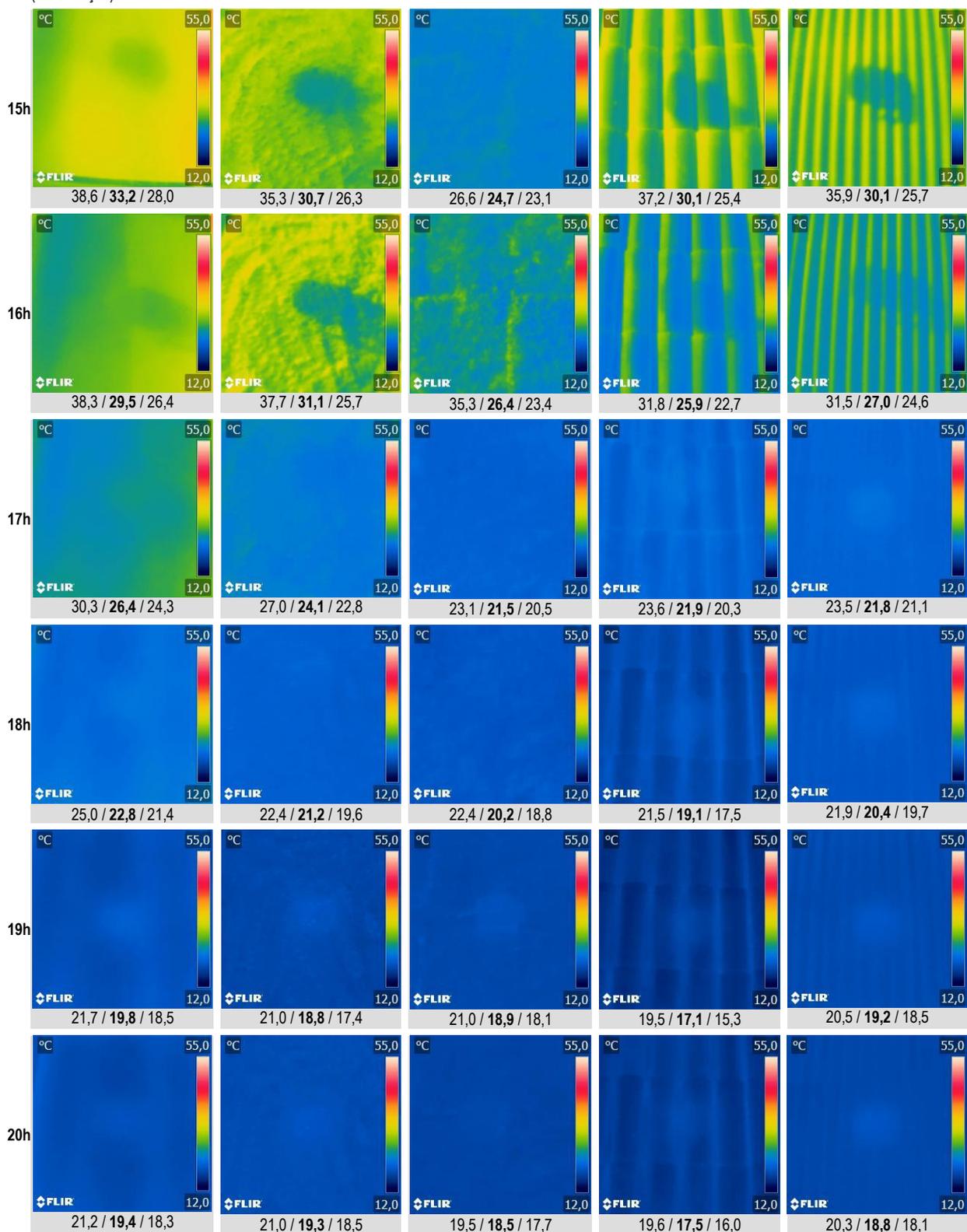
(continua)

(continuação)



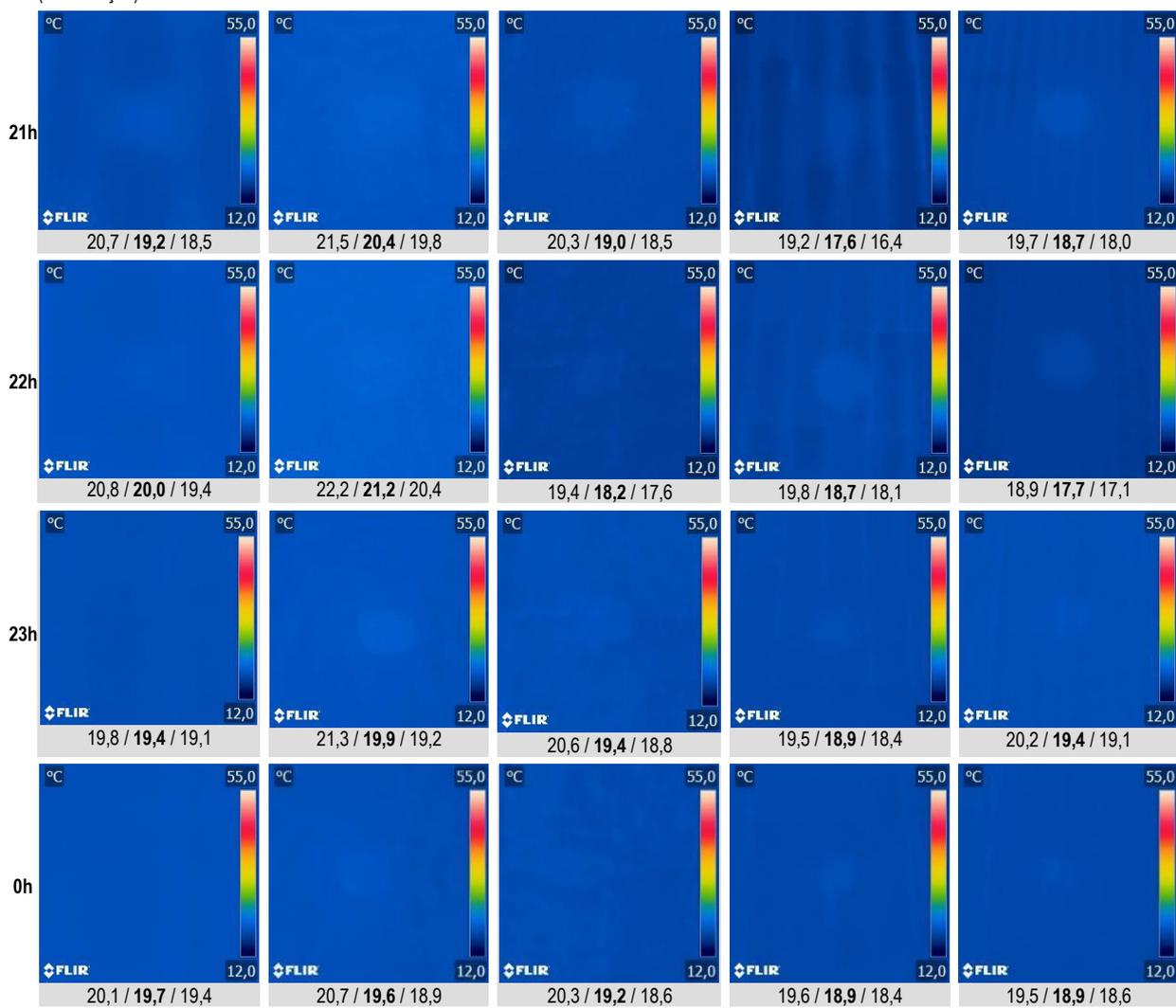
(continua)

(continuação)



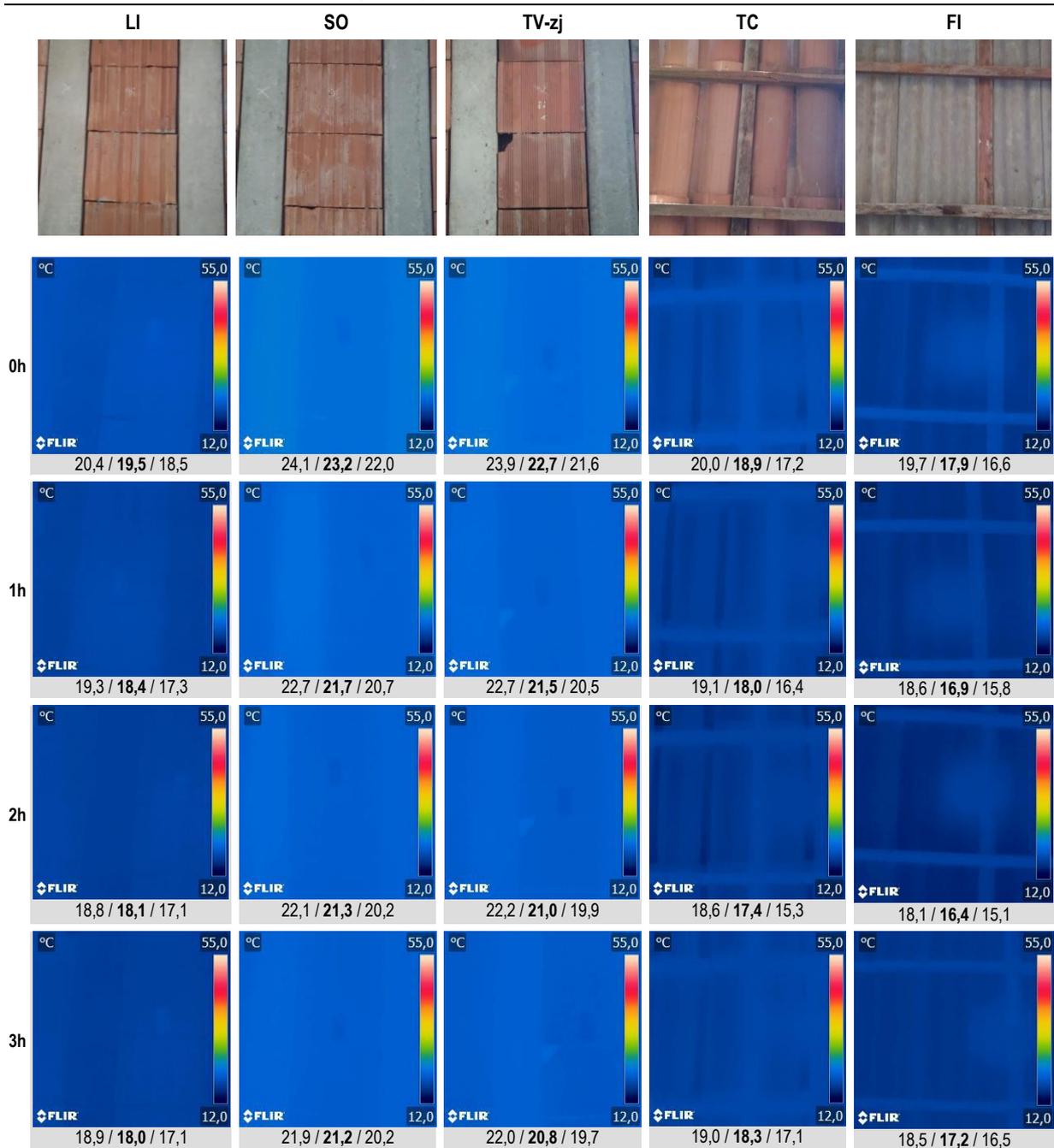
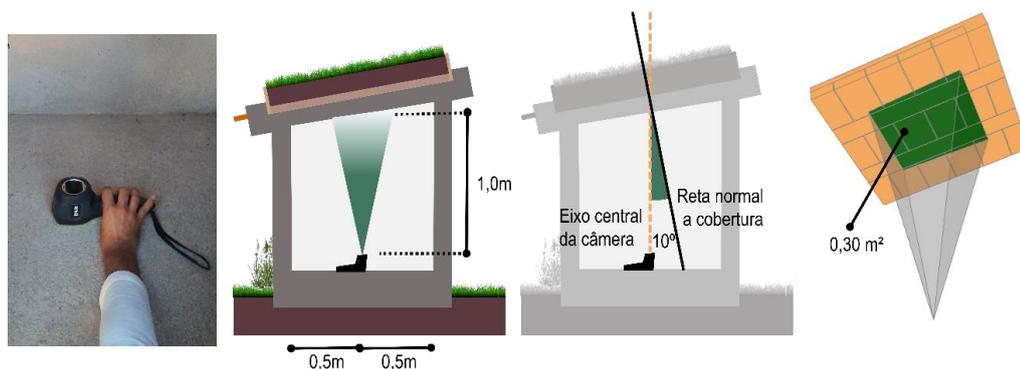
(continua)

(continuação)



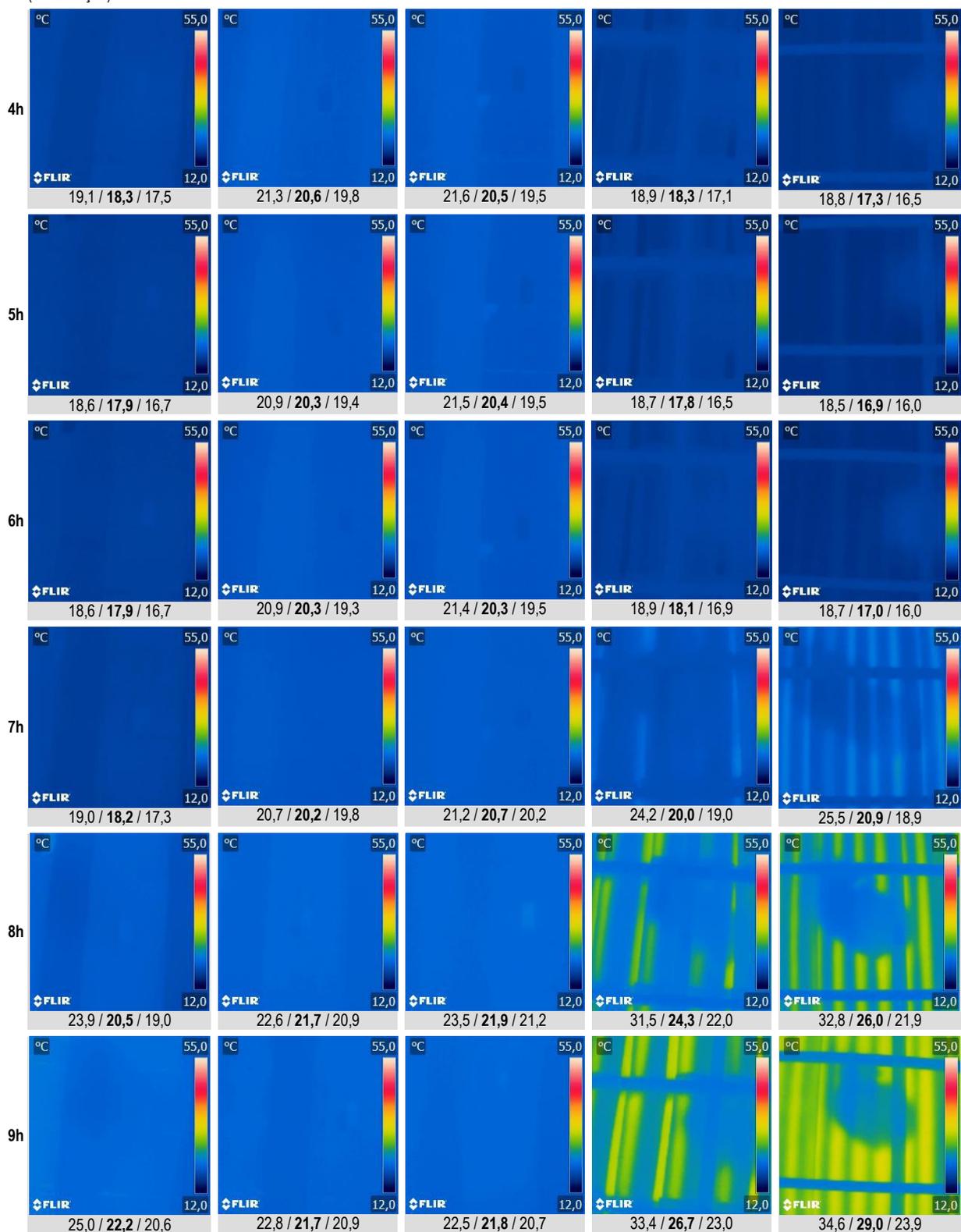
Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 34 - Imagens termográficas da face interna das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.in (°C)



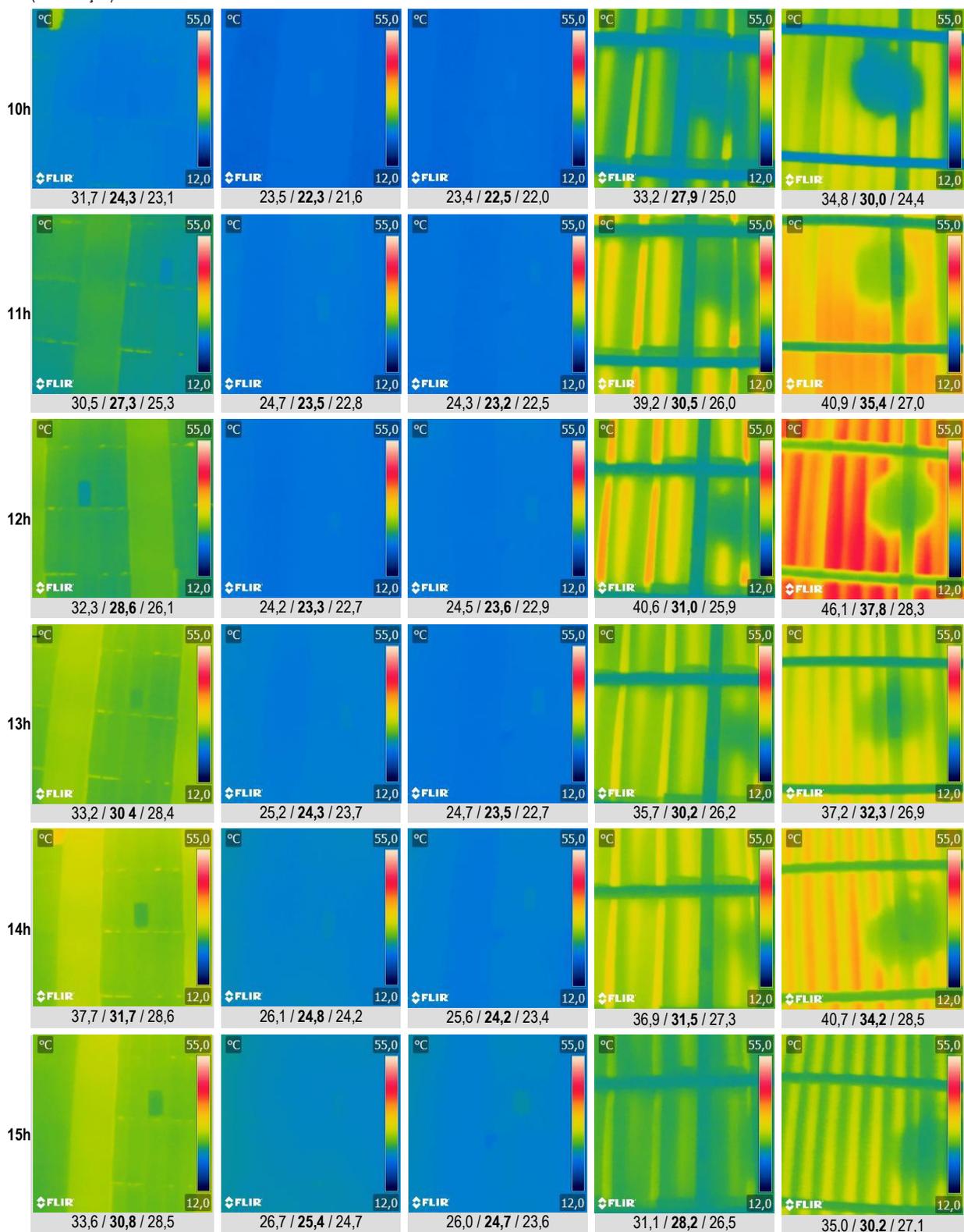
(continua)

(continuação)



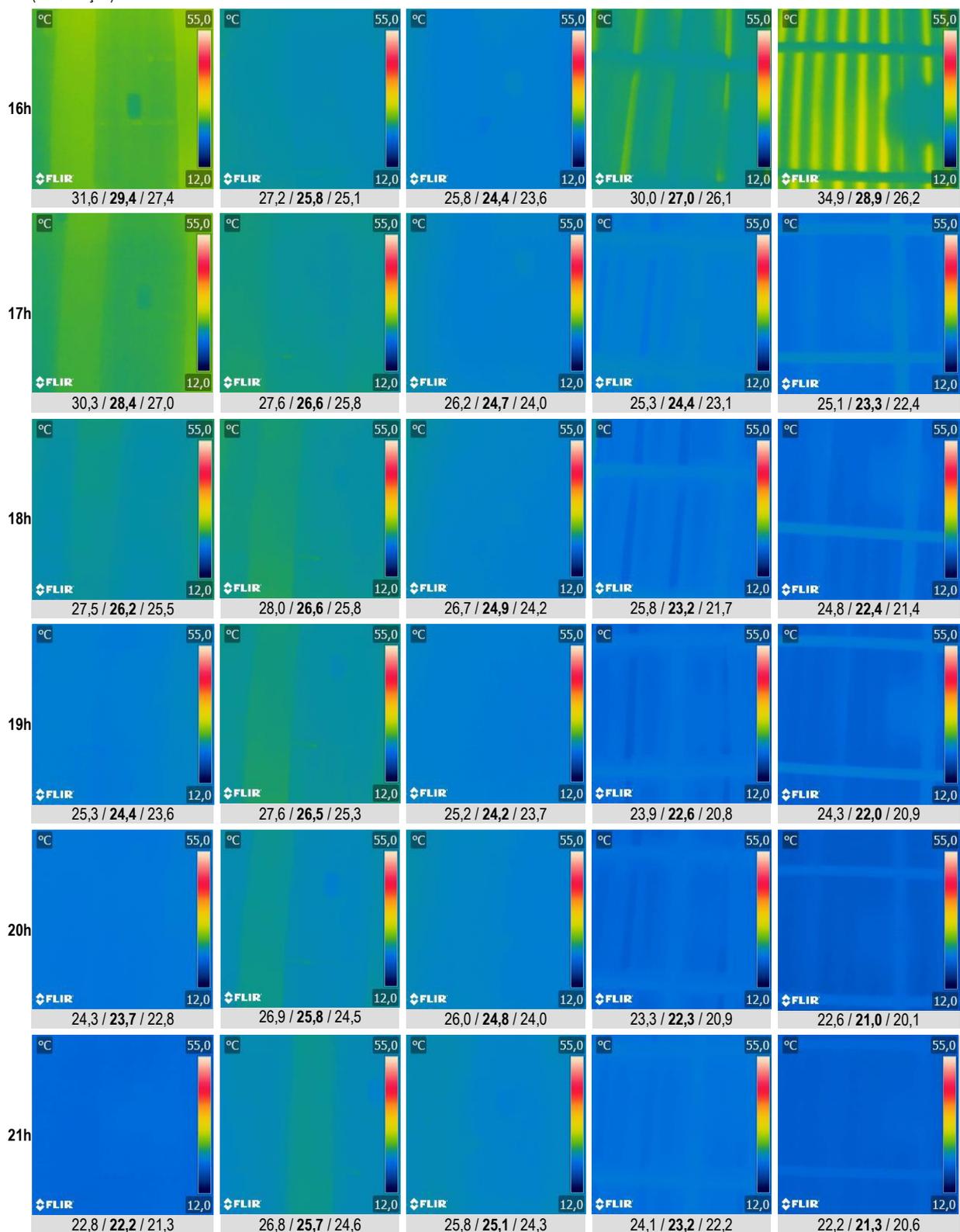
(continua)

(continuação)

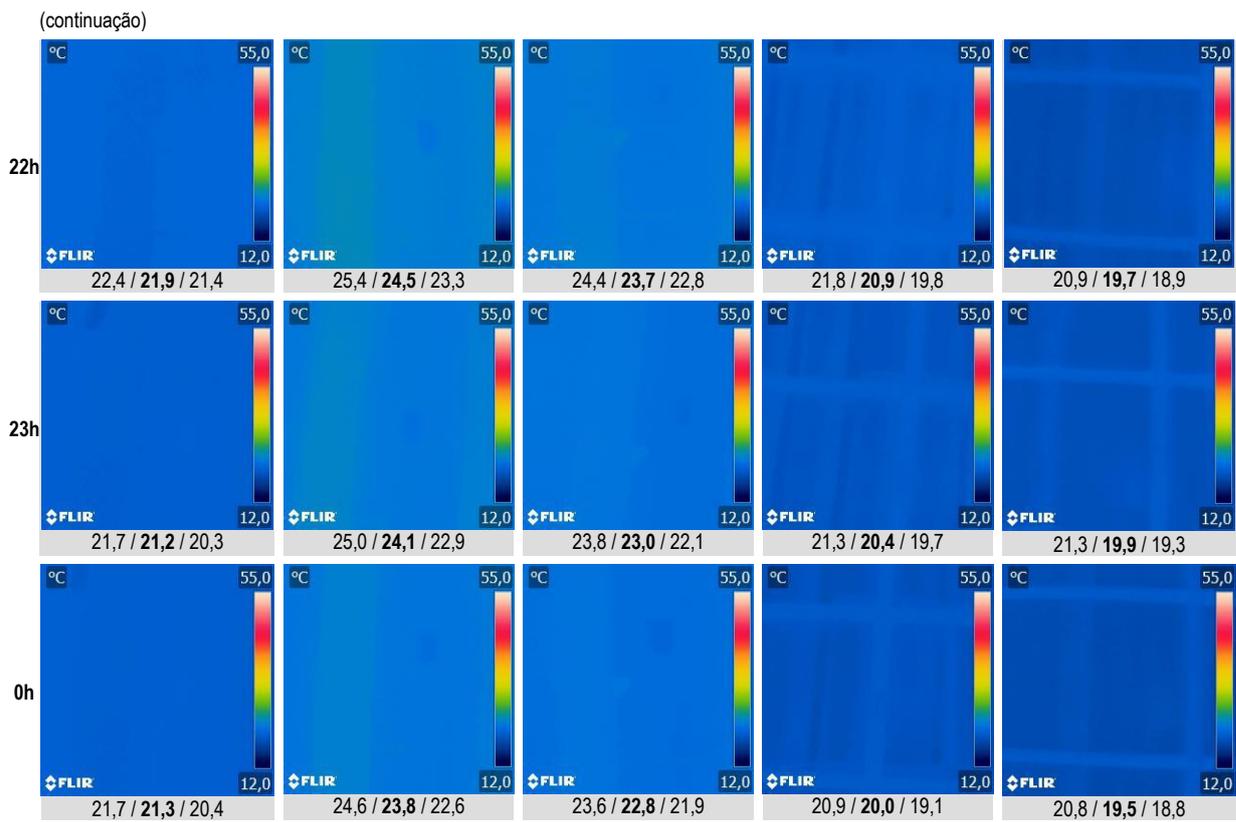


(continua)

(continuação)



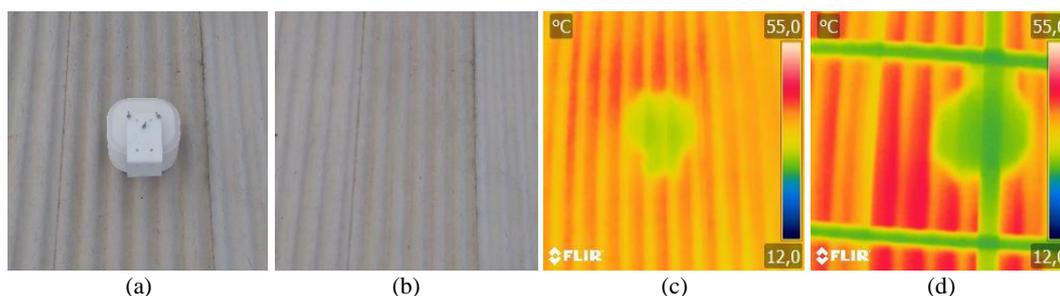
(continua)



Fonte: Elaborado pelo autor

Em algumas das imagens termográficas apresentadas nos Quadros 33 e 34, há uma área de formato aproximadamente circular com temperaturas superficiais diferentes do restante da imagem. Essa “mancha” é oriunda do posicionamento do *data logger* Hobo®, modelo U23-003003, na face externa da cobertura (Figura 117). Este equipamento foi utilizado a fim de monitorar temperatura do ar e umidade relativa do ar próximo à superfície externa da cobertura, porém, a porção sob a proteção de radiação solar direta e precipitação do *data logger* apresentou diferentes valores de temperatura que o restante da cobertura. Essa influência do equipamento atingiu a face interna das coberturas com menor espessura (telha cerâmica e telha de fibrocimento). Em virtude disso, os dados coletados por esse equipamento foram descartados por não serem representativos da cobertura em sua totalidade, apenas da porção sob o *data logger*.

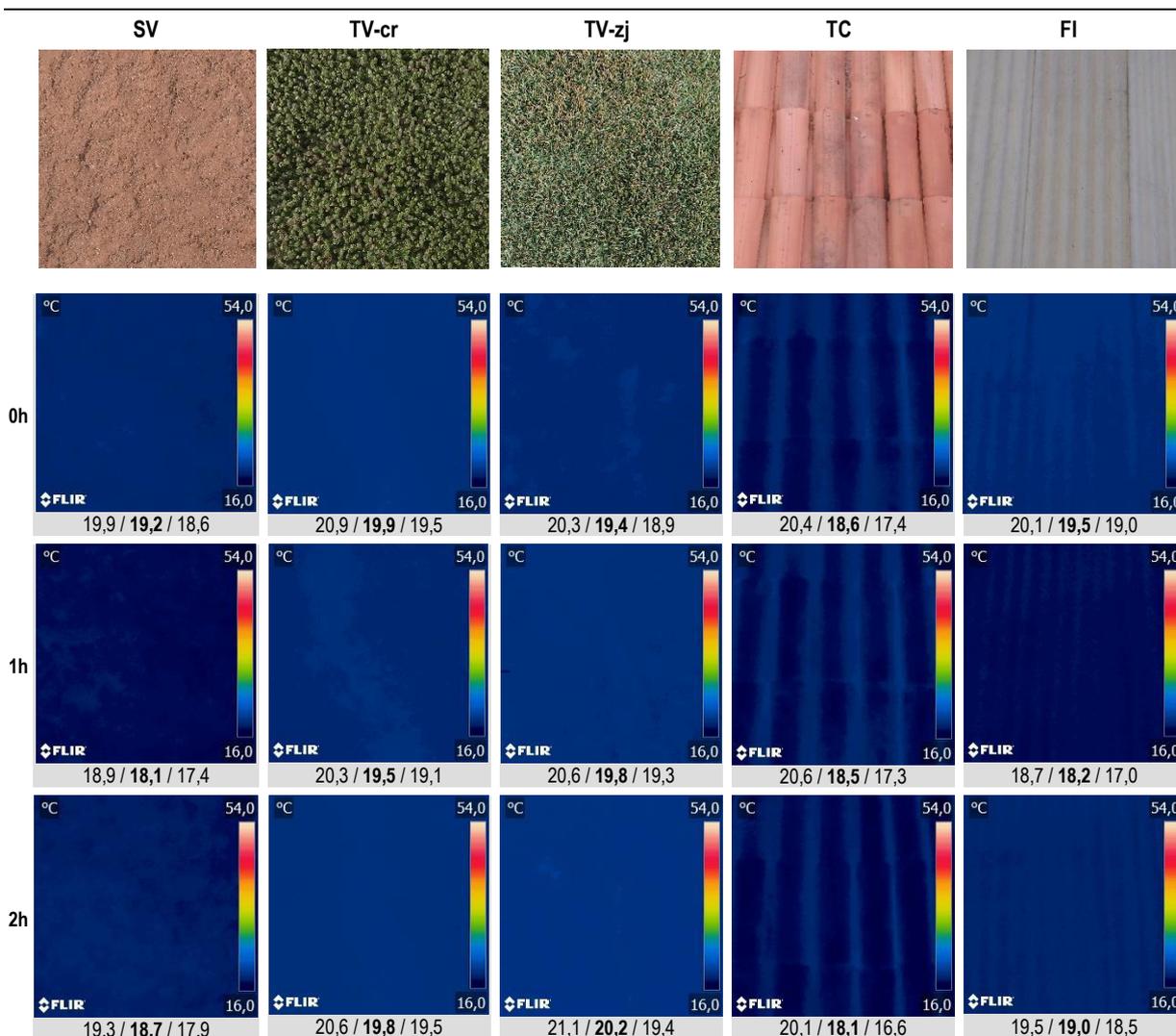
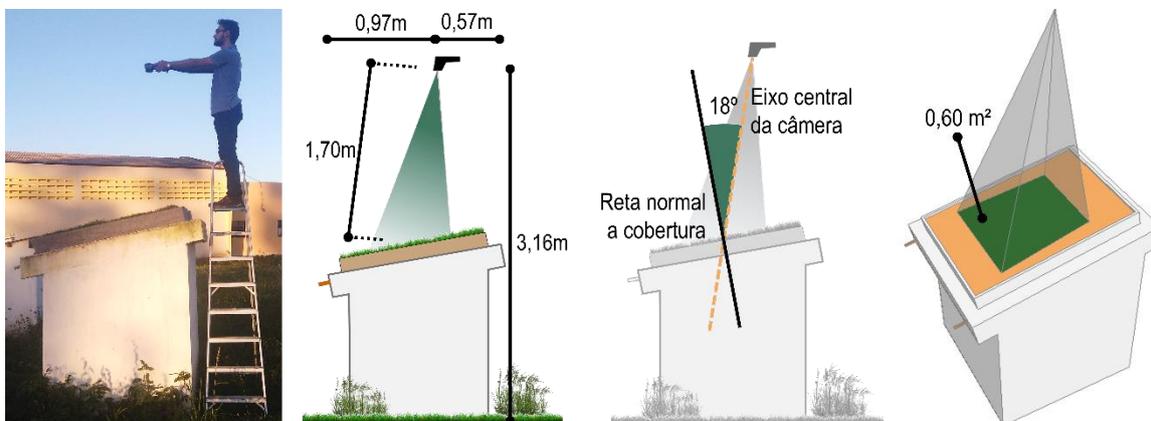
Figura 117 - (a) *Datalogger* Hobo® U23-003003 posicionado na cobertura com telha de fibrocimento; (b) Equipamento retirado para os registros termográficos; (c) e (d) Imagens termográficas externa e interna da cobertura com telha de fibrocimento às 12h.



Fonte: Elaborado pelo autor

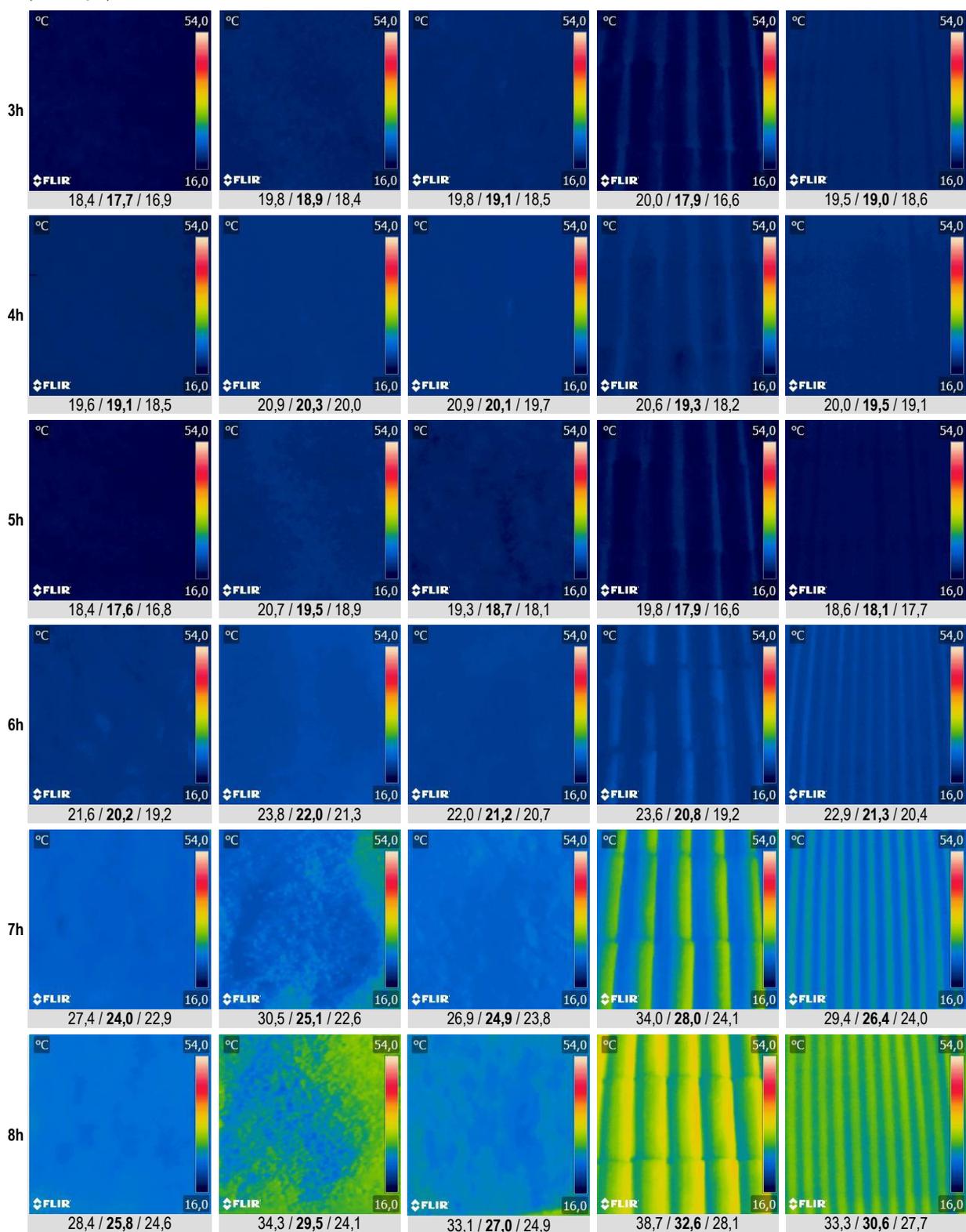
APÊNDICE F – Imagens termográficas - 14/11/2019

Quadro 35 - Imagens termográficas da face externa das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.ex (°C)



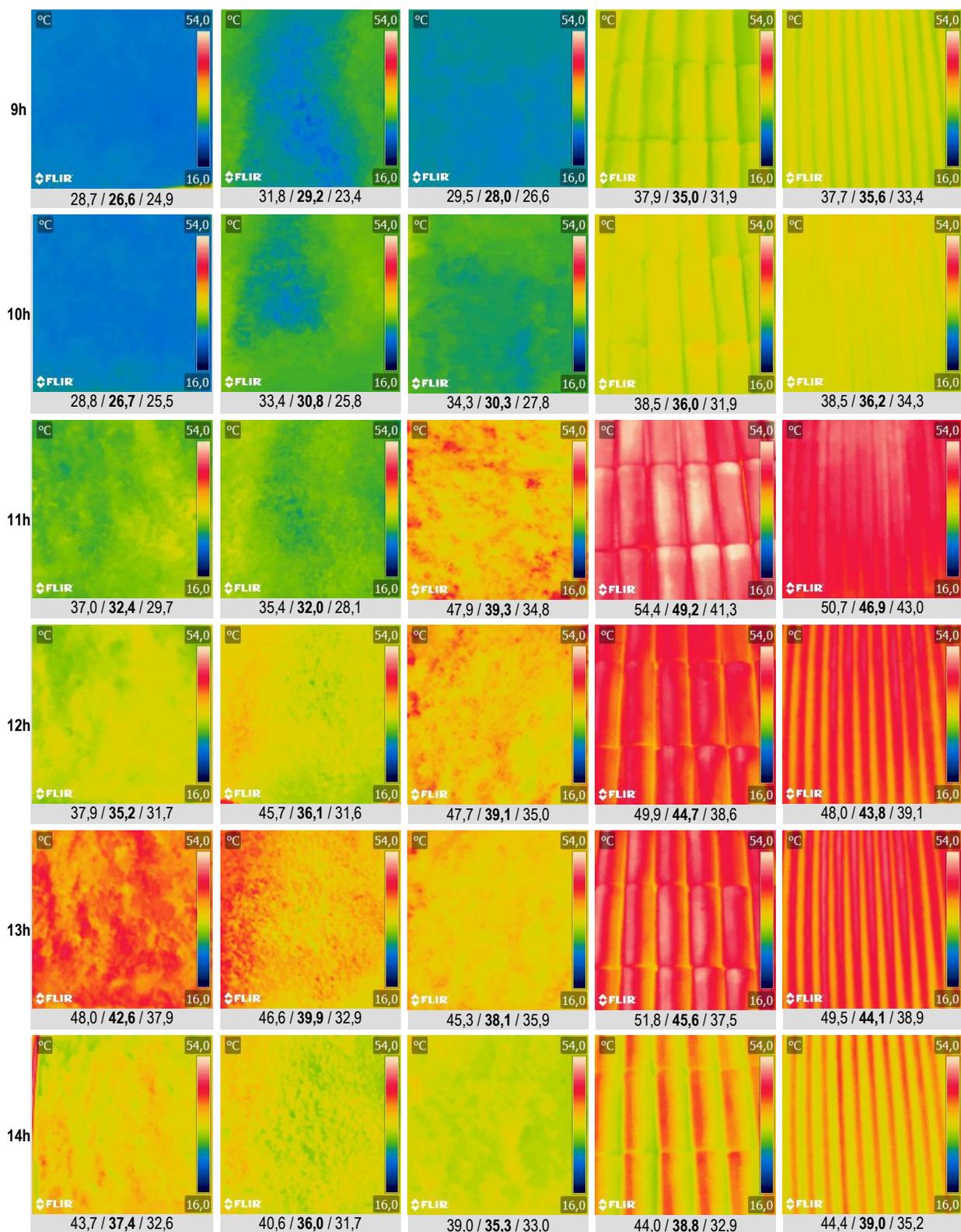
(continua)

(continuação)



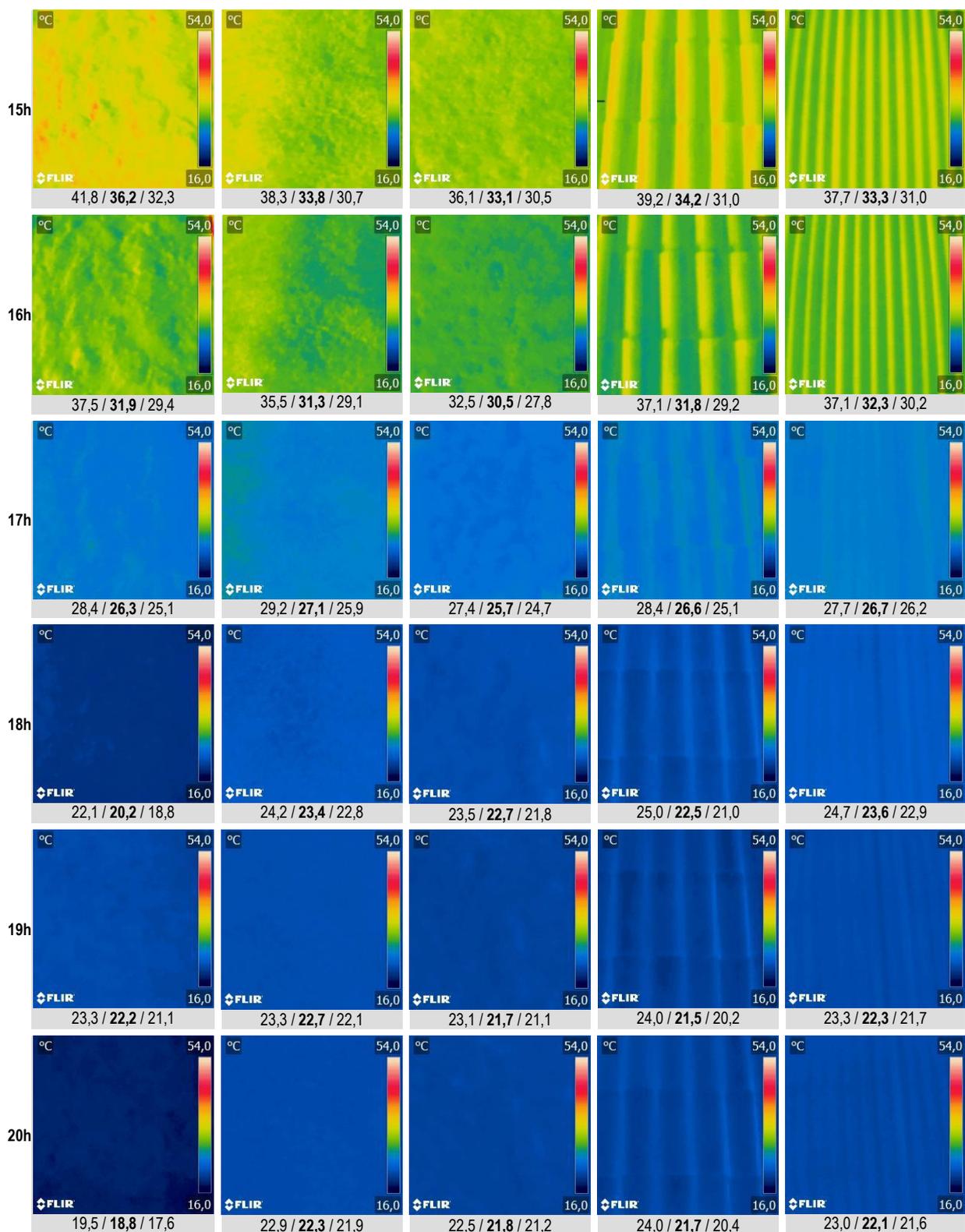
(continua)

(continuação)



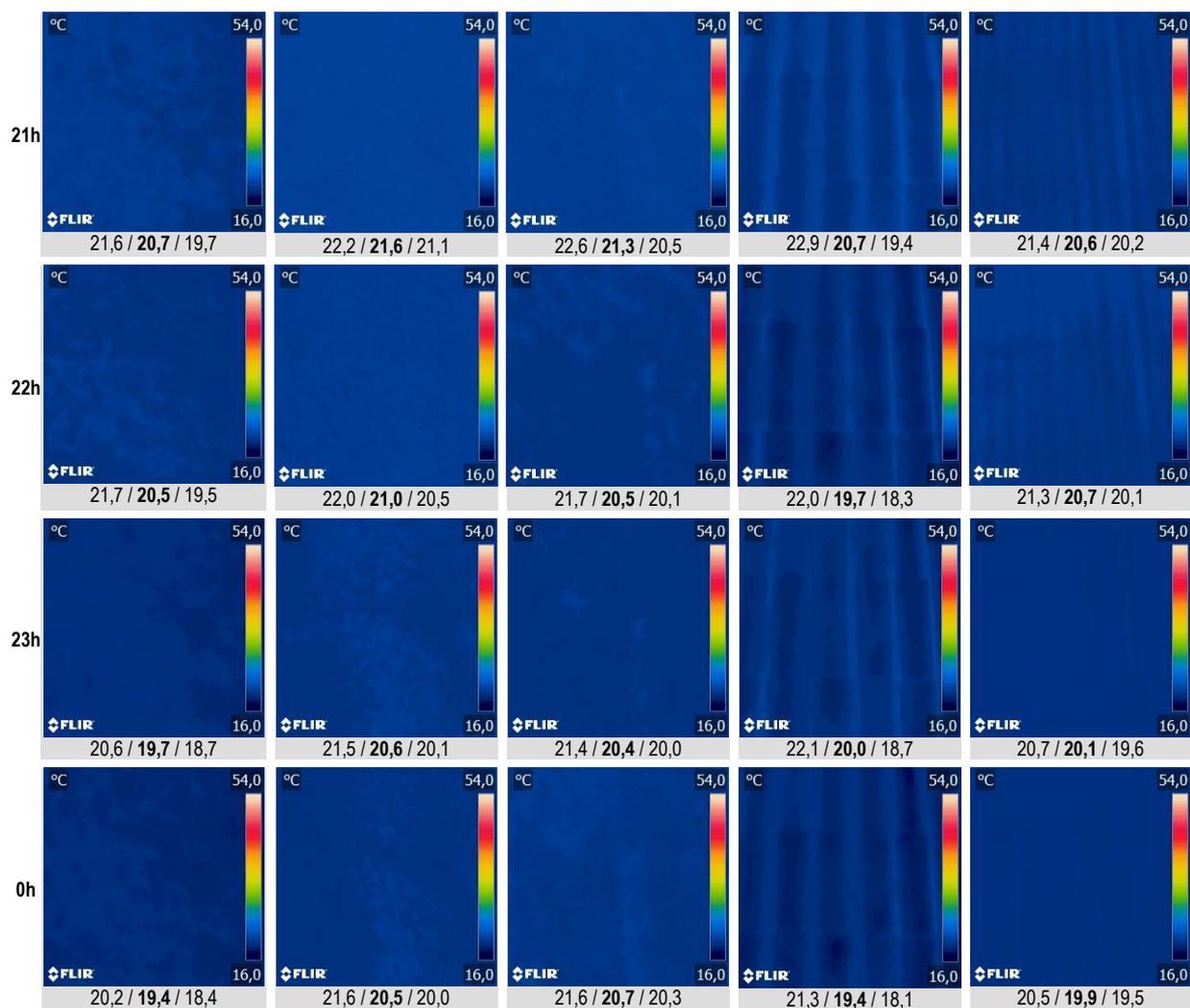
(continua)

(continuação)



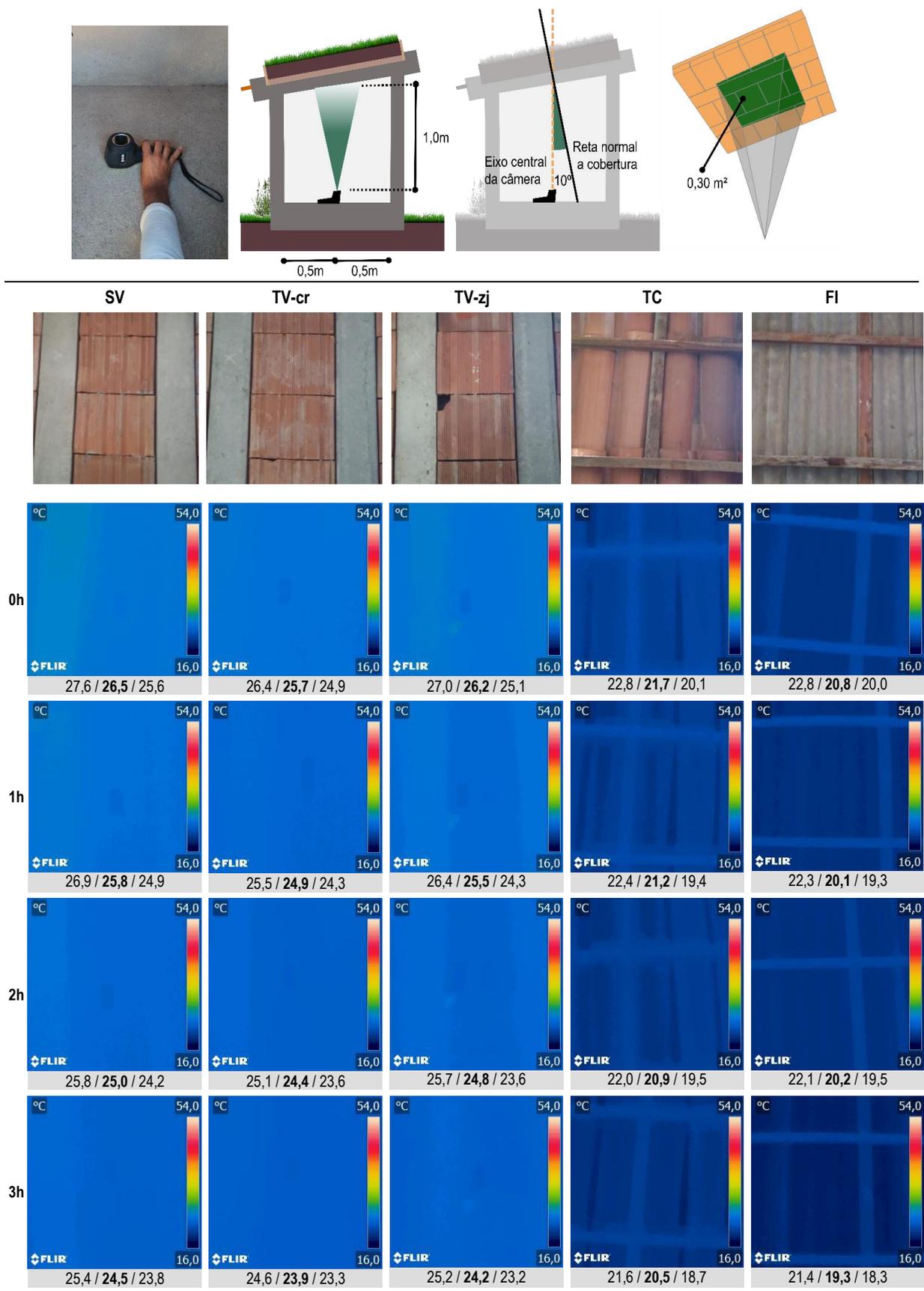
(continua)

(continuação)



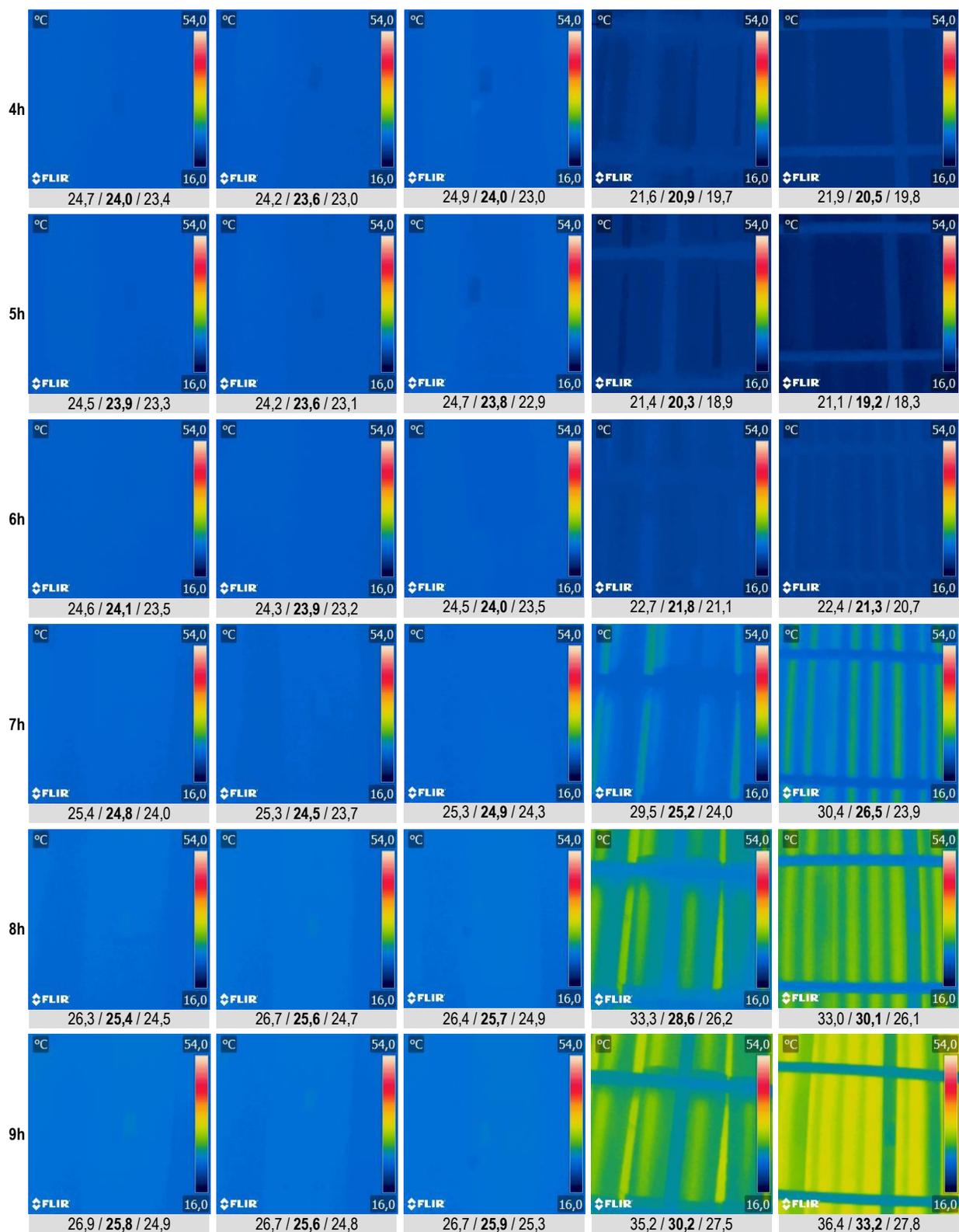
Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 36 - Imagens termográficas da face interna das coberturas. Valor máximo / médio / mínimo da Ts.in (°C)



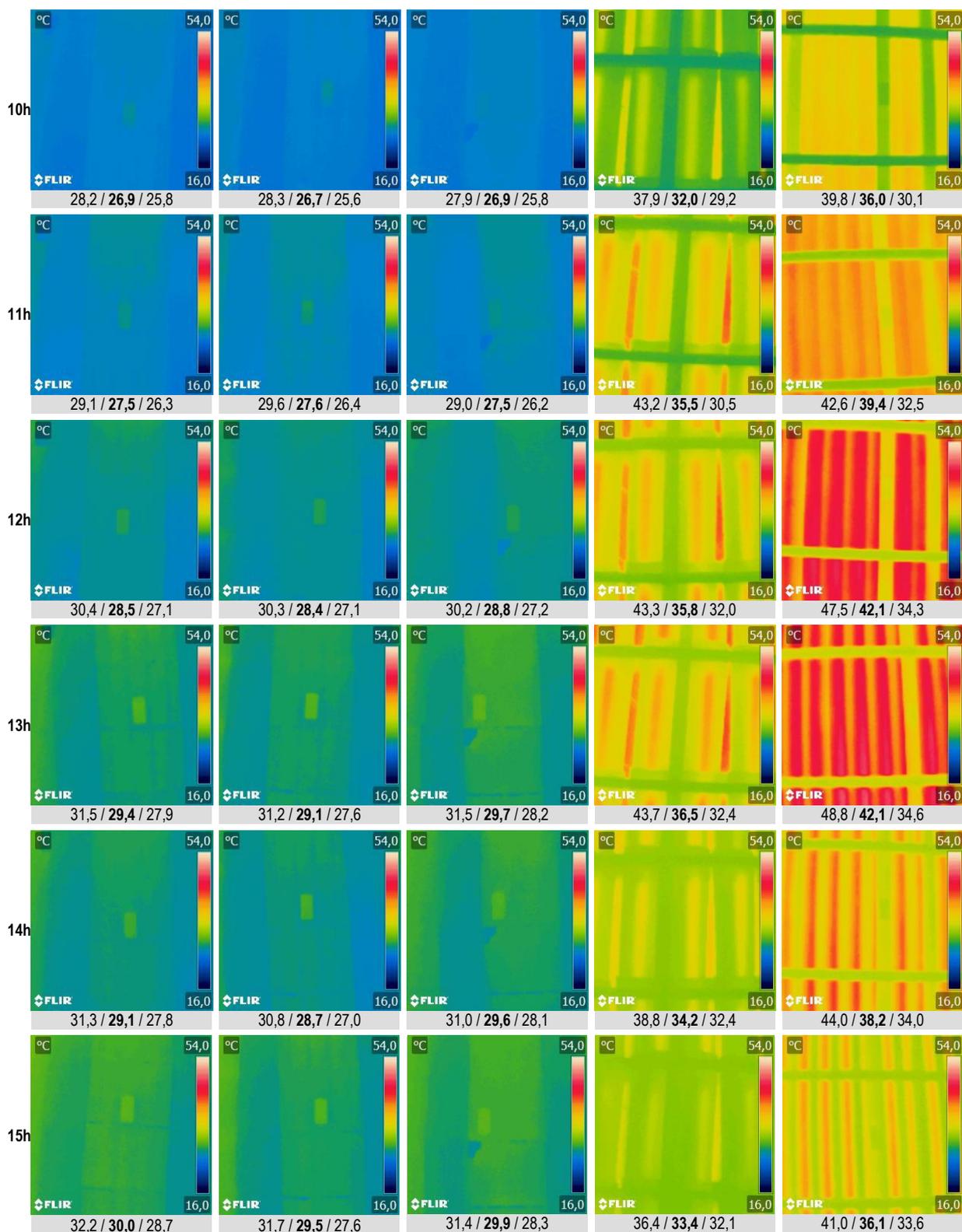
(continua)

(continuação)



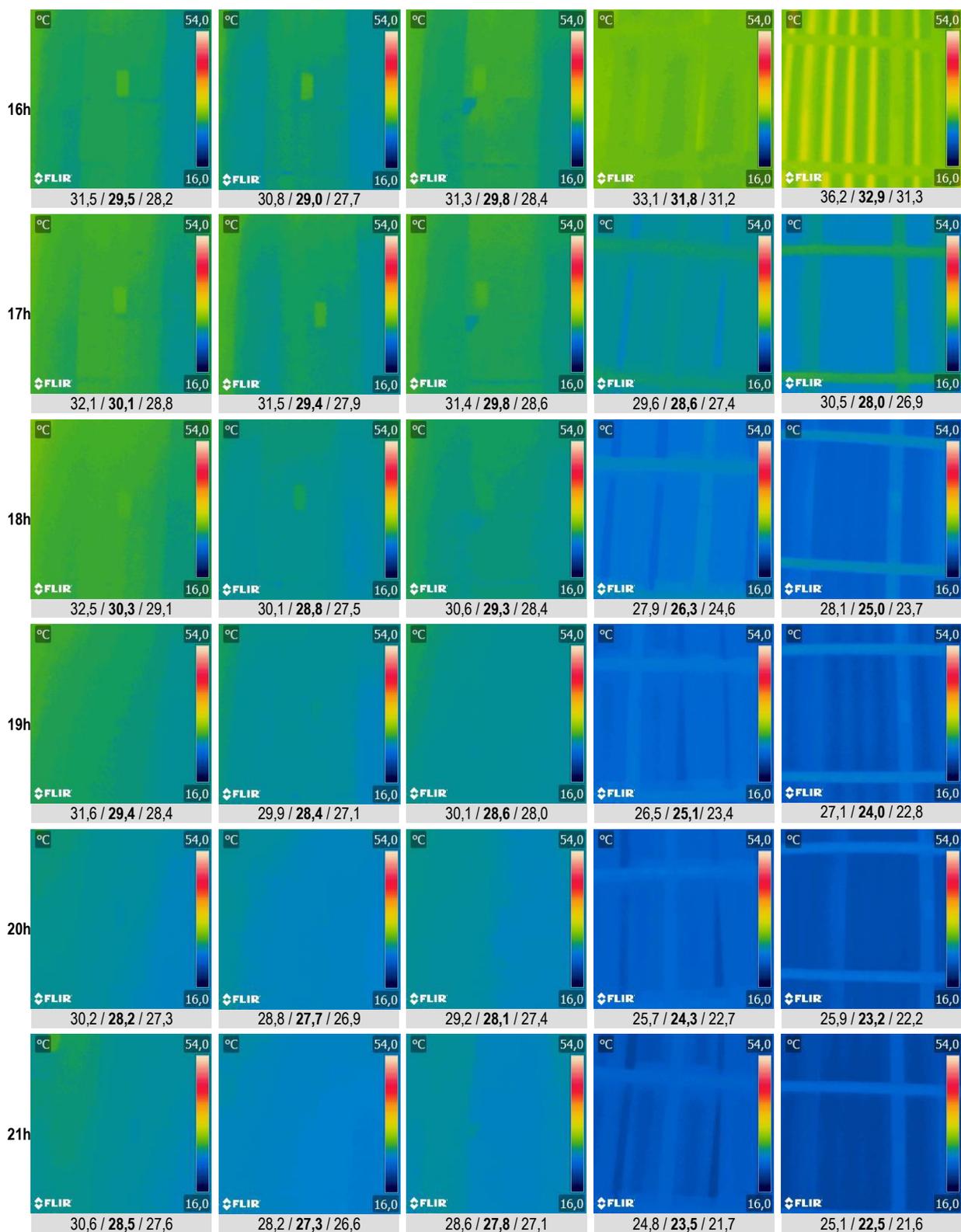
(continua)

(continuação)



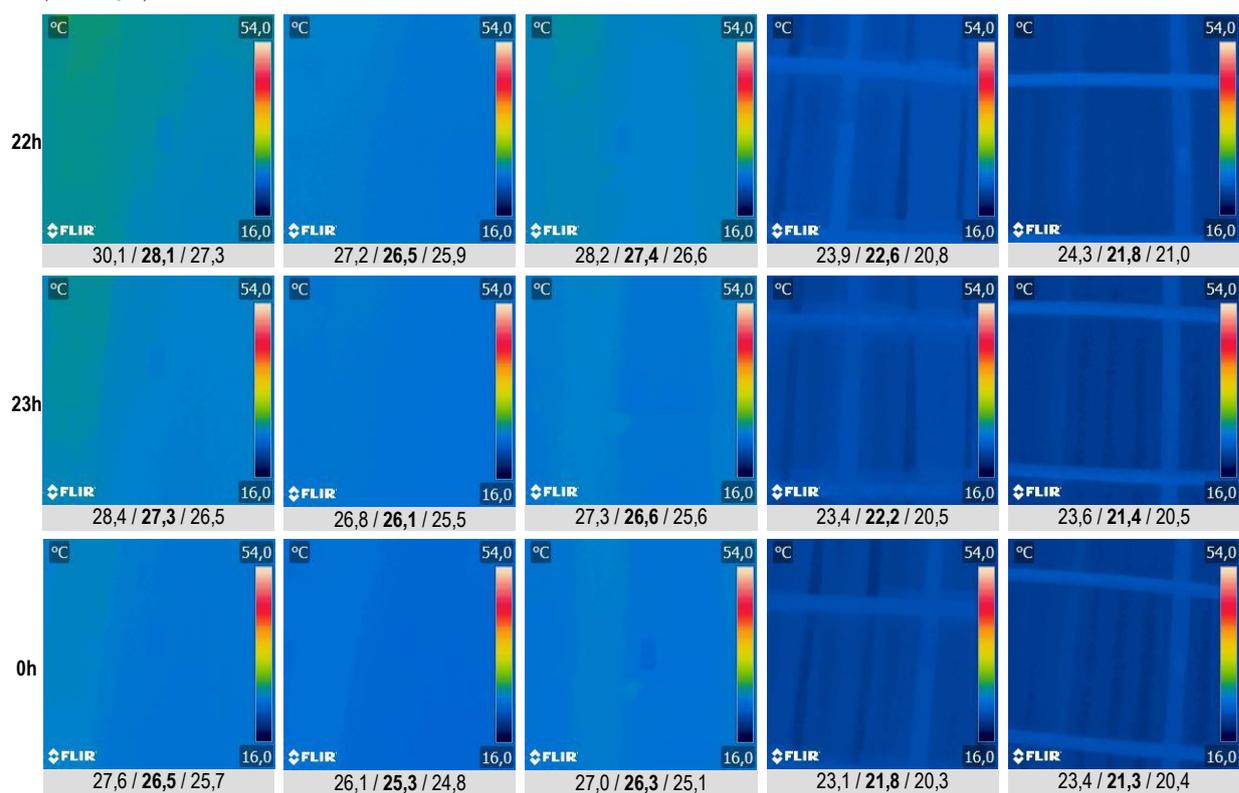
(continua)

(continuação)



(continua)

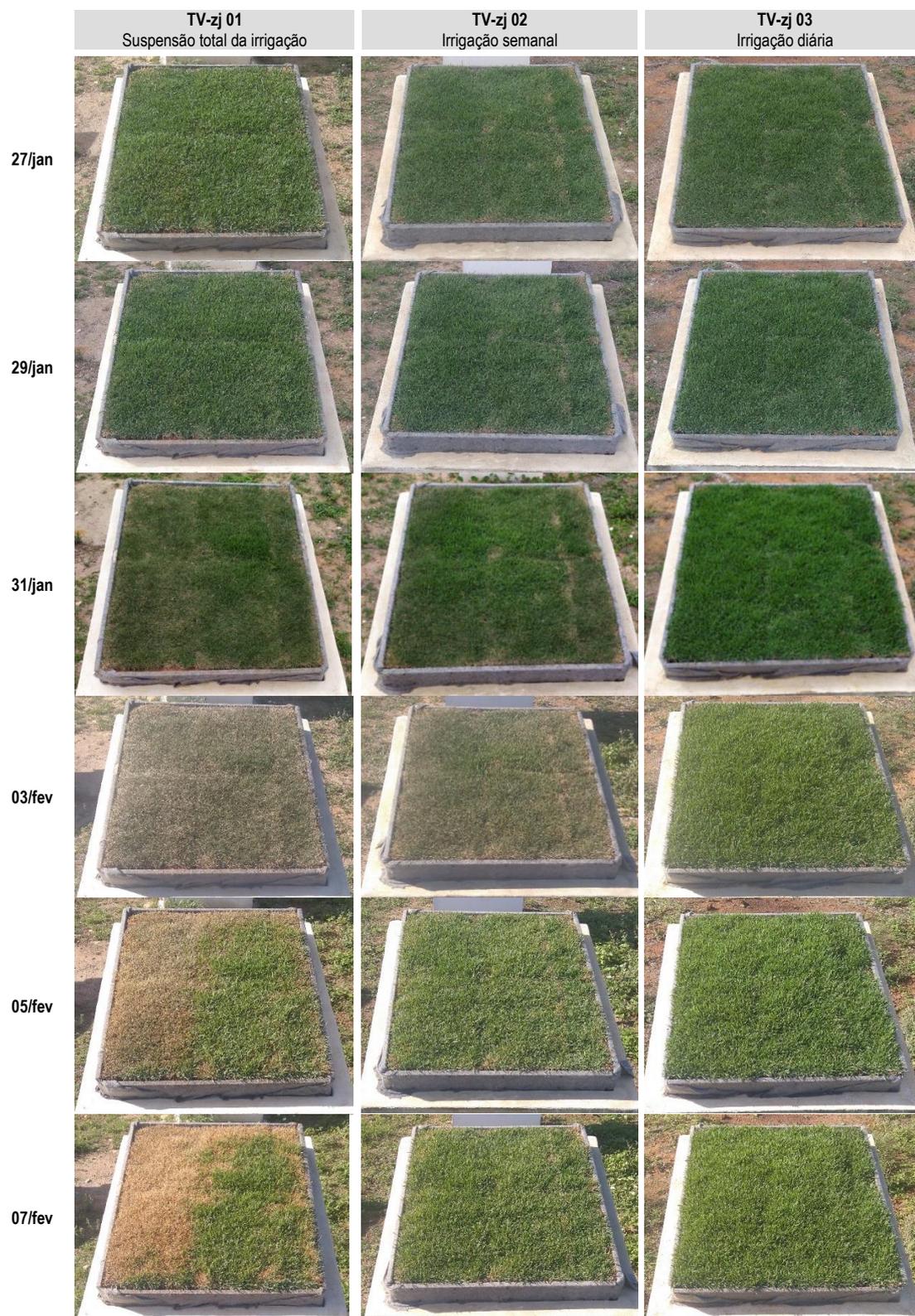
(continuação)



Fonte: Elaborado pelo autor

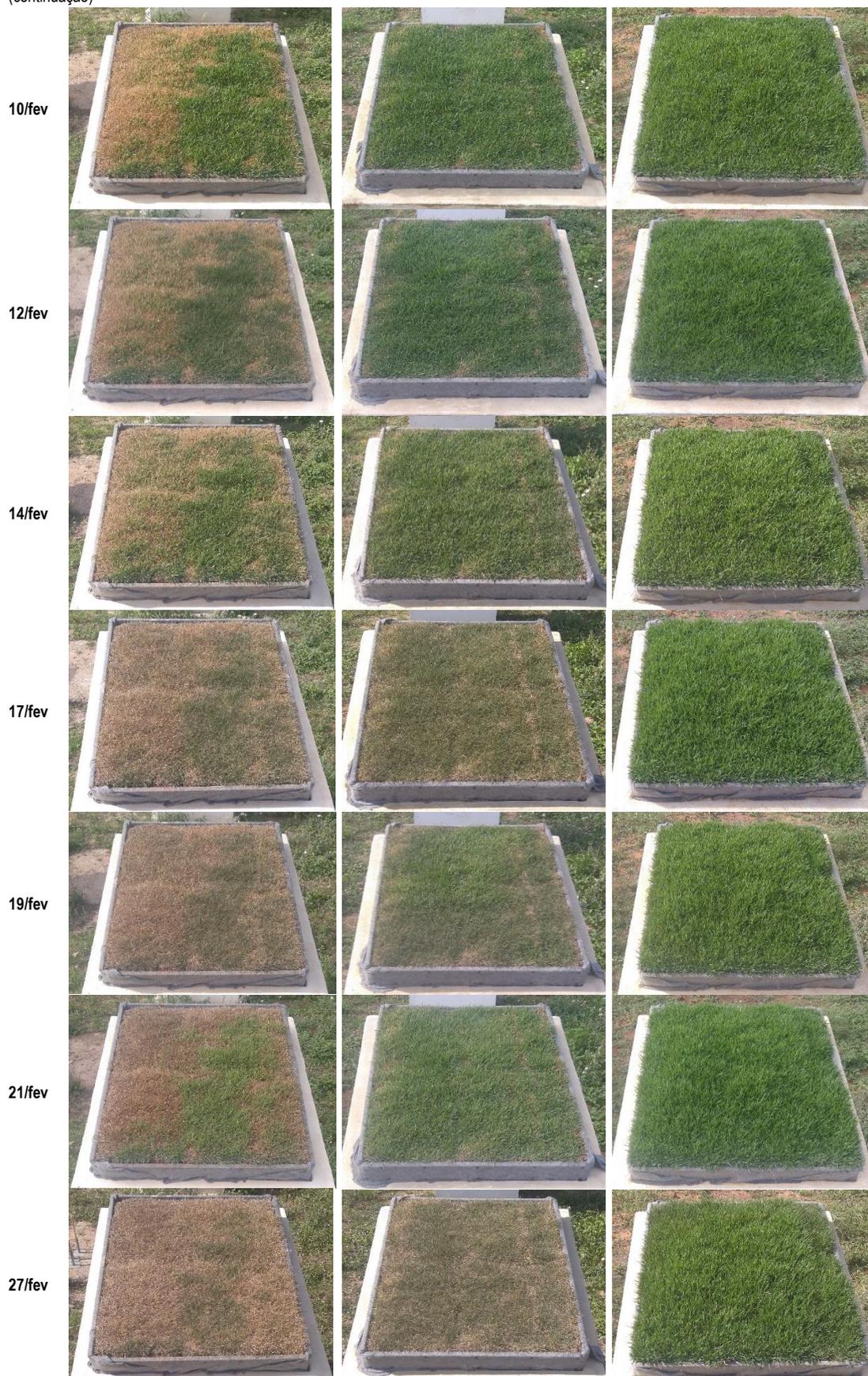
APÊNDICE G — Evolução da cobertura vegetal na Etapa 04

Quadro 37 – Evolução da cobertura vegetal nas células teste durante o período de monitoramento da Etapa 04 (irrigação)



(continua)

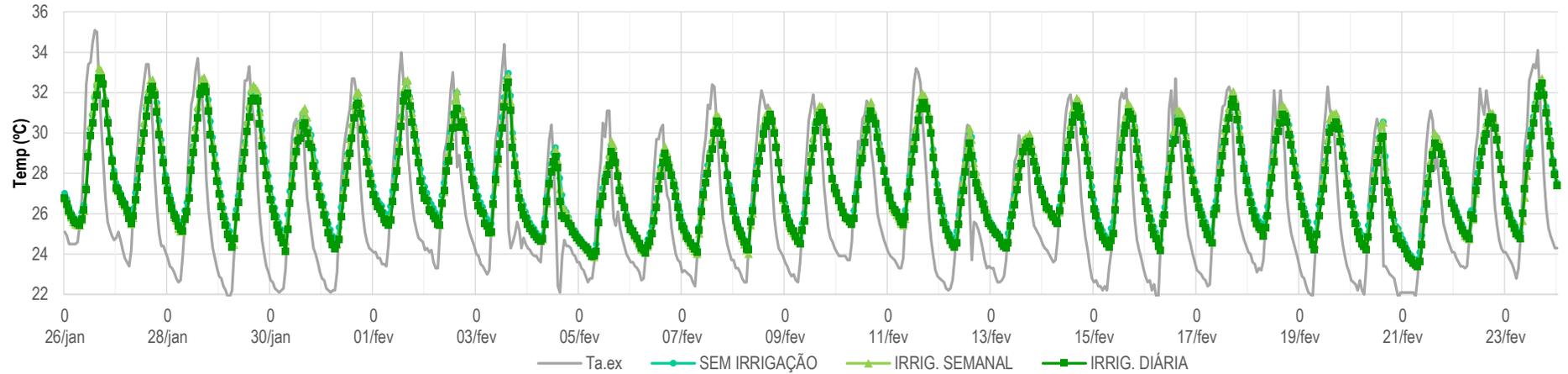
(continuação)



Fonte: Elaborado pelo autor

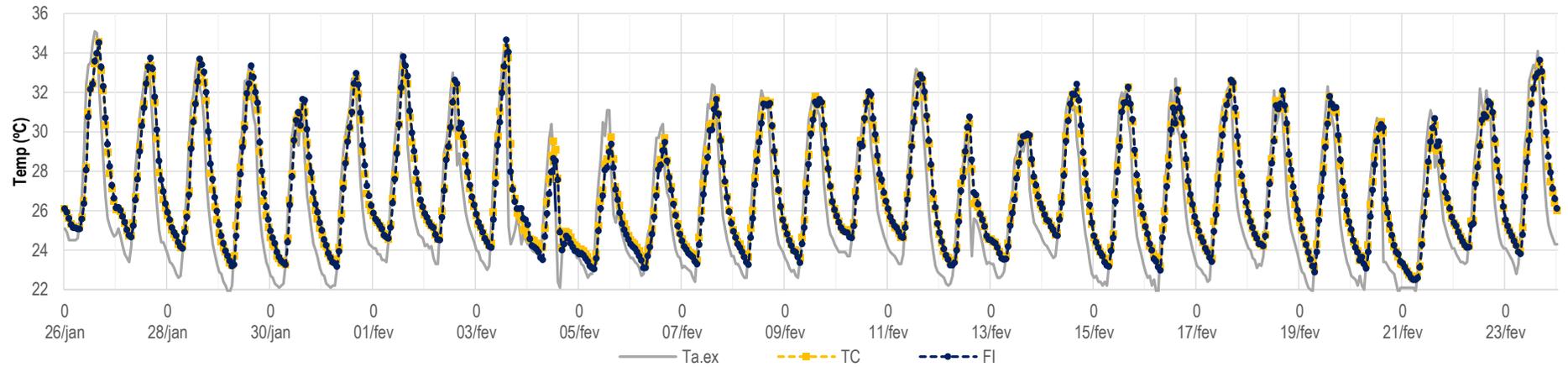
APÊNDICE H — Ta.in e Ua.in das células teste na Etapa 04

Figura 118 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas coberturas com telhado verde no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



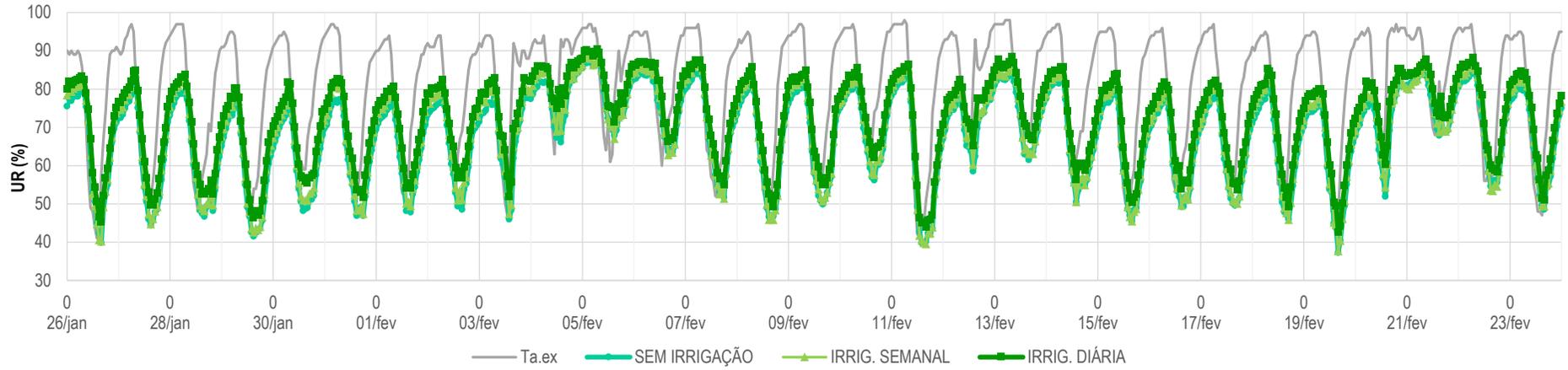
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 119 - Gráfico do comportamento da Ta.in nas coberturas com telha no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



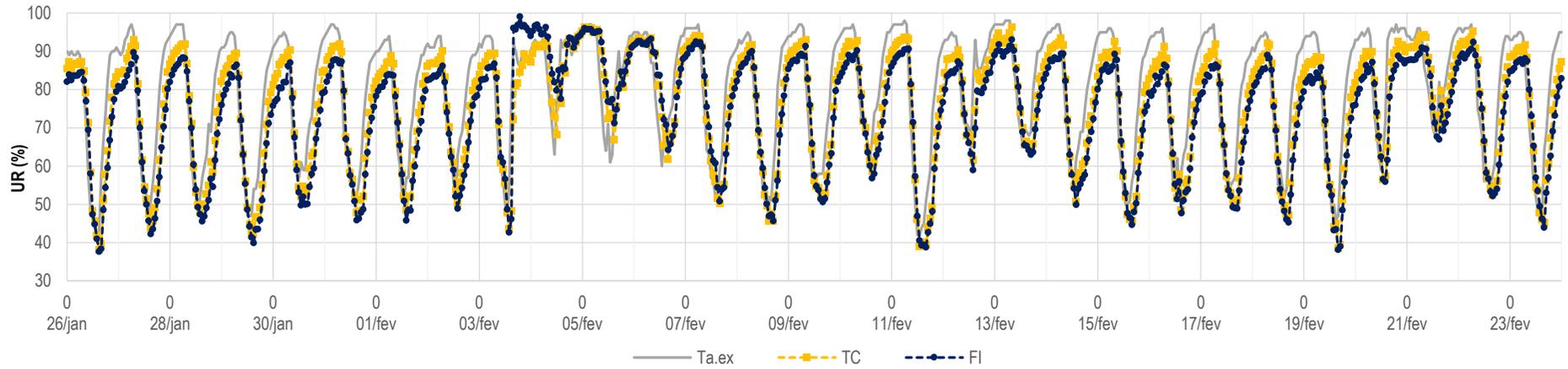
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 120 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas com telhado verde no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 121 - Gráfico do comportamento da Ua.in nas coberturas com telha no período de 26/01/2020 a 23/02/2020



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 38 - Ta.in máxima, Ta.in mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020 (todas as coberturas)

	Ta.in	Ta.in		ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
		Máxima (°C)	Mínima (°C)		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
26 / JAN	Sem irrig.	32,8	25,6	7,2	-2,3	1,1	2	4
	Irrig. seman.	33,2	25,4	7,8	-1,9	0,9	2	5
	Irrig. diária	32,7	25,4	7,3	-2,4	0,9	2	5
	TC	34,5	25,1	9,4	-0,6	0,6	2	4
	FI	34,5	25,0	9,5	-0,6	0,5	2	4
	Ta.ex	35,1	24,5	10,6	-	-	-	-
11 / FEV	Sem irrig.	31,5	25,6	5,9	-1,7	2,8	3	2
	Irrig. seman.	31,9	25,4	6,5	-1,3	2,6	3	2
	Irrig. diária	31,5	25,4	6,1	-1,7	2,6	3	2
	TC	32,8	24,6	8,2	-0,4	1,8	2	2
	FI	32,8	24,6	8,2	-0,4	1,8	2	2
	Ta.ex	33,2	23,3	9,9	-	-	-	-
23 / FEV	Sem irrig.	32,5	25,0	7,5	-1,6	2,2	2	2
	Irrig. seman.	32,7	24,8	7,9	-1,4	2,0	2	2
	Irrig. diária	32,4	24,7	7,7	-1,7	1,9	2	2
	TC	33,4	23,9	9,5	-0,7	1,1	1	2
	FI	33,6	23,8	9,8	-0,1	1,0	1	2
	Ta.ex	34,1	22,8	11,3	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

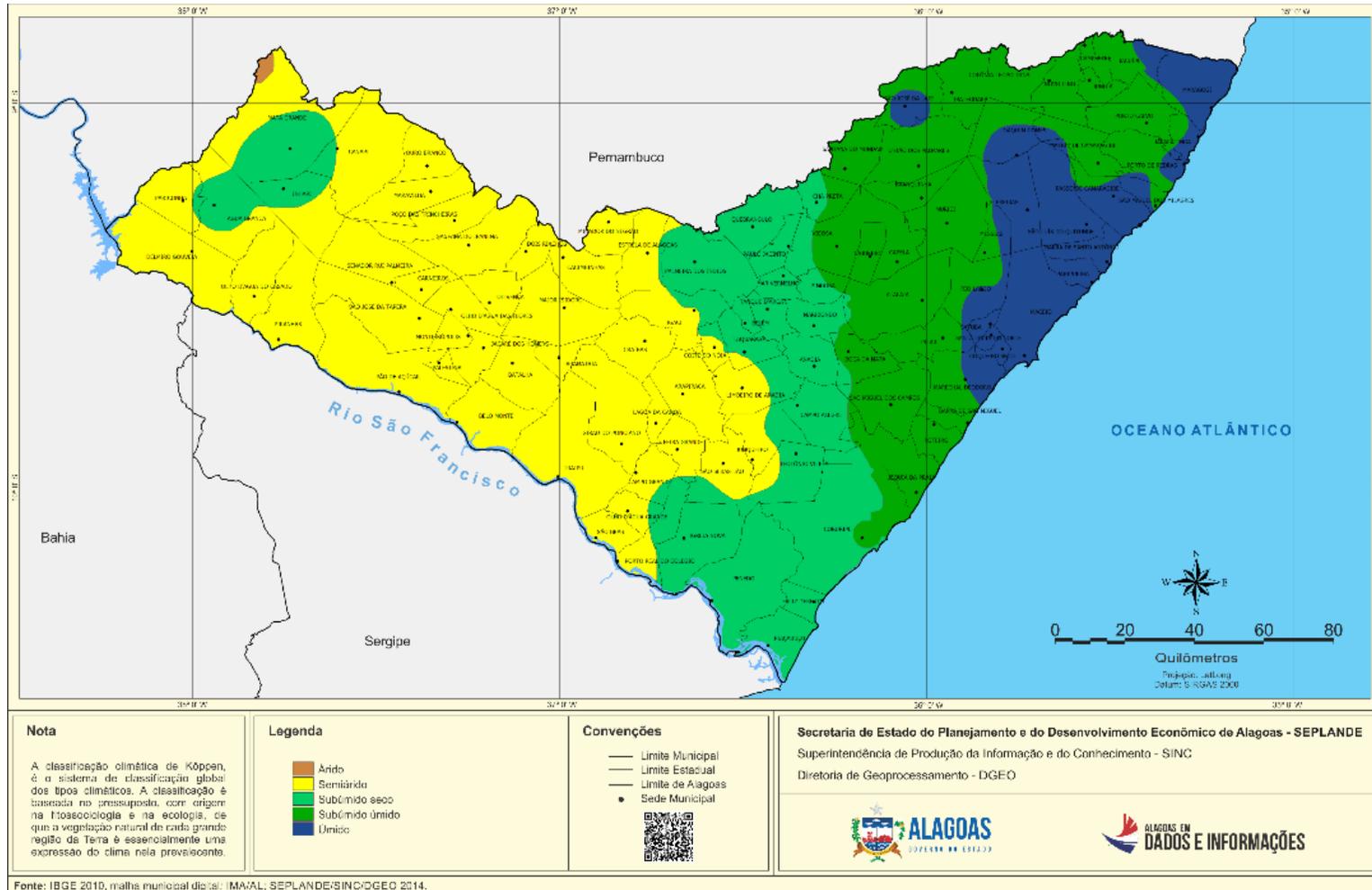
Tabela 39 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020 (todas as coberturas)

	Ua.in	Ua.in		ΔU Variação de Umidade (%)
		Máxima (%)	Mínima (%)	
26 / JAN	Sem irrig.	79,9	39,9	40,0
	Irrig. seman.	82,0	40,2	41,8
	Irrig. diária	83,4	45,4	38,0
	TC	87,3	38,1	49,2
	FI	84,5	37,6	46,9
	Ua.ex	91,0	41,0	50,0
11 / FEV	Sem irrig.	83,4	39,5	43,9
	Irrig. seman.	85,2	39,6	45,6
	Irrig. diária	86,4	43,9	42,5
	TC	93,7	38,9	54,8
	FI	90,6	38,8	51,8
	Ua.ex	98,0	42,0	56,0
23 / FEV	Sem irrig.	80,4	48,6	31,8
	Irrig. seman.	82,4	49,4	33,0
	Irrig. diária	84,7	51,1	33,6
	TC	91,5	45,0	46,5
	FI	88,2	43,9	44,3
	Ua.ex	95,0	47,0	48,0

Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO A — Mapas de Alagoas

Figura 122 - Mapa de climas do estado de Alagoas



Fonte: SEPLANE, 2014a

Figura 123 - Mapa de relevo do estado de Alagoas

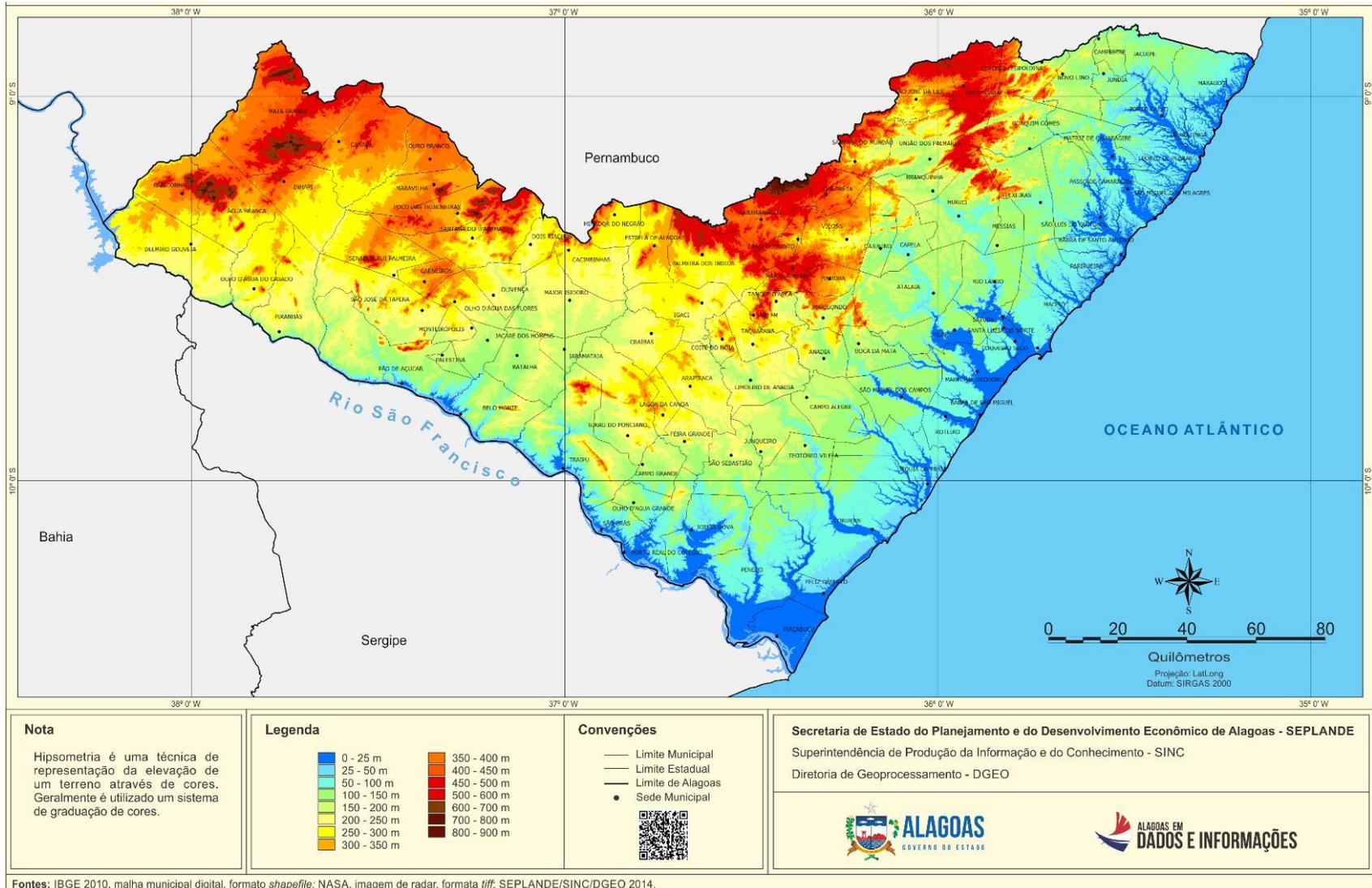


Figura 124 - Mapa de solos do estado de Alagoas

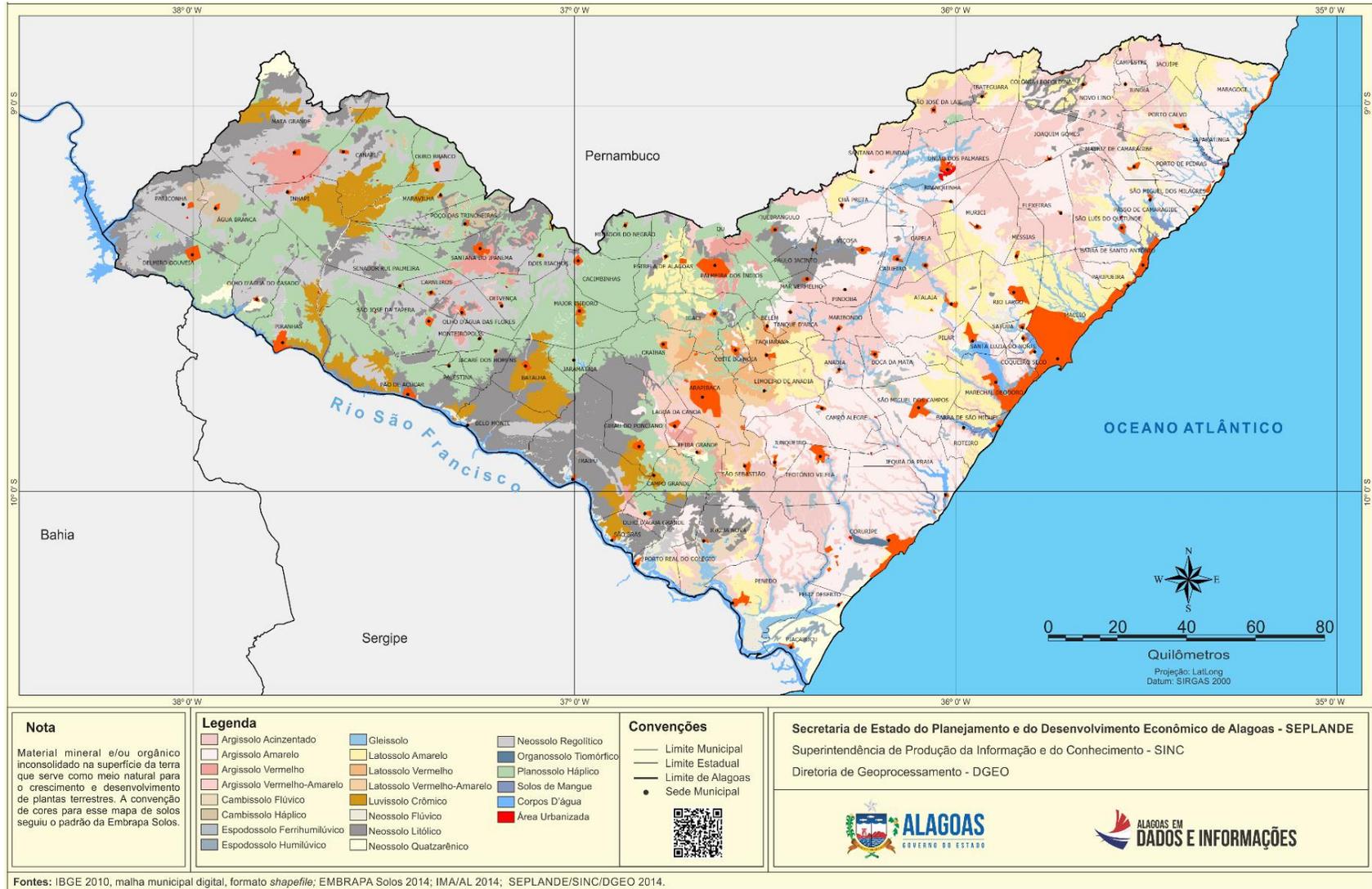
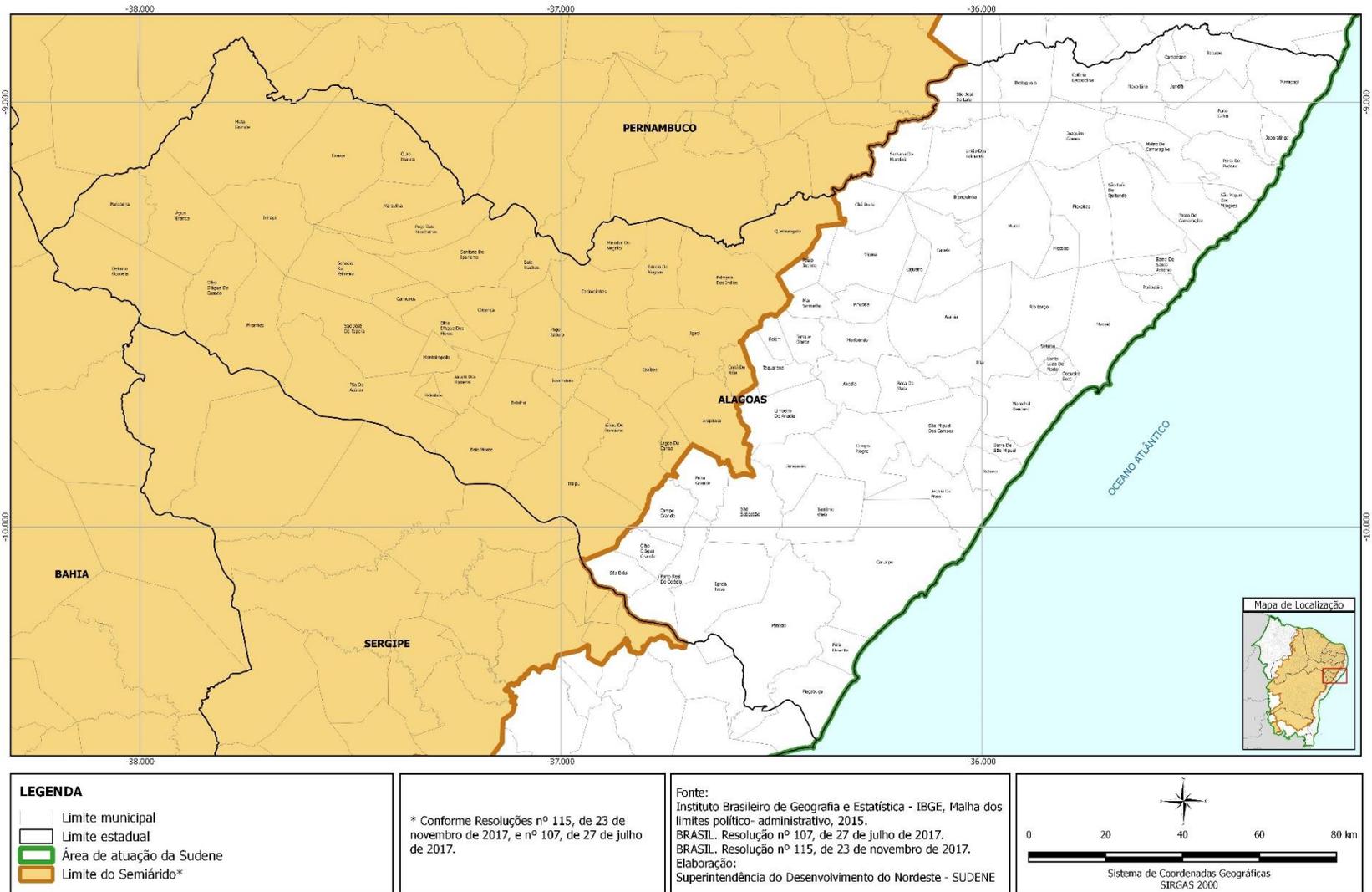


Figura 125 - Mapa de delimitação do Semiárido brasileiro no estado de Alagoas



Fonte: SUDENE, 2017

ANEXO B — Espécies vegetais para telhados verdes no Brasil

Quadro 38 - Espécies vegetais recomendadas para a utilização em telhados verdes no Brasil

ESPÉCIE	TIPO / USO	PORTE	CICLO DE VIDA	LUZ	OBSERVAÇÃO
 <p><i>Aptenia cordifolia</i> (Rosinha de sol)</p>	Forração densa alastraste - pendente nas bordas	20cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Irrigação: 1 x semana. Não necessita de poda
 <p><i>Arachis repens</i> (Grama-amendoim)</p>	Cultivada como forração	10-30cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Irrigação periódica. Dispensa podas periódicas. Não resiste ao pisoteio. Tolera secas, mas não geadas.
 <p><i>Asparagus densiflorus sprengeri</i> (Aspargo)</p>	Utilizada principalmente como planta pendente e em bordaduras	40-60cm	Perene	Meia sombra	Regas frequentes sem encharcamento
 <p><i>Axonopus compressus</i> (Grama São Carlos)</p>	Utilizada para formação de gramados	15-20cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Regas frequentes – não tolera secas
 <p><i>Bulbine frutescens</i> (Bulbine amarela)</p>	Suculenta utilizada como bor- dadura	30-60cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Regas frequentes sem encharcamento
 <p><i>Callisia repens</i> (Dinheiro em penca)</p>	Forração densa - invasora	5-25cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Irrigação: 1 x semana sem encharcamento Não necessita de poda

(continua)

(continuação)

	Forração utilizada em bordaduras	15-20cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Regas frequentes sem encharcamento
<i>Chlorophytum comosum</i> (Clorofito)					
	Cultivada como forração	10-30cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Não resiste a pisoteio
<i>Dichondra repens</i> (Dicondra)					
	Herbácea rasteira utilizada como forração e planta pende- nente	5-10cm	Perene	Perene	Resistente a solos secos
<i>Evolvulus pusillus</i> (Gota-de-orvalho)					
	Forma touceiras adequadas para bordaduras e como for- ração	15-20cm	Perene	Pleno sol	Não tolera pisoteio. Adapta bem ao frio
<i>Festuca glauca</i> (Grama azul)					
	Composição de maciços e bordaduras	30-50cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Rápido crescimento, prefere umidade e calor
<i>Impatiens walleriana</i> (Maria-sem-vergonha)					
	Suculenta utilizada como for- ração, planta pendente e em bordaduras	15-20cm	Perene	Pleno sol	Irrigação em intervalos longos
<i>Lampranthus productus</i> (Cacto-margarida)					
	Cultivada em maciços e bor- daduras	20-30cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Aprecia o frio
<i>Liriope spicata</i> (Liriope)					

(continua)

(continuação)

	Forração utilizada como bordadura em substituição a grama	20-30cm	Perene	Pleno sol / sombra	Não necessita de poda. Não suporta pisoteio
<i>Ophiopogon japonicus</i> (Grama preta)					
	Cultivada para formação de gramados	15-30cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Resistente ao pisoteio
<i>Paspalum notatum</i> (Grama batatais)					
	Cultivada em grupos formando conjuntos	20-30cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Rega frequente
<i>Pilea microphylla</i> (Brilhantina)					
	Suculenta cultivada como forração	10-20cm	Perene	Pleno sol	Resistente a solo de baixa fertilidade e arenoso
<i>Sedum multiceps</i> (Estrelinha-gorda)					
	Cultivada como forração	10-60cm	Perene	Pleno sol / meia sombra	Planta rústica, tolera secas e encharcamentos
<i>Sphagneticola trilobata</i> (Vedélia, malmequer)					
	Cultivada como forração	15-20cm	Perene	Pleno sol	Regas periódicas. Tolera terrenos de baixa drenagem. Não suporta pisoteio
<i>Spilanthes repens</i> (Margaridinha rasteira)					
	Cultivada como gramado	15-25cm	Perene	Pleno sol	Não resiste ao pisoteio
<i>Stenotaphrum secundatum</i> (Grama inglesa)					

(continua)

(continuação)



Thulbagia violácea
(Alho social)



Tradescantia pallida purpurea
(Trapoeraba-roxa)



Tradescantia zebrina purpusii
(Lambari)



Tropaeolum majus
(Capuchinha)



Verbena hybrida
(Verbena, camaradinha)



Zoysia japonica
(Grama Esmeralda)

Herbácea utilizada como forração	40-60cm	Perene	Pleno sol	Regas regulares – Sem encharcamento
Suculenta utilizada como forração	15-25cm	Perene	Pleno sol (aspecto roxo) / meia sombra (roxo-prateado)	Irrigação: 1 x semana. Não necessita de poda
Apropriada para forração	15-20cm	Perene	Sombra / meia sombra	Regas frequentes sem encharcamento. Não tolera pisoteio.
Cultivada como planta pendente e forração	10-40cm	Anual ou bianual	Pleno sol	Regas frequentes sem encharcamento
Cultivada em bordaduras e como forrações	10-30cm	Bianual	Pleno sol	Regas regulares sem encharcamento
Formação de gramados domésticos	10-15cm	Perene	Pleno sol	Pouca manutenção

Fonte: SILVA, 2018.