

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**MARIA ANGELA DE SOUZA**

**INFLUÊNCIA DO TELHADO VERDE NO CONFORTO TÉRMICO EM  
INSTALAÇÕES ZOOTÉCNICAS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**MARIA ANGELA DE SOUZA**

**INFLUÊNCIA DO TELHADO VERDE NO CONFORTO TÉRMICO EM  
INSTALAÇÕES ZOOTÉCNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Fernanda Campos de Sousa

Coorientadores: Fernando da Costa Baêta  
Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729i  
2022 Souza, Maria Angela de, 1995-  
Influência do telhado verde no conforto térmico em  
instalações zootécnicas / Maria Angela de Souza. – Viçosa, MG,  
2022.

1 dissertação eletrônica (73 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Fernanda Campos de Sousa.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.

Referências bibliográficas: f. 65-72.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.411>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Animais domésticos - Instalações - Aquecimento e  
ventilação. 2. Construções rurais - Aquecimento e ventilação -  
Índices. 3. Análise térmica. 4. Telhados - Análise. I. Sousa,  
Fernanda Campos de, 1985-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 636.0831

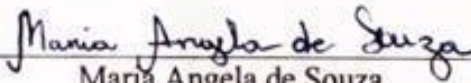
**MARIA ANGELA DE SOUZA**

**INFLUÊNCIA DO TELHADO VERDE NO CONFORTO TÉRMICO EM  
INSTALAÇÕES ZOOTÉCNICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de agosto de 2022.

Assentimento:



Maria Angela de Souza  
Autora



Fernanda Campos de Sousa  
Orientadora

*Aos meus pais, irmãos e sobrinhos.*

**DEDICO!**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus. Pela proteção, pela saúde, pela coragem, pela força e pela graça concedida de chegar aqui. Permitindo tornar-me mestre em Engenharia Agrícola na UFV, o qual tem sido um processo desafiador, prazeroso, cheio de descobertas, encontros, saudades e a certeza de estar percorrendo o caminho certo.

Aos meus pais, Maria Ivete e Evanildo Francisco, pelo amor, apoio e compreensão, que mesmo sem entender o que faço sempre estão presentes em todos os momentos. Não tenho palavras que possam descrever o quanto são fundamentais na minha vida, muito obrigada.

Aos meus irmãos Fabiana, Fabricio e Francisco, pelo amor, carinho e conselhos dados. Por sempre estarem presentes, me incentivando e oferecendo suporte, mesmo à distância, muito obrigada.

Aos meus amados sobrinhos Júnior, Isabely e José Miguel, minhas joias raras. Não consigo imaginar minha vida sem vocês, muito obrigada por existirem.

Ao Flávio, que está comigo desde início da pós-graduação, me apoiando incondicionalmente em todos os momentos. Sou grata pelo amor, dedicação, paciência, companheirismo e por cada momento feliz ao seu lado. Agradeço também a família Cazetta e Silva, pelo acolhimento e todos os momentos de confraternização.

Ao Chico (meu filho pet), obrigada por deixar meus dias mais alegres.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Fernanda Sousa, por todos os ensinamentos. Muito obrigada!

Aos meus Coorientadores, Prof. Fernando Baêta e a Prof.<sup>a</sup> Ilda Tinôco. Muito obrigada!

Aos Prof. Alex Lopes, muito obrigada por toda colaboração no desenvolvimento do meu trabalho.

Ao Charles Paranhos, Thauane Soares e a Rebeka Antoniane, por toda dedicação e ajuda durante a execução do experimento. O empenho de vocês foi essencial.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA-UFV) e todos os seus funcionários, em especial ao Geraldo Márcio, pelos conselhos, pelos cafezinhos, pela amizade e por toda ajuda no dia a dia. E aos colegas do AMBIAGRO: Leonardo, Erika, Harold, João, Carlos Eduardo, Fabiane, Victor, pelos momentos compartilhados. Muito obrigada!

Ao universo por ter me presenteado com pessoas incríveis, Hiago Zanetoni e Charles Paranhos. Muito obrigada pelo companheirismo, conselhos, risadas e os cafezinhos. Os trabalhos que desenvolvemos juntos foram extremamente gratificantes. Sem vocês, essa caminhada certamente teria sido mais desgastante e menos prazerosa nesses últimos meses.

Aos meus amigos de longa data Débora Ribeiro, Jéssica Santos, Marcela Souza, Damião Sales, Luana Rodrigues, Sabrina Martins, e Nágela Mascarenhas, que, apesar da distância, se fizeram presentes e me fortalecendo a partir dos seus gestos de carinho e afeto.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

SOUZA, Maria Angela, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2022. **Influência do telhado verde no conforto térmico em instalações zootécnicas**. Orientadora: Fernanda Campos de Sousa. Coorientadores: Fernando da Costa Baêta e Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

O sistema de produção animal ainda se depara com desafios relacionados ao manejo ambiental dada a dificuldade de adaptar as condições climáticas locais às necessidades térmicas dos animais. Assim, objetivou-se com essa dissertação investigar os efeitos do telhado verde em relação ao comportamento do ambiente térmico de protótipos de aviários com uso de diferentes tipos de telhas associadas ao uso do telhado verde. Desse modo, na primeira parte dessa dissertação, realizou-se uma revisão de literatura abordando questões relacionadas ao balanço de CO<sub>2</sub> nos ambientes de produção animal com telhado verde nas instalações que visaram melhoria nas condições ambientais para possibilitar conforto térmico, bem-estar animal e sustentabilidade ambiental da produção. E na segunda parte dessa dissertação, foram caracterizados o ambiente térmico e os índices de conforto térmico de protótipos de aviários, em escala reduzida, com uso de telhado verde. Os tratamentos consistiram em tipos de telhas (cerâmica, fibrocimento e metálica) associadas ou não a um telhado verde, constituído por grama esmeralda (*Zoysia japonica*). Foram avaliadas as variações da temperatura e umidade relativa do ar, da temperatura superficial interna do telhado, do índice de temperatura e umidade (ITU), do índice de temperatura de globo negro e umidade (ITGU), do índice conforto humano (ICH) e da carga térmica de radiação (CTR), todas as variáveis foram testadas em condição de instalação aberta e fechada. Os resultados apontaram que o uso do telhado verde nos protótipos foi capaz de melhorar consideravelmente o seu ambiente térmico e reduzir significativamente todos os valores dos índices bioclimatológicos determinados independentemente do tipo de telha utilizada, nos momentos mais quentes do dia, em relação aos protótipos sem o telhado verde. Além disso, nos momentos mais frios, o telhado verde foi capaz de amortecer a condição térmica dos protótipos.

**Palavras-chave:** Ambiente Térmico. Bem-estar Animal. Construções Rurais. Estresse Térmico.

## ABSTRACT

SOUZA, Maria Angela, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2022. **Influence of the green roof on thermal comfort in animal facilities.** Advisor: Fernanda Campos de Sousa. Co-advisors: Fernando da Costa Baêta and Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

The animal production system still faces challenges related to environmental management due to the difficulty of adapting local climatic conditions to the thermal needs of animals. Thus, the objective of this dissertation was to investigate the effects of green roof in relation to the behavior of the thermal environment of aviary prototypes with use of different types of tiles associated with the use of green roof. Thus, in the first part of this dissertation, a literature review was carried out addressing issues related to the balance of CO<sub>2</sub> in animal production environments with a green roof on the premises, aiming at improving environmental conditions to enable thermal comfort, animal welfare and environmental sustainability of production. And in the second part of this dissertation were characterized the thermal environment and thermal comfort indexes of prototypes of aviaries on a reduced scale with the use of green roof. The treatments consisted of types of tiles (ceramic, fiber cement and metallic) and presence and absence of the green roof, consisting of emerald grass (*Zoysia japonica*). Variations in temperature and relative humidity, roof indoor surface temperature, Temperature and Humidity Index (THI) were evaluated, Black Globe Humidity Index (BGHI), of Human Comfort Index (HCI) and Thermal Radiation Load (TRL), all variables were tested in open and closed installation conditions. The results showed that the use of the green roof in the prototypes was able to considerably improve their thermal environment significantly reduce all values of bioclimatological indices determined regardless of type of used, in the hottest moments of the day, in relation to prototypes without the green roof. In addition, in the colder moments, the green roof was able to cushion the thermal condition of the prototypes.

**Keywords:** Thermal Environment. Animal Welfare. Rural Buildings. Thermal Stress.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Mudanças climáticas .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1 CO<sub>2</sub> na atmosfera .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Ambiente térmico e CO<sub>2</sub> na agroindústria de produção animal.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 Avicultura.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Suinocultura .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3 Bovinocultura.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 Sequestro de carbono .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5. Estimativa de balanço de CO<sub>2</sub> na produção animal.....</b>	<b>25</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Local do experimento .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Tipos de materiais de cobertura testados .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Manejo da irrigação da cobertura vegetal .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4 Caracterização do ambiente térmico dos protótipos.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5 Caracterização dos índices de conforto térmico .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6 Análises estatísticas.....</b>	<b>37</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção animal está em constante desenvolvimento, graças aos avanços tecnológicos em melhoramento genético, manejo nutricional, sanitário e ambiental, principalmente nos sistemas de confinamento nos quais os animais passam todo o ciclo produtivo em instalações (SCHMIDT; SILVA, 2018; TINÔCO, 2001). Apesar dos avanços na produção animal, os sistemas de criação ainda se deparam com desafios relacionados ao manejo ambiental, dada a dificuldade de adaptar as condições climáticas locais às necessidades térmicas dos animais. Quando essa condição térmica é manejada corretamente, é possível garantir bem-estar animal e máximo desempenho produtivo. Desse modo, falhas no ambiente térmico podem comprometer o conforto e o bem-estar animal e, conseqüentemente, os índices produtivos, causando perdas econômicas ao setor (CURTIS, 1983; VALADARES *et al.*, 2018).

Neste contexto, destacam-se as mudanças climáticas observadas ao longo das últimas décadas, com relatos de aumento da temperatura da superfície terrestre de 1,06 °C entre os anos de 2010 e 2019 (IPCC, 2021). A produção animal contribui com cerca de 18% das emissões globais de gases de efeito estufa, atuando significativamente no aquecimento global. Por outro lado, essa mesma produção animal está sujeita aos impactos diretos desta variação climática (ATTIA-ISMAIL, 2020), uma vez que o aumento da temperatura do ar causa estresse térmico nos animais e, conseqüentemente, afeta seu desempenho produtivo e reprodutivo. Portanto, para fornecer condições térmicas ideais para os animais alojados nas instalações de produção, é preciso monitorar e controlar as variáveis climáticas, dentre elas: a temperatura e a umidade relativa do ar, a radiação solar e o vento (CARNEIRO *et al.*, 2015). Essas variáveis são utilizadas para mensurar a condição térmica do ambiente e para determinar o ponto de equilíbrio entre as perdas e os ganhos de calor corporal animal e permitir que o índice de produtividade máximo possa ser alcançado (ANTUNES *et al.*, 2009; TINÔCO, 2001) Nesse contexto, a cobertura das instalações de produção animal se destaca entre os elementos estruturais por atuar no controle da radiação solar incidente e nos processos de transferência de calor entre os ambientes externo e interno (BAÊTA; SOUZA, 2010). Vale ressaltar a importância da associação de outras técnicas de construção como pintura reflexiva nas faces externas, escolha de material de telha com características térmicas adequadas, uso de forro e lanternim nos telhados, uso de cortinas nas faces abertas de instalações híbridas, aspectos que contribuem para amenizar os extremos de temperatura dentro da instalação de produção animal (ABREU, *et al.*, 2006).

Além disso, nas instalações de produção animal existem gases que podem comprometer o bem-estar dos animais e dos trabalhadores. Os principais gases presentes nos sistemas de produção animal são: amônia (NH<sub>3</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) dentre outros, os quais podem se tornar tóxicos, dependendo de sua concentração e do período de exposição (COSTANTINO *et al.*, 2020). Dentre eles, o CO<sub>2</sub> é considerado um importante gás de efeito estufa (CALVET *et al.*, 2011). Emissão de CO<sub>2</sub> na produção animal é resultado do processo fisiológico animal e dos processos de decomposição das excretas dos animais, que são depositadas no piso ou na cama da instalação (BAÊTA; SOUZA, 2010). O CO<sub>2</sub> pode causar diversos efeitos negativos aos animais como ofegação, anóxia, redução no crescimento e no consumo de alimento, quando eles são expostos a elevadas concentrações (acima de 3000 ppm) nas instalações (COSTANTINO *et al.*, 2020). Adicionalmente, existe uma via de emissão de CO<sub>2</sub> considerada secundária à produção animal, na produção de ração, no uso de fertilizantes, maquinários agrícolas, entre outros (GROSSI *et al.*, 2019).

Assim, o uso do telhado verde que é considerado uma técnica arquitetônica adaptativa para aumentar a resistência térmica das construções contra os impactos dos efeitos das mudanças climáticas, vem ganhando espaço no ramo construtivo e no meio científico pelos vários benefícios socioeconômicos e ambientais que pode proporcionar (ANDRIC; KAMAL; AL-GHAMDI, 2020; SHAFIQUE; KIM; RAFIQ, 2018). O telhado verde se destaca no meio construtivo pela forma sustentável de possibilitar resfriamento do ambiente interno das instalações, melhorar o escoamento de águas pluviais sobre a cobertura e contribuir para a redução da poluição do ar. A utilização do telhado verde possibilita a redução tanto do ganho de calor no verão quanto da perda de calor no inverno, agindo de forma natural como um bloqueador da radiação solar direta sobre a superfície da cobertura, o que melhora as características térmicas do telhado. A presença da vegetação auxilia na redução da quantidade de CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, uma vez que o processo de fotossíntese parte do CO<sub>2</sub> presente no ar. Assim, o uso do telhado verde em instalações de produção animal pode contribuir com o balanço do CO<sub>2</sub>, diminuir os impactos ambientais gerados, e auxiliar na economia de energia demandada pelos sistemas acondicionamento térmico das instalações.

Vale destacar a importância da escolha do tipo de vegetação mais adequada para ser utilizada como telhado verde e do estudo dos fatores ambientais do local de implantação do sistema para que se obtenha um desempenho satisfatório do material vegetal (FACHINELLO KREBS; JOHANSSON, 2021; SEYEDABADI; EICKER; KARIMI, 2021). Dessa forma, faz-se necessário avaliar a aplicação do telhado verde em construções rurais, principalmente em

condições de clima quente, que é a realidade do Brasil, na tentativa de mitigar tanto os efeitos nocivos das mudanças climáticas sobre o conforto térmico animal quanto os impactos ambientais da emissão de gases de efeito estufa na produção animal.

Com base no exposto, objetivou-se desenvolver um artigo de revisão a partir da literatura científica disponível sobre os benefícios do uso do telhado verde em instalações agroindustriais como forma de promover conforto térmico, bem-estar e sustentabilidade da produção animal, e um outro artigo científico para determinar os efeitos do uso do telhado verde sobre o ambiente térmico de protótipos de aviários em escala reduzida.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O mecanismo conhecido como efeito estufa é responsável por regular a temperatura do planeta. Na forma de radiação, parte da energia solar atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre, sendo absorvida e/ou refletida. Parte desta radiação que é refletida pela superfície terrestre não retorna ao espaço, pois, é novamente refletida e absorvida pela camada de gases de efeito estufa (GEE) presente na atmosfera, gerando assim o aquecimento da mesma (IPCC, 2013). No entanto, se ocorrer aumento da radiação solar que chega ao planeta ou da camada de GEE poderá haver um aquecimento adicional no planeta (RUGGIERI; CARDOSO, 2017). Dessa forma, a emissão de GEE pode estar acelerando os efeitos do aquecimento global e as mudanças do clima. Nesse cenário, a produção animal desempenha um papel significativo na emissão de gases poluentes, à medida que atende a demanda por alimentos da população pode aumentar proporcionalmente as emissões agrícolas, tendo estimativa de aumento as emissões cerca de 20% até 2030 (ROLPH; FOREST; RUARK, 2019).

Apesar dos desenvolvimentos tecnológicos dos sistemas intensivos de produção animal, manter o conforto térmico e a qualidade do ar durante todo o ciclo de produção animal é ainda desafiador (GONÇALVES *et al.*, 2022). Isso devido as adversidades climáticas que as instalações de criação animal estão expostas, de modo que o bem-estar e o desempenho produtivo dos animais podem ser comprometidos (MELO *et al.*, 2015). Além disso, a geração de poluentes aéreos pode comprometer a saúde e o desempenho dos animais e trabalhadores e influenciar as mudanças climáticas (ZHAO *et al.*, 2015). Dentre os gases poluentes, CO<sub>2</sub> é considerado o principal GEE, por estar presente no ar atmosférico, na água e no solo, além de ser gerado no processo de respiração dos animais (COSTANTINO *et al.*, 2020). A emissão de CO<sub>2</sub> na produção animal advém da fermentação entérica, da respiração e dos processos de decomposição das excretas dos animais.

Diante desta problemática o setor de produção animal está em constante adaptação para que possa promover o desenvolvimento sustentável, só assim é possível assegurar aos seres humanos uma alimentação com produtos de origem animal de qualidade e sem causar prejuízos ao meio ambiente (FAVARETO, 2021). Com isso, o manejo adequado das instalações pode contribuir com a mitigação da geração de CO<sub>2</sub> na produção animal por meio da adoção de ações de manejo adequadas em relação aos animais, à alimentação, à coleta, armazenamento e tratamento dos dejetos, à produção e formulação das rações, e às mudanças nas instalações dos animais (DOURMAD; RIGOLOT; HAYO, 2008). Por isso, o setor busca reduzir a emissão de

CO<sub>2</sub> e contribuir com a redução dos impactos das mudanças climáticas, enquanto aumenta a eficiência produtiva e garante a produção de alimentos de forma sustentável (ROLPH; FOREST; RUARK, 2019).

Entretanto, somente remover os poluentes das instalações de produção animal não resolve o problema ambiental global associado aos GEE. É necessário adotar técnicas mais sustentáveis e utilizar artifícios construtivos que minimizem a geração e a emissão dos GEE nos ambientes de produção animal. Nesse sentido, o uso do telhado verde pode ser uma alternativa interessante para minimizar os impactos ambientais relacionadas por conta do balanço de CO<sub>2</sub> e pela melhoria da condição térmica da construção. O telhado verde pode atuar na redução da temperatura da cobertura, no isolamento térmico, na interceptação da chuva, minimizando o escoamento superficial (LIU, HONGQING *et al.*, 2021). A presença da vegetação sobre o telhado contribui com o resfriamento do ambiente interno da instalação devido ao processo de evapotranspiração da planta (ANDRIC; KAMAL; AL-GHAMDI, 2020), com isso este sistema auxilia na redução do consumo de energia da instalação para acionamento dos sistemas de condicionamento, o que indiretamente diminui a geração de CO<sub>2</sub>. Além disso, no telhado verde ocorre a absorção do CO<sub>2</sub> a partir dos processos fotossintéticos o que promove melhoria da qualidade do ar no ambiente ao redor da instalação.

## 2.1 Mudanças climáticas

O CO<sub>2</sub> proveniente de combustíveis fósseis tem uma vida útil atmosférica de aproximadamente 300 anos, mais 25% de CO<sub>2</sub> permanecer na atmosfera indefinidamente (ARCHER, 2005). Isso implica no aumento da temperatura global, influenciando assim o clima do planeta e consequentemente contribuindo para o aquecimento atmosférico. O acúmulo do CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre pode efetivamente causar mudanças climáticas irreversíveis em escala de tempo (MATTHEWS; CALDEIRA, 2008).

Em 2019, a média anual da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> registrada foi 410 ppm, valor esse 47% maior que o total registrado nos últimos 2 milhões de anos (IPCC, 2021). O excesso de CO<sub>2</sub> na atmosfera pode implicar em aumento da temperatura global em até 5°C (PAINES; CAUDURO; POSSAMAI, 2019). Nos últimos 20 anos, de 2001 a 2020, a temperatura da superfície terrestre registrou um aumento significativo, variando de 0,84 °C a 1,10 °C, atingindo maiores picos nas últimas duas décadas. Entre os anos de 2011 e 2020 houve um aumento significativo na temperatura da superfície terrestre de 1,09 °C, ocorrendo as

maiores amplitudes de temperatura principalmente na parte continental do planeta (IPCC, 2021).

### **2.1.1 CO<sub>2</sub> na atmosfera**

O CO<sub>2</sub> é um gás atmosférico oriundo de processos naturais de decomposição da matéria orgânica e da respiração dos animais e microrganismos que se encontram no solo. A queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural), é uma das principais causas de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera (VAZ; RODRIGUES DE SOUZA; LOBO BAETA, 2022). Por outro lado, o CO<sub>2</sub> é absorvido no ar pelas plantas, via fotossíntese, ou pelos fitoplânctons presentes nos oceanos, ambos são conhecidos como sumidouros naturais de CO<sub>2</sub> (DE MIRANDA *et al.*, 2018). É importante ressaltar que o CO<sub>2</sub> é um gás primordial para os processos biológicos no planeta e para o equilíbrio climático global (DA FONSECA *et al.*, 2018).

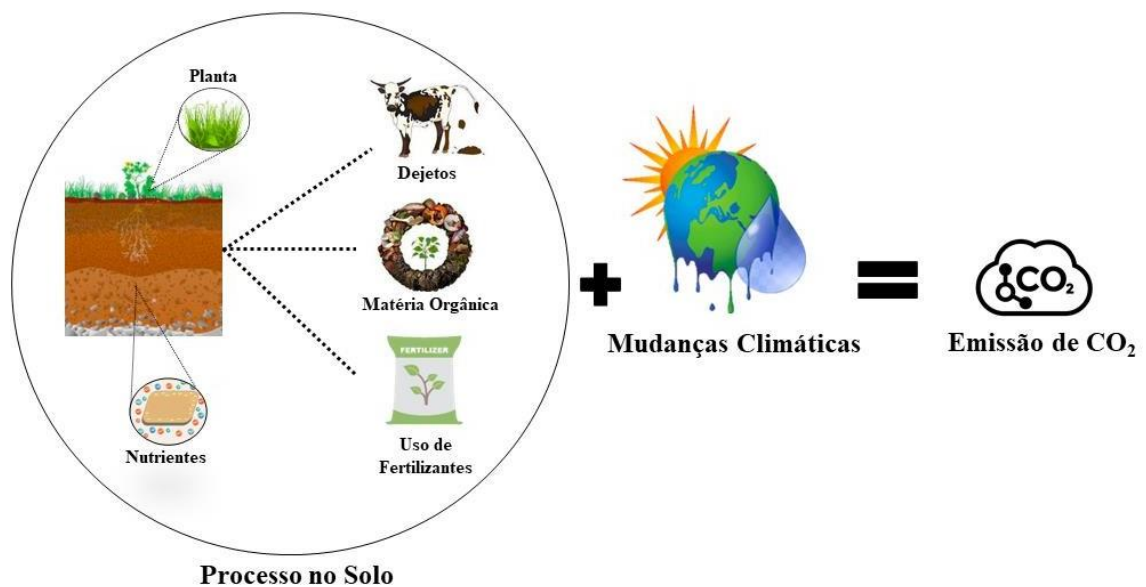
Na atmosfera é comum encontrar concentrações de 0,03 % ou 300 ppm de CO<sub>2</sub>. Ele possui densidade de aproximadamente 1,98 gramas por litro (CURTIS, 1983). Cerca de 20 % da emissão mundial média de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre provém de fontes primárias e secundárias. O CO<sub>2</sub> juntamente com o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e o metano (CH<sub>4</sub>), são considerados os principais gases do efeito estufa (GEE), por suas características de retenção e redirecionamento da radiação infravermelha excedente na superfície terrestre (RENAN BESEN *et al.*, 2018). A partir da revolução industrial houve um aumento considerável na emissão de CO<sub>2</sub> (WALTER; ROSA; STRECK, 2015), decorrente das queimas de combustíveis fósseis, de floresta e do uso inadequado dos recursos naturais (PAINES; CAUDURO; POSSAMAI, 2019). Atualmente os GEE são considerados os principais fatores responsáveis pelas mudanças climáticas.

### **2.1.2 CO<sub>2</sub> no Solo**

É preciso pontuar inicialmente que o CO<sub>2</sub> se encontra presente naturalmente em conjunto com outros gases, no solo e no ar, devido ao ciclo biogeoquímico do carbono, na decomposição da matéria orgânica, na atividade microbiana, na própria composição das moléculas orgânicas. Cogita-se, que as emissões de CO<sub>2</sub> do solo aumentaram significativamente nos últimos anos, em razão ao aumento da respiração do solo devido as mudanças climáticas. Esse acréscimo na emissão de CO<sub>2</sub> do solo se dá pela mineração da matéria orgânica, que inclui

suas propriedades física e química, na decomposição de uma variedade de elementos contidos no solo, como por exemplo, os resíduos vegetais, os dejetos derivados da produção animal e outros materiais em decomposição no solo. Liberando assim CO<sub>2</sub> por meio da respiração do solo e das atividades microbianas. Também é importante considerar outras propriedades do solo que incluem umidade, temperatura, pH, porosidade, textura do solo, disponibilidade de água e nutrientes e manuseio correto do solo (ABBASI *et al.*, 2021; YADAV; WANG, 2017). O CO<sub>2</sub> encontra-se presente no solo naturalmente e sua caracterização depende de uma série de outras variáveis, como: tipo de solo, condições climáticas, tipo de cultura, manejo da cultura, que inclui a utilização de diversos produtos químicos (YADAV; WANG, 2017), conforme Figura 1.

Figura 1. Processo de geração de CO<sub>2</sub> do solo no setor de produção animal



Fonte: Autores.

## 2.2 Ambiente térmico e CO<sub>2</sub> na agroindústria de produção animal

A produção de alimentos de origem animal, como carnes, ovos e leite, nas agroindustriais, é conduzida em sua maioria em confinamentos ou instalações, onde os animais são alojados durante todo o ciclo produtivo (SOUZA *et al.*, 2021). A produção animal se destaca pelo desenvolvimento constante de novas tecnologias, por meio dos avanços genéticos, nutricionais e pelo manejo (ABPA, 2022). Porém, a produção animal ainda apresenta

dificuldades em ajustar o seu manejo ambiental, principalmente em regiões com clima tropical, em razão das mudanças climáticas, que podem comprometer o bem-estar e o conforto térmico animal e assim ocasionar um desequilíbrio no desempenho produtivo (MELO *et al.*, 2015).

A geração de CO<sub>2</sub> no interior das instalações de produção animal tem origem nos processos de decomposição das excretas dos animais, que são normalmente depositadas no piso ou na cama e do processo de respiração animal (BAÊTA; SOUZA, 2010). O CO<sub>2</sub> produzido pelos animais está diretamente associado ao seu peso corporal e ao ganho de peso diário, o gás é gerado como resultado do metabolismo animal, nos processos de fermentação entérica. A emissão de CO<sub>2</sub> também ocorre a partir da produção de calor do animal, que pode ser calculada em função do peso do animal, do desempenho produtivo, da variação diária de peso e do ambiente térmico em que o animal está inserido (CALVET *et al.*, 2011). Assim, nas instalações de produção animal pode ocorrer acúmulo de CO<sub>2</sub> oriundo da fermentação entérica e da respiração dos animais presentes nas instalações como: aves, suínos e bovinos.

### **2.2.1 Avicultura**

O CO<sub>2</sub> gerado na avicultura, quando superior a 1,2 % ou 12.000 ppm pode comprometer a qualidade do ar e o desempenho dos trabalhadores e das aves, causando efeitos negativos nos animais como: ofegação, anóxia, redução no crescimento e do consumo de ração (MENEGALI *et al.*, 2009; REECE; LOTT; DEATON, 1980). Por isso, é importante manter os ambientes de produção animal com adequada qualidade do ar. Segundo a Resolução nº 9 de 2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2003) a concentração de CO<sub>2</sub> para manter o conforto e o bem-estar humano não deve ultrapassar 1000 ppm em ambientes externos. Enquanto em ambientes internos de instalações para animais, o limite máximo recomendado de CO<sub>2</sub> é de 3000 ppm (WATHES, 1999). Várias pesquisas já foram conduzidas na avicultura (LIMA *et al.*, 2014; LOURENÇONI *et al.*, 2015; MENEGALI *et al.*, 2009; OLIVEIRA, PAULO ARMANDO V. DE; ANGNES; COLDBELLA, 2020; VIGODERIS *et al.*, 2010) visando quantificar o CO<sub>2</sub> e relacionar a sua concentração com a condição térmica da instalação (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização do ambiente térmico e da qualidade do ar de instalações avícolas, associando características das construções com as variáveis: temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Autor (Ano)	Sistema/Tipologia Construtiva	T (°C)	UR (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)	
Menegali <i>et al.</i> (2009)	Ventilação Negativa	09:00 horas	27,50	70,00	1.964,70
		15:00 horas	28,50	67,00	1.602,30
	Ventilação Positiva	09:00 horas	29,50	71,50	2.377,90
		15:00 horas	31,50	64,50	2.090,30
Vigoderis <i>et al.</i> (2010)	Ventilação Artificial	24,00 a 31,50	45,00	a	1.427,30
			80,00	a	
	Ventilação Natural	23,00 a 32,00	42,00	a	1.527,70
			77,50		
Lima <i>et al.</i> (2014)	Lâmpada incandescente	21,42 a 28,52	38,88	a	460,30
	Vapor de sódio misturado	20,32 a 26,24	88,15	a	215,80
			38,04	a	
	Lâmpada fluorescente	19,51 a 25,52	88,13	a	185,40
38,29					
Lourençoni <i>et al.</i> (2015)	Com tela	Região Norte	-	-	409,70
		Região Central	-	-	468,60
		Região Sul	-	-	480,60
	Sem tela	Região Norte	-	-	407,70
		Região Central	-	-	466,60
		Região Sul	-	-	462,30
Oliveira <i>et al.</i> (2020)	Dark House Interno	24,00	78,50	554,75a 776,78	

Fonte: Adaptada dos autores citados.

Menegali *et al.* (2009) avaliaram os efeitos do CO<sub>2</sub> no ambiente interno de instalações para aves. A pesquisa foi conduzida em instalações com sistemas de ventilação com pressão positiva e negativa, os dados ambientais foram coletados às 09:00 e às 15:00 horas. Os autores observaram valores médios entre 1.602,3 e 2.377,9 ppm de CO<sub>2</sub> nos dois sistemas de ventilação, com pressão negativa e positiva, ambos os valores estão dentro do recomendado para de produção animal de 3.000 ppm (WATHES, 1999), portanto, nenhum dos sistemas representou condição de risco aos animais. No entanto, o sistema com ventilação com pressão positiva apresentou maior variação na concentração de CO<sub>2</sub> em comparação ao sistema com ventilação com pressão negativa no período da manhã, devido a instalação permanecer fechada durante o período noturno (Tabela 1). Às 09 horas, no sistema com ventilação com pressão positiva, observou-se 2.377,9 ppm de CO<sub>2</sub>, e no sistema com ventilação com pressão negativa 1964,7

ppm de CO<sub>2</sub>. Às 15 horas, em ambos os sistemas, a concentração de CO<sub>2</sub> permaneceu em níveis inferiores (1.602,3 e 2.090,3 ppm), o que mostra que a ventilação se mostrou eficiente na renovação do ar no ambiente interno da instalação.

Na avaliação da qualidade do ar, Vigoderis *et al.* (2010) notaram que as concentrações de CO<sub>2</sub> diferem significativamente nas instalações avícolas com e sem o uso de ventiladores (Tabela 1), sendo que os galpões com ventilação natural apresentaram concentração média de CO<sub>2</sub> de 1.527,7 ppm, valor maior quando comparado com o sistema com ventiladores onde foram observados valores de 1.427,3 ppm de CO<sub>2</sub>. Nesse estudo, ambas as instalações apresentaram concentrações de CO<sub>2</sub> dentro do limite preconizado para os animais, abaixo de 3.000 ppm (WATHES, 1999).

Lima *et al.* (2014) realizaram um estudo para analisar o impacto dos efeitos do uso de diferentes tipos de lâmpadas em instalações para frangos de corte (Tabela 1), sendo avaliados os tipos: incandescente, vapor de sódio misturado e fluorescente. A pesquisa consistiu em avaliar o ambiente térmico, aéreo e acústico e a temperatura superficial da cama das instalações para verificar o bem-estar e o conforto térmico dos animais. Assim, observou-se que a concentração média de CO<sub>2</sub> com uso da lâmpada incandescente foi 460,3 ppm, valor maior em comparação com os ambientes com as lâmpadas de vapor de sódio misturado e fluorescente que foram 215,8 ppm e 185,4 ppm, respectivamente. Desta forma, verificou-se que a lâmpada incandescente influenciou no aumento da temperatura do ar, e também na maior concentração de CO<sub>2</sub> no interior da instalação por contribuir com a maior produção de calor dos animais.

Em uma pesquisa com galinhas poedeiras os autores Lourençoni *et al.* (2015) avaliaram instalações comerciais com e sem o uso de tela PEAD (polietileno de alta densidade), na cor preta, com malha de 2,0 cm de diâmetro cercando parte dos galpões. Para avaliar o ambiente acústico e aéreo da instalação, em dos dois pontos em cada corredor (norte, central e sul), foram determinadas as variáveis acústicas e aéreas: nível de ruído, concentração de NH<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub>. Constatou-se que o maior valor de concentração de CO<sub>2</sub> ocorreu na área do corredor sul com o uso de tela, sendo de 480,6 ppm. Contudo, nenhum dos valores mensurados para concentração de CO<sub>2</sub> apresentou risco a saúde dos animais e dos trabalhadores, por permanecerem abaixo dos limites recomendados de 3.000 ppm ((WATHES, 1999)) e 1000 ppm ((ANVISA, 2003)).

Já Oliveira *et al.* (2020) em estudo com frangos de corte em instalação do tipo Dark House, verificaram que a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente interno no início do ciclo produtivo das aves de 554,75 ppm, aumentou linearmente ao longo do tempo para 776,78 ppm. Esse aumento na concentração de CO<sub>2</sub> tem influência de diversos fatores como: velocidade do ar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, peso das aves e material de cama. Segundo os autores

a reutilização da cama por diversos ciclos de produção pode causar aumento significativo na emissão de CO<sub>2</sub>, pela crescente atividade microbiana que libera CO<sub>2</sub> no processo de decomposição da cama. Além disso, a emissão de CO<sub>2</sub> no final do ciclo de produção das aves pode variar de acordo com a linhagem das aves (HENN *et al.*, 2015). À exposição contínua a elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> pode tornar o ambiente nocivo às aves podendo causar prejuízos no sistema digestivo, no metabolismo e até levar a morte do animal.

### 2.2.2 Suinocultura

A qualidade do ar nas instalações de produção animal está diretamente associada à produção de calor, que depende da massa corporal do animal e do ambiente térmico da instalação. O animal alojado na instalação libera constantemente calor, suor, CO<sub>2</sub> proveniente da respiração e gases oriundos da digestão. Desta forma, a emissão do CO<sub>2</sub> na suinocultura está relacionada ao tipo de instalação, à fase de criação, à genética, à alimentação, ao manejo dos dejetos e à condição climática do local (CAMPOS *et al.*, 2009). Na Tabela 2, são apresentados valores da concentração de CO<sub>2</sub> e das variáveis do ambiente térmico obtidos em pesquisas realizadas em instalações suinícolas, em diferentes setores de criação de suínos.

Tabela 2. Caracterização do ambiente térmico (temperatura do ar - T e umidade relativa do ar - UR) e qualidade do ar (concentração e emissão de dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>) de instalações para suinocultura em diferentes fases de criação, considerando a unidade animal (UA) 500 kg de peso vivo

Autor (Ano)	Fase/hora	T (°C)	UR (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (anual) (g.d <sup>-1</sup> .UA <sup>-1</sup> )	
Campos <i>et al.</i> (2009)	Creche	09:00	23,10	88,50	1.204,00	-
		12:00	27,90	67,60	997,00	-
	I	15:00	29,50	60,50	1.006,00	-
		18:00	26,80	74,00	1.268,00	-
	Creche	09:00	23,80	83,10	1.013,00	-
		12:00	27,50	65,40	876,00	-
	II	15:00	28,60	61,40	956,00	-
		18:00	26,90	76,90	1.251,00	-
Silveira <i>et al.</i> (2009)	Creche (G1)	-	-	858,33	-	
	Creche (G2)	-	-	475,00	-	
	Maternidade (G1)	-	-	510,00	-	
	Maternidade (G2)	-	-	558,33	-	
Freitas <i>et al.</i> (2018)	Creche I	18,51	57,57	645,70	-	
	Creche II	21,01	58,70	588,70	-	
	Reprodução	29,51	59,27	378,09	-	

Borges <i>et al.</i> (2019)	Terminação	27,36	59,23	315,06	-
Dong <i>et al.</i> (2007)	Creche	28,16	-	-	29.670,00
	Terminação	20,65	-	-	16.730,00
	Gestação	18,16	-	-	5.920,00
	Maternidade	26,16	-	-	7.490,00
Costa & Guarino (2009)	Creche	24,91	48,00	-	5.997,00
	Terminação	24,40	61,66	-	13.636,00
	Gestação	23,58	45,00	-	8.851,00
	Maternidade	16,41	64,66	-	1.278,00

Fonte: Adaptada dos autores citados.

Campos *et al.* (2009) realizam o monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub> em duas creches suínolas nos horários 09:00, 12:00, 15:00 e 18:00 horas. Os autores verificaram que as concentrações médias de CO<sub>2</sub> mantiveram-se entre 876 e 1.268 ppm (Tabela 2), valores esses que não chegaram a afetar a saúde dos animais e dos trabalhadores, por se manterem dentro dos limites estabelecidos de 3.000 ppm ((WATHES, 1999) e 1000 ppm ((ANVISA, 2003).

Como os setores creche e maternidade requerem uma demanda maior do trabalhador para executar as funções como: corte de cauda, corte de umbigo, trato, manejos no parto e com os leitões e limpeza do galpão, a pesquisa de Silveira *et al.* (2009) baseou-se na avaliação da concentração de CO<sub>2</sub> em duas granjas (G1 e G2), localizadas em regiões distintas com estes dois setores. Observou-se na granja 1 no setor de creche a concentração de 858,33 ppm de CO<sub>2</sub>, valor esse superior aos valores encontrados na granja 2, enquanto na maternidade a maior concentração de CO<sub>2</sub> foi de 558,33 ppm na granja 2 (Tabela 2).

Em avaliação do ambiente térmico, aéreo e acústico, os autores Freitas *et al.* (2018) analisaram duas instalações para suínos na fase de creche. Os valores médios de concentração de CO<sub>2</sub> nas instalações (Tabela 2) foram 645,70 e 588,70 ppm na creche I e II, respectivamente. Deste modo, as concentrações de CO<sub>2</sub> mantiveram-se dentro do limite das normas vigentes permitida para produção animal de 3000 ppm (WATHES, 1999).

Os autores Borges *et al.* (2019) avaliaram a concentração de CO<sub>2</sub> e as variáveis climáticas (temperatura e umidade relativa do ar) em instalações para suínos (Tabela 3), nos setores de terminação e reprodução. O monitoramento foi realizado por 24 horas, durante 15 dias no verão, os autores constataram que no setor de reprodução a concentração de CO<sub>2</sub> (378,09 ppm) foi superior, ao galpão de terminação (315,06 ppm), evidenciando uma relação entre a concentração de CO<sub>2</sub> e a temperatura do ar, que no setor de reprodução foi de 29,51 °C e no setor de terminação foi de 27,36 °C.

Dong *et al.* (2007) realizaram estudo com 1.200 suínos em quatro galpões com ventilação natural, durante as fases de gestação, maternidade, creche e terminação, por um período de seis meses. A pesquisa consistiu em coletar manualmente o CO<sub>2</sub> e quantificar a emissão a partir da unidade animal (UA 500 kg massa corporal viva). O setor creche apresentou o maior valor de emissão de CO<sub>2</sub> (29.670 g.d<sup>-1</sup>.UA<sup>-1</sup>) decorrente do acúmulo de dejetos por um tempo maior em comparação com as outras instalações: terminação, gestação e maternidade que apresentaram emissão de CO<sub>2</sub> de 16.730, 5.920, 7.490 g.d<sup>-1</sup>.UA<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 2).

Costa & Guarino (2009) determinaram a emissão de CO<sub>2</sub> em instalações para suinocultura com sistema de ventilação artificial, desde a gestação até a terminação. O CO<sub>2</sub> foi mensurado continuamente nos dutos de exaustão, com um detector fotoacústico infravermelho e considerados os critérios: peso vivo, ganho médio de peso vivo, número de animais e sua variação, tipo de ração e tempo de alimentação na emissão do CO<sub>2</sub>. Os autores observaram que a emissão de CO<sub>2</sub> (Tabela 2) foi menor no setor de maternidade com 1.278 g.d<sup>-1</sup>.UA<sup>-1</sup> em comparação aos setores de creche, terminação e gestação que foram 5.997, 13.636 e 8.851 g.d<sup>-1</sup>.UA<sup>-1</sup> anualmente. Os autores concluíram que o aumento da emissão de CO<sub>2</sub> está associado ao tipo de estrutura de criação e a locomoção do animal dentro das instalações, já que na maternidade as fêmeas suínas estavam alojadas em gaiolas, com um espaço limitado e com pouca movimentação.

### 2.2.3 Bovinocultura

A pecuária é considerada uma das principais fontes de emissão de gases, como: metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>), derivados do metabolismo do animal e da decomposição dos dejetos (D'URSO *et al.*, 2021). Vale ressaltar que a emissão do CO<sub>2</sub> tem fontes secundárias presentes nas unidades de produção, como: no piso ou na cama do galpão onde as excretas dos animais são depositadas, na queima de combustíveis fósseis durante atividades de manejo na propriedade, como fornecimento de alimento e revolvimento da cama (SEJIAN *et al.*, 2016). Na Tabela 3, são apresentados resultados de pesquisas em instalações para bovinocultura com a caracterização da qualidade do ar, pelas concentrações de CO<sub>2</sub> e das condições térmicas do ambiente pela caracterização da temperatura do ar e umidade relativa do ar.

Tabela 3. Variáveis do ambiente térmico (temperatura do ar – T e umidade relativa do ar – UR) e qualidade do ar (concentração de dióxido de carbono – CO<sub>2</sub>) de instalações para bovinocultura, em valores mínimos e máximos

<b>Autor (Ano)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>UR (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>
Zou <i>et al.</i> (2020)	28,50 a 33,10	42,23 a 67,07	1.360,92 a 1.401,53
D'Urso & Arcidiacono (2021)	21,80 a 25,10	-	703,70 a 720,40
D'Urso <i>et al.</i> (2021)	26,60 a 27,40	57,90 a 55,20	580,00 a 741,00

Fonte: Autores com dados dos autores citados.

Zou *et al.* (2020) avaliaram a concentração de CO<sub>2</sub> em uma instalação aberta com ventilação natural para bovinos de leite. Foram observadas variações entre 1.360,92 ppm e 1.401,53 ppm na concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente interno da instalação (Tabela 3), no momento da alimentação dos animais.

Através do monitoramento de vacas leiteiras D'Urso & Arcidiacono (2021) observaram que o número de ordenhas realizadas pode influenciar na concentração de CO<sub>2</sub> em instalação tipo *Free-Stall*. A pesquisa consistiu em analisar as concentrações de CO<sub>2</sub> em instalações que praticavam duas e três ordenhas diárias (Tabela 3) e as concentrações médias foram 720,4 e 703,7 ppm, respectivamente. Os autores observaram que com a ordenha adicional houve uma redução na concentração de CO<sub>2</sub>, isto é, utilizar três ordenhas diárias pode ser uma forma de mitigar a emissão de CO<sub>2</sub> em instalações para bovinos.

Os autores D'Urso *et al.* (2021) realizaram um estudo em instalação tipo *Free-Stall* para gado leiteiro e observaram que os valores médios da concentração de CO<sub>2</sub> variaram entre 580 e 741 ppm (Tabela 3) e concluíram que a variação da concentração do gás ocorre de acordo com a variação das condições climáticas.

## 2.4 Sequestro de carbono

O desenvolvimento das plantas ocorre por meio da absorção de energia luminosa, a partir do Sol, que é transformada em energia química pelo processo de fotossíntese. Esse processo ocorre por intermédio de duas fases: luminosa e de síntese. A primeira fase ocorre pela oxidação da molécula de água (H<sub>2</sub>O) em oxigênio (O<sub>2</sub>) e pela redução do CO<sub>2</sub> em compostos orgânicos, que utiliza o calor como forma de energia. Já na segunda fase o CO<sub>2</sub> é reduzido em molécula orgânica, ao empregar o ATP (adenosina trifosfato) como fonte de energia. Além disso, a fotossíntese depende de fatores ambientais como o CO<sub>2</sub>, a luminosidade e a temperatura do ambiente (KLUGE; TEZOTTO-ULIANA; DA SILVA, 2015).

Dorneles *et al.* (2019) e Martinez *et al.* (2015) afirmam que a molécula de CO<sub>2</sub> influencia diretamente no processo de fotossíntese, pois ela fornece o composto primário para o desenvolvimento das plantas, o carbono (C), que é crucial no processo. Assim, o C irá impulsionar a taxa fotossintética das plantas com o aumento da produção de açúcares, contribuindo diretamente para o desenvolvimento estrutural e para a área foliar da planta. Entretanto, a concentração de CO<sub>2</sub> em excesso pode acarretar maior desenvolvimento produtivo em função da maior atividade fotossintética, o que promove redução das taxas de fotorrespiração, ou seja, esse processo é caracterizado pela perda da eficiência fotossintética, pois a fotorrespiração é responsável por catalisar a reação de oxigenação ao invés da carboxilação, por maior afinidade pelo CO<sub>2</sub>. Com isso, a resposta da planta varia de acordo com a espécie vegetal e com a concentração de CO<sub>2</sub> presente no ambiente (WALTER; ROSA; STRECK, 2015).

A fixação de CO<sub>2</sub> varia consideravelmente de acordo com o metabolismo fotossintético das plantas, que são classificadas em: C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e CAM (metabolismo ácido das crassuláceas). A assimilação fotossintética das espécies com metabolismo C<sub>3</sub> ocorre pela fixação do CO<sub>2</sub> na forma de carboidrato pelo ciclo de Calvin-Benson. Isto é, ocorre a carboxilação/oxigenação por meio da RUDP (ribulose difosfato), onde a molécula de CO<sub>2</sub> é fixada no mesófilo foliar. Desse modo, a eficácia da carboxilação tem relação direta com a concentração interna de CO<sub>2</sub> da planta e com a sua taxa fotossintética (DORNELES *et al.*, 2019).

As espécies C<sub>3</sub> desenvolvem-se melhor em condições de clima frio, e quando expostas a elevada temperatura do ar a sua capacidade de assimilação de CO<sub>2</sub> é prejudicada. E com isso, o fornecimento de amido e sacarose é limitado, pois quando há saturação pelos fatores ambientais, o metabolismo da planta irá liberar fosfato inorgânico para auxiliar na regeneração, nas reações que envolvem a Rubisco (BUSCH; SAGE, 2017; LIU, HUI *et al.*, 2019).

As plantas com metabolismo C<sub>4</sub> são bem adaptadas às condições de clima quente e seco, sendo nessas condições mais eficientes na fixação do CO<sub>2</sub>, quando comparadas as plantas C<sub>3</sub>. Mesmo em ambientes com elevada temperatura do ar as plantas com metabolismo C<sub>4</sub> conseguem manter elevada taxa fotossintética e de crescimento, devido à redução na abertura dos estômatos, o que reduz a perda de água (MOREIRA, 2013; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Além disso, existe uma diferença estrutural entre as plantas de metabolismo C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>. Enquanto as plantas C<sub>4</sub> produzem compostos orgânicos como o Oxaloacetato (4 carbonos), as plantas C<sub>3</sub> produzem ácido Fosfoglicérico (3 carbonos). Adicionalmente, as plantas com metabolismo C<sub>4</sub> contam com a presença da Rubisco, nas células da bainha *Kranz*, e com a Fosfoenol Piruvato (PEPcase) nas células do mesófilo foliar, que é uma enzima com maior

fixação de CO<sub>2</sub>, e que auxilia a não perder o carbono para a fotorrespiração (KLUGE; TEZOTTO-ULIANA; DA SILVA, 2015; MORAES; PALHANO, 2002; MOREIRA, 2013). Na Tabela 4, encontram-se alguns aspectos comparativos relacionados ao processo de fixação de CO<sub>2</sub> nas espécies dos tipos C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>.

Tabela 4. Parâmetros comparativos da fixação de CO<sub>2</sub> em plantas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>

Parâmetro	Plantas C <sub>3</sub>	Plantas C <sub>4</sub>
Composto que reage com o CO <sub>2</sub> no ciclo de Calvin-Benson	RUDP (ribulose difosfato)	PEP (fosfoenol piruvato)
Enzima fixadora do CO <sub>2</sub>	Rubisco (carboxilase/ oxigenase)	PEP carboxilase Oxaloacetato
Primeiro produto da fixação do CO <sub>2</sub>	Ácido fosfoglicérico (3 carbonos)	Oxaloacetato (4 carbonos)
Taxa de fotossíntese ótima (mg CO <sub>2</sub> /d.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	30	60
Temperatura ótima para fixação de CO <sub>2</sub> (°C)	20 a 30	30 a 45
Ponto de saturação de CO <sub>2</sub>	800 ppm	200 ppm

Fonte: Adaptado de Castro *et al.* (2005), Rodrigues *et al.* (2011) e Moreira (2013).

As plantas com metabolismo CAM (metabolismo ácido das *crassulaceae*) apresentam assimilação fotossintética diferente das plantas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, pois a abertura dos estômatos e a fixação de CO<sub>2</sub> ocorrem durante a noite, com maior atividade da PEPcase e malato. Isso confere a essas plantas, maior adaptabilidade aos ambientes áridos e com pouca disponibilidade de água (ALMEIDA; SOUZA; BATISTA, 2019). Logo, a descarboxilação do malato acumulado durante a noite permite que o CO<sub>2</sub> liberado durante o dia seja incorporado ao ciclo de Calvin-Benson pela Rubisco (KLUGE; TEZOTTO-ULIANA; DA SILVA, 2015). As plantas de metabolismo CAM apresentam processo de fixação de CO<sub>2</sub> semelhante ao das plantas C<sub>4</sub>.

É importante salientar que os aspectos fisiológicos e ambientais estão ligados adaptação das espécies vegetais ao meio, como por exemplo, a radiação solar que favorece a conversão da luz em carboidratos. Porém, quando se tem uma maior concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e uma elevada temperatura do ar, o câmbio de CO<sub>2</sub> em O<sub>2</sub> conseqüentemente aumentará a taxa de fotorrespiração pela planta e o CO<sub>2</sub> seria lançado na atmosfera ao invés de ser absorvido (KLUGE; TEZOTTO-ULIANA; DA SILVA, 2015). Nesse sentido, é de suma importante conhecer as espécies de plantas e seus respectivos metabolismos, como as C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> (gramíneas) e CAM (SALISBURY; ROSS, 1992):

- Espécies C<sub>3</sub>: *Agropyron repens L. Beauv.*; *Agrostis alba L.*; *Avena sativa L.*; *Dactylis glomerata L.*; *Festuca arundinacea Schreb*; *Hordeum vulgare L.*; *Lolium multiflorum Lam.*; *Oryza sativa L.*; *Panicum commutatum Schult.*; *Phalaris canariensis L.*; *Poa pratensis L.*; e *Triticum aestivum L.*
- Espécies C<sub>4</sub>: *Aristida purpurea Nutt.*; *Aristide hamulosa Hen. Y.*; *Eragrostoideae* *Bouteloa curtipendula (Michx.) Torr.*; *Buchloe dactyloids (Nutt.) Engelm.*; *Chloris cucullata Bisch.*; *Chloris distichophylla Lag.*; *Cynodon dactylon Pers.*; *Eragrostis chloromelas Steud*; *Eragrostis pilosa L. Beauv.*; *Muhlenbergia schreberi J. F. Gmel.*; *Zoysia japonica Steud.*; *Andropogon scoparius Michx.*; *Cenchrus pauciflorus Benth.*; *Digitaria sanguinalis L. Scop*; *Echinochloa crus-galli L. Beauv.*; *Euchlaena mexicana Schrad*; *Panicum antidotale Retz*; *Panicum capillare L.*; *Panicum halli Vasey*; *Paspalum notatum Flugge*; *Pennisetum purpureum Schum*; *Saccharum officinarum L.*; *Setaria italica L. Beauv*; *Setaria lutescens W. Hubb*; *Sorghum bicolor L. Moench*; *Sorghum sudanense P. Stapf*; *Tripsacum dactyloides L.*; e *Zea mays L.*
- Espécies CAM: *Aeonium spp*; *Agave spp*; *Aloe vera*; *Ananas comosus spp*; *Cactus (Saguaro)*; *Crassula argentea*; *Echeveria spp*; *Isoetes spp*; *Hoya carnosa*; *Huernia spp*; *Kalanchoe spp*; *Opuntia basilaris*; *Orquídeas*; *Sedum spp*; *Tillandsia usneoides* e *Yucca spp*.

## 2.5. Estimativa de balanço de CO<sub>2</sub> na produção animal

Pela associação da produção animal com a produção vegetal torna-se possível realizar a estimativa do balanço de CO<sub>2</sub> na agroindústria de produção animal. Para isso, utiliza-se os métodos de quantificação do CO<sub>2</sub> gerado nas instalações de produção animal e do CO<sub>2</sub> absorvido pelas espécies vegetais a partir dos métodos desenvolvidos por Li *et al.* (2010) e Yacob *et al.* (2021). Nesses métodos são considerados vários fatores primordiais na estimativa da absorção de CO<sub>2</sub> pelo telhado verde e na emissão de CO<sub>2</sub> pela produção animal. Os principais fatores que influenciam na captura/absorção do CO<sub>2</sub> são: espécie da planta, assimilação fotossintética, tipo de solo/substrato, disponibilidade de água e condições ambientais (temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar).

A técnica aplicada para avaliar a absorção de CO<sub>2</sub> foi desenvolvida por Li *et al.* (2010), que ressaltam que a eficiência do telhado verde está relacionada diretamente às condições das

plantas, a posição do telhado verde e ao fluxo de ar do ambiente. A análise para quantificação da absorção de CO<sub>2</sub> é realizada a partir do comportamento da planta em ambiente controlado durante o dia e a noite, determinando-se a redução da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente de teste, conforme a Equação 1.

$$\Delta C.V = A. (\alpha.C). \Delta t \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{V}{A.\Delta t} \quad (1)$$

Em que:  $\Delta C$  é a variação da concentração CO<sub>2</sub> neste intervalo do tempo (mg/m<sup>3</sup>);  $V$  é o volume da câmara (m<sup>3</sup>);  $A$  é a área da folha da planta (m<sup>2</sup>);  $\alpha$  é a velocidade de absorção de CO<sub>2</sub> (m/min);  $C$  é concentração de CO<sub>2</sub> na câmara (mg/m<sup>3</sup>);  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (min).

Em uma simulação, onde foi estimada a área foliar total do telhado verde, utilizando a velocidade de absorção de CO<sub>2</sub> da planta e a concentração de CO<sub>2</sub> local com condições de clima tropical, observou-se que o telhado verde é capaz de absorver 13,8 g de CO<sub>2</sub> por minuto na circunvizinhança (LI, JIAN FENG *et al.*, 2010). Com o método de Yacob *et al.* (2021) pode-se realizar uma estimativa da absorção do CO<sub>2</sub> com o uso do telhado verde, essa determinação pode ser feita por uma amostragem da área foliar da planta para quantificar a taxa de fotossíntese líquida, conforme Equação 2.

$$A = P_n - R \quad (2)$$

Em que:  $A$  é taxa de fotossíntese líquida;  $P_n$  é a taxa de fotossíntese diurna; e  $R$  é a respiração no escuro.

Já a emissão de CO<sub>2</sub> pelos animais pode ser estimada de acordo com a categoria animal, o ciclo de vida, o processo de respiração, a fermentação entérica, o tipo de cama e o manejo dos dejetos. Os autores Li *et al.* (2005) e Barreto-Mendes *et al.* (2014) realizaram o método de balanço de CO<sub>2</sub> na produção animal apoiando-se no princípio de calorimetria indireta, onde a produção de calor metabólico está diretamente associada ao consumo de O<sub>2</sub> e a produção de CO<sub>2</sub> pelos animais.

A concentração de CO<sub>2</sub> presente no ar dos ambientes de produção animal pode ser determinada utilizando uma Unidade de Monitoramento Portátil (PMU) ou um sensor portátil (eletroquímico) de CO<sub>2</sub>, que também podem determinar as variáveis ambientais (temperatura e umidade relativa do ar) para auxiliar na caracterização do ambiente térmico.

O CO<sub>2</sub> metabólico produzido pelos animais presentes na instalação pode ser determinado em função da sua taxa de produção de calor, do número de animais alojados, da massa dos animais e do quociente respiratório do animal. Esse quociente depende da taxa de produção de dióxido de carbono e do consumo de oxigênio. Todas essas variáveis podem ser

determinadas utilizando-se as Equações 3, 4, 5 e 6 ((BARRETO-MENDES *et al.*, 2014; BROUWER, 1964; H. XIN *et al.*, 2009)

$$\text{THP} = 16,18 \text{ O}_2 + 5,02 \text{ CO}_2 \quad (3)$$

$$\text{THP} = N \times 10,62 \times m^{0,75} \quad (4)$$

$$\text{RQ} = \text{CO}_2 / \text{O}_2 \quad (5)$$

$$\text{CO}_2 \text{ metabolic} = \frac{\text{THP}}{\frac{16,18}{\text{RQ}} + 5,02} \quad (6)$$

Em que: THP é a taxa de produção de calor do animal ( $\text{W.kg}^{-1}$ );  $\text{O}_2$  é a taxa de consumo de oxigênio ( $\text{mL. s}^{-1} \cdot \text{Kg}^{-1}$ );  $\text{CO}_2$  é a taxa de produção de dióxido de carbono ( $\text{mL. s}^{-1} \cdot \text{Kg}^{-1}$ ); N é o número de animais na instalação; m é a massa corporal do animal (kg); e RQ é o quociente respiratório do animal (frangos de corte é 0,9).

A taxa de produção de calor do animal deve ser ajustada ao desvio da temperatura do ambiente e pode ser calculada utilizando-se a Equação 7 (BARRETO-MENDES *et al.*, 2014; BROUWER, 1964).

$$\text{THP}_{\text{corr.T}} = 4 \times 10^{-5} (20 - T)^3 \quad (7)$$

Em que:  $\text{THP}_{\text{corr.T}}$  é a taxa de produção de calor com o fator de correção da temperatura sobre o animal; e T é a temperatura do ar do interior da instalação ( $^{\circ} \text{C}$ ).

Os autores Dong *et al.* (2007) determinaram um método para quantificar a taxa de emissões GEE, dentre eles o  $\text{CO}_2$  gerado na produção animal. O balanço de  $\text{CO}_2$  foi determinado pela diferença na quantidade de  $\text{CO}_2$  presente no ar do exaustor e no ar da entrada da instalação (Equação 8). Desse modo foram mensuradas a concentração do gás e a taxa de ventilação, a cada duas horas.

$$\text{ER} = \text{VR} \times ([\text{C}]_e - [\text{C}]_i) / N \quad (8)$$

Em que: ER é a taxa da emissão de  $\text{CO}_2$  ( $\text{mg. h}^{-1} \cdot \text{animal}^{-1}$ ); N é o número de animais do galpão; VR é a taxa de ventilação ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ); e  $[\text{C}]_e$  e  $[\text{C}]_i$  são as concentrações do exaustor e da entrada do ar ( $\text{mg. m}^{-3}$ ).

Ogink *et al.* (2013) descrevem metodologias para quantificação da emissão de  $\text{CO}_2$  nas instalações de produção animal. Onde realizaram uma pesquisa metodológica sobre a formação e emissão de poluentes nocivos no setor de produção animal, como mitigar os efeitos dos gases e quantificar os fatores de emissão. Na maioria dos casos abordados, o balanço de  $\text{CO}_2$  pode ser feito a partir da concentração do gás e da taxa de ventilação, pelo método de relação de gás

traçador, utilizando um amostrador de fluxo passivo, câmara de fluxo e pela ventilação (baixa) com modelagem de dispersão. Assim, as metodologias apresentadas por Ogink *et al.* (2013) podem ser utilizadas na quantificação do CO<sub>2</sub> gerado nas instalações de produção animal.

Portanto, a aplicação do telhado verde na produção animal pode ser uma técnica alternativa para minimizar os impactos das mudanças climáticas, que por sua vez, parte é oriunda dos poluentes aéreos gerados no interior das instalações de produção animal. O balanço de CO<sub>2</sub> em instalações de produção animal com o uso de telhado de verde depende da determinação da absorção do CO<sub>2</sub> pelo telhado verde e da emissão de CO<sub>2</sub> pelos animais. Portanto, uma opção viável para promover maior sustentabilidade na produção animal é buscar um equilíbrio de CO<sub>2</sub> que favoreça o ciclo natural desse gás, o qual desempenha um papel crítico tanto na produção animal quanto no ambiente global.

## 2.6. Telhado verde

O telhado verde é uma técnica construtiva antiga. Os primeiros e mais famosos telhados verdes foram construídos na Semiramis (Síria) e na Babilônia, conhecidos como “Jardins Suspensos”, por volta de 500 aC. O telhado verde moderno é precursor do jardim de telhado/cobertura, o qual foi construído para minimizar os efeitos da adversidade climática e para potencializar o isolamento térmico. O telhado verde é conhecido também por diversos outros termos como: cobertura verde, teto verde, telhado jardim, cobertura viva, fachada verde, entre outros (OBERNDORFER *et al.*, 2007). Atualmente, muitos países aderiram o uso do telhado verde devido às mudanças climáticas extremas, como: Suécia, Finlândia, Islândia, Dinamarca, Noruega, Groenlândia, Vinland e Ilhas Faroé. Assim, o uso do telhado verde destacou-se no início do século 20 na Alemanha, pelo surgimento de crises energéticas e pelos danos físicos causados pela incidência direta da radiação na estrutura do telhado nos grandes centros urbanos (OBERNDORFER *et al.*, 2007; SHAFIQUE; KIM; RAFIQ, 2018).

A construção do telhado verde se dá por meio de cultivo que recobre a instalação parcialmente ou totalmente com vegetação, em uma membrana impermeável, com barreira de raiz, sistema de drenagem e sistema de irrigação (SULTANA; AKIB; ASHRAF, 2017). O telhado verde pode ser classificado em dois principais tipos de sistemas: extensivo e intensivo, cuja principal diferença está na espessura do meio de cultivo e na infraestrutura adequada para cada sistema (ANDRIC; KAMAL; AL-GHAMDI, 2020). O sistema extensivo é caracterizado por ter substrato raso (<15 cm), vegetação de pequeno porte, requisito mínimos de irrigação e manutenção, enquanto o sistema intensivo possui substrato mais profundo (>15 cm), vegetação

de médio porte (culturas comestíveis ou jardins paisagísticos) e necessita de maior mão-de-obra (BOLLMAN *et al.*, 2021; DROZ; COFFMAN; BLACKWOOD, 2021).

A utilização do telhado verde é uma técnica bem difundida no ramo construtivo e atualmente na pesquisa científica, por proporcionar uma série de benefícios ao ecossistema, tais como: filtro de absorção do CO<sub>2</sub> atmosférico, no qual esse processo se dá por duas maneiras: pela própria vegetação presente no telhado, que absorve o CO<sub>2</sub> na circunvizinhança da instalação, por meio da fotossíntese, e pela absorção de CO<sub>2</sub> pelo substrato da cobertura vegetal. Além disso, o processo de evapotranspiração da vegetação presente no telhado verde pode amenizar a temperatura do ambiente interno da instalação, diminuindo a demanda energética com equipamentos para promover o condicionamento térmico, como ventiladores, e consequentemente mitigar o consumo de combustíveis fósseis (SEYEDABADI; EICKER; KARIMI, 2021). O telhado verde também atua na renovação do ar do ambiente absorvendo o CO<sub>2</sub>, poeira, entre outros poluentes e liberando oxigênio (CAI *et al.*, 2019). Possibilita a mitigação do efeito de ilha de calor, atua na absorção e interceptação d'água pluviais, reduzindo o escoamento superficial, prolongando a vida útil dos materiais de cobertura e promovendo o paisagismo (LIU, HONGQING *et al.*, 2021).

Na produção animal o telhado verde pode influenciar, de forma direta ou indireta, na qualidade do ar do ambiente. Os efeitos diretos envolvem a redução da concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente por meio da absorção das plantas e do armazenamento em suas estruturas. Nesse processo, é importante considerar o tipo de vegetação, pois cada espécie de planta pode atuar de forma diferenciada na captura do CO<sub>2</sub>. Já os efeitos indiretos envolvem vários fatores como o maior isolamento térmico do telhado e a redução da temperatura do ar no interior da instalação, o que auxilia na redução do consumo de combustíveis fósseis, afetando positivamente no controle da qualidade do ar e na condição térmica da instalação (LIU, HONGQING *et al.*, 2021).

Os autores Yacob *et al.* (2021) observaram que a espécie *Alternanthera Paronychioides* é uma excelente espécie vegetal para ser utilizada no telhado verde pelo seu alto potencial de absorção de CO<sub>2</sub> em condições de clima tropical. Assim, é importante salientar que como o processo de absorção de CO<sub>2</sub> pelas plantas está associado à perda de água, que é conhecido como transpiração durante a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2017), as condições climáticas locais, em termos de temperatura e umidade relativa do ar, são fundamentais para obtenção de um bom desempenho do telhado verde.

O telhado verde tem sua eficiência térmica fortemente influenciada pelo teor de umidade contida no material vegetal e substrato, ou seja, maior resfriamento evaporativo, pois a

vegetação está constantemente transpirando e conseqüentemente proporcionando maior condutividade térmica (BOLLMAN *et al.*, 2021). É importante salientar que o telhado verde se destaca pelo seu desempenho térmico de forma sustentável, o qual atua na retenção de calor no frio e na redução do calor nos períodos quentes, favorecendo um microclima satisfatório no interior das construções urbanas, além do mais pode ser aplicado na produção animal e contribuir com o sequestro de carbono.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Local do experimento

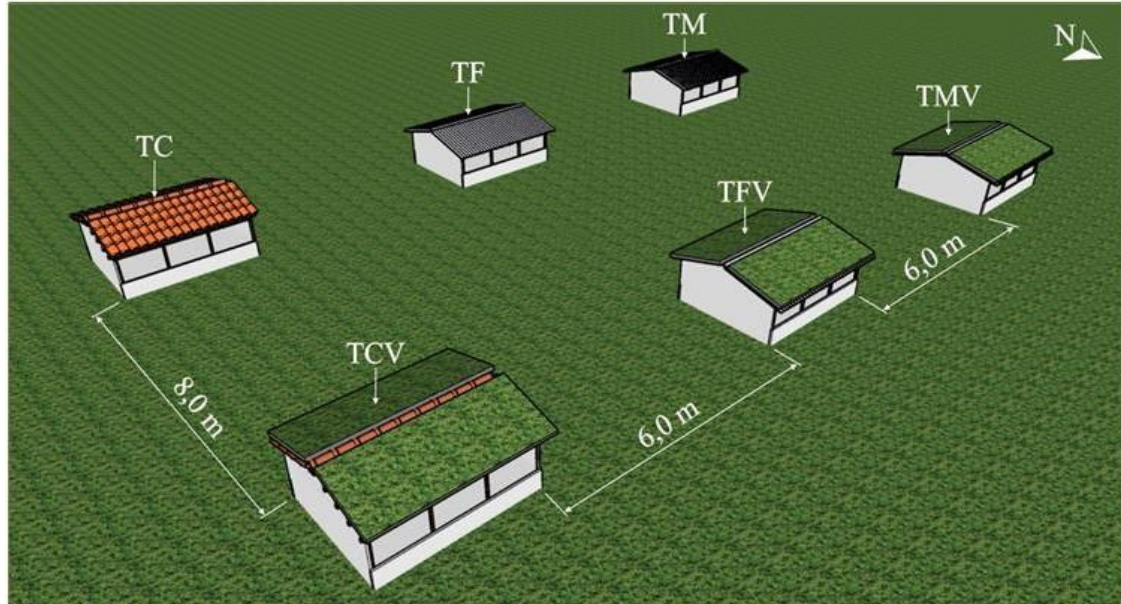
A pesquisa foi realizada na área de Construções Rurais e Ambiente, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa/MG, nas dependências do Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais (AMBIAGRO), localizado na latitude 20° 45' Sul e longitude 45° 52' Oeste, com altitude média de 670 m. A classificação climática do local, segundo Koppen, é *Cwa*, clima subtropical com inverno seco e frio e verão quente e úmido. O experimento foi realizado no período de verão, durante quatorze dias, utilizando-se protótipos abertos e fechados, ou seja, com e sem cortinas nas faces abertas dos protótipos, tendo sete dias de coleta de dados, em cada situação.

Foram utilizados seis protótipos de aviários comerciais construídos em escala reduzida, utilizando o conceito de similitude na escala 1:5 (MURPHY, 1950). Os protótipos apresentam as mesmas dimensões, sendo 2,5 m de largura, 3,2 m de comprimento, 0,6 m de pé direito e 0,5 m beiral. Os protótipos encontram-se em uma área plana, gramada, distribuídos em duas linhas, orientados no sentido Leste-Oeste.

### 3.2 Tipos de materiais de cobertura testados

Os tratamentos foram constituídos por três diferentes combinações de materiais de cobertura providas e desprovidas de telhado verde. Os tipos de telhas utilizados foram: telha cerâmica romana, telha de fibrocimento ondulada, e telha metálica em formato trapezoidal. Três dos seis protótipos citados tiveram cada um dos diferentes materiais de cobertura associados a uma cobertura de grama esmeralda (*Zoysia japonica*), conforme Figura 2. Foram realizados dois experimentos para avaliar duas diferentes tipologias construtivas, protótipos abertos e fechados. A tipologia com protótipos fechados foi caracterizada pela presença de cortinas de polietileno, na cor azul, posicionadas nas laterais dos protótipos, no sentido do seu comprimento (Figura 2).

Figura 2. Representação do posicionamento dos protótipos na área experimental, com os diferentes tratamentos: protótipo com telha cerâmica (TC), protótipo com telha de fibrocimento (TF), protótipo com telha metálica (TM), protótipo com telha cerâmica e cobertura vegetal (TCV), protótipo com telha de fibrocimento e cobertura vegetal (TFV) e protótipo com telha metálica e cobertura vegetal (TMV)



Protótipos Abertos



Protótipos Fechados

Fonte: Autores.

Antes de cada período experimental foi realizada uma limpeza nas telhas de cerâmica e fibrocimento dos protótipos. Em seguida, essas telhas foram impermeabilizadas com verniz, para evitar infiltrações. Durante a instalação do telhado verde, utilizou-se uma tela preta, tipo sombrite, como suporte para fixação do substrato e da grama. A grama foi distribuída sobre a área do telhado, totalizando em 9 m<sup>2</sup> de cobertura, equivalente a 26 kg de grama por metro quadrado. As telhas de fibrocimento utilizadas no experimento possuíam aspecto moderadamente escurecido (Figura 3), devido seu tempo de uso, o que se espera que aumente a absorção de calor em relação ao material novo.

Figura 3. Imagem ilustrativa da coloração escurecida da telha de fibrocimento do protótipo



Fonte: Autores.

### 3.3 Manejo da irrigação da cobertura vegetal

A necessidade hídrica da grama utilizada na cobertura vegetal foi determinada em função da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), e calculada pelo método de Penman- Monteith (Equação 9), de acordo com Allen *et al.* (1998). Os valores da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foram calculados a partir das variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade do ar e radiação), obtidas pelo INMET (2022).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (9)$$

Em que:

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiração da cultura;

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiração de referência;

K<sub>c</sub>: coeficiente de cultura.

Foi utilizado o valor de K<sub>c</sub> igual a 1 para grama *Zoysia japonica*, de acordo com Madeira *et al.* (2021), uma vez que a espécie utilizada no presente experimento é a espécie tida como referência no modelo de determinação de evapotranspiração. A evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi calculada de acordo com as variáveis climáticas do dia antecedente à irrigação. A partir dessa estimativa, foi calculada a evapotranspiração da cultura pela área total da grama, e a necessidade hídrica diária, sendo a quantidade de água efetivamente aplicada na cultura por dia, e considerando a precipitação diária na lâmina de água disponível (Tabela 5). A irrigação foi realizada de forma manual durante todo o período experimental, tendo início um dia antes

de cada fase da coleta dos dados experimentais, sendo realizada três vezes ao dia, nos horários de 08, 13 e 18 horas.

Tabela 5. Estimativa da quantidade hídrica necessária para a grama *Zoysia japônica* durante o verão em Viçosa-MG, em função da evapotranspiração da cultura (ETc) e da precipitação

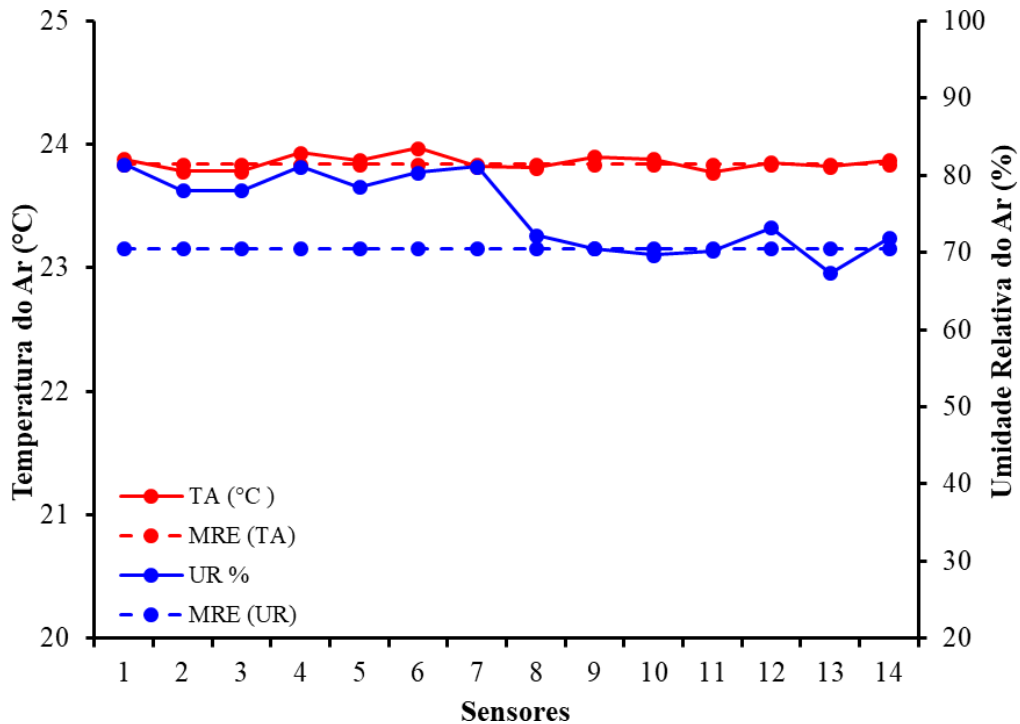
<b>Dia</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>Demanda Hídrica (L.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>
1	4,51	40,59	0,20
2	4,35	39,15	0,00
3	4,23	38,07	0,00
4	4,39	39,51	0,00
5	4,55	40,95	8,40
6	4,46	40,14	0,40
7	4,22	37,98	0,00
8	4,81	43,29	0,00
9	4,53	40,77	0,00
10	4,45	40,05	0,00
11	4,55	40,95	0,00
12	4,50	40,50	0,00
13	4,29	38,61	0,20
14	4,55	40,95	0,20
15	3,29	29,61	1,40
16	4,50	40,50	0,00

Fonte: Autores, com base nos dados do INMET (2022).

### 3.4 Caracterização do ambiente térmico dos protótipos

Primeiramente, antes de cada período experimental, foi realizada a calibração dos sensores digitais, tipo *datalogger*, da marca Onset, modelo HOB0 UX100-03. Para temperatura do ar o sensor opera com faixa de medição -20 °C a +70 °C, precisão de  $\pm 0,21$  °C, resolução de  $\pm 0,024$  °C, e para umidade relativa do ar opera com faixa de medição 15 a 95 %, precisão  $\pm 3,5$  %, resolução de 0,07 %. Os quais foram expostos a um ambiente de condições ambientais controladas, para avaliar com precisão a sua sensibilidade e capacidade de leitura das variáveis: temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%). Para a calibração, foram utilizados 14 sensores, e os testes foram realizados durante uma semana, em câmaras climáticas. Após isso foram calibradas as leituras das variáveis ambientais. Foi, então, determinada a sensibilidade dos sensores a partir dos valores médios obtidos pelos equipamentos tidos como referência, em função do tempo (Figura 4).

Figura 4. Gráfico da curva de calibração dos sensores de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%)



\*TA: Temperatura do ar; UR: Umidade relativa do ar; e MRE: Média de referência.  
Fonte: Autores.

O ambiente interno dos protótipos foi consecutivamente monitorado com aquisição dos valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar. Os dados foram registrados durante 24h/dia a cada 15 minutos, no qual os sensores foram instalados no centro geométrico de protótipo estudado.

Para análise dos tratamentos (tipos de materiais de cobertura e presença e ausência de telhado verde) também foram coletados dados referentes à temperatura superficial interna dos telhados dos protótipos, com um termômetro infravermelho, marca *Fluke*, modelo 62 MAX, com faixa de medição de  $-30\text{ °C}$  a  $+500\text{ °C}$ , precisão de  $\pm 1,5\text{ °C}$  e resolução de  $0,1\text{ °C}$ . A temperatura superficial foi determinada a partir do ponto geométrico interno do telhado, mensurada a uma distância de 0,5 m, com emissividade ajustada conforme com o material de cobertura (Tabela 6). As coletas foram realizadas em intervalos de 3 horas durante 24h/dia, no decorrer do período experimental.

Tabela 6. Valores de emissividade configurados no sensor de temperatura superficial dependendo do tipo de material utilizado na cobertura

Material de Cobertura	Emissividade (ε)
Telha de Cerâmica	0,85 – 0,95
Telha de Fibrocimento	0,92
Telha de Aço Galvalume	0,25
Gramma	0,90

Fonte: Adaptado de Bâeta e Souza (2010).

A caracterização do ambiente externo da área experimental foi realizada a partir da determinação dos valores de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo de todo o período experimental, utilizando os dados a partir do INMET (2022). Foram realizadas análises estatísticas descritivas obtendo-se os valores médios, mínimos e máximos de temperatura e umidade relativa do ar do ambiente externo.

### 3.5 Caracterização dos índices de conforto térmico

Os efeitos dos tratamentos (tipos de materiais de cobertura com e sem a presença de telhado verde) sobre o conforto térmico no interior dos protótipos foram determinados por meio da caracterização dos índices bioclimatológicos, conforme as Equações 10, 11, 12 e 15.

O Índice de Temperatura e Umidade (ITU) foi estimado segundo o modelo desenvolvido por Thom (1959) e adaptado por Mader *et al.* (2006) para utilização de dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar (Equação 10).

$$ITU = 0,8 \times T_{bs} + (UR/100) \times (T_{bs} - 14,4) + 46,4 \quad (10)$$

Em que:

$T_{bs}$ : Temperatura de bulbo seco (°C); e

UR: Umidade relativa do ar (%).

O Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade (ITGU) foi determinado utilizando-se a Equação 11, estabelecida por Buffington *et al.* (1981), sendo determinado a partir dos valores de temperatura de globo negro e temperatura de ponto de orvalho.

$$ITGU = T_{gn} + 0,36 T_{po} + 41,5 \quad (11)$$

Em que:

$T_{gn}$ : Temperatura de globo negro (°C);

$T_{po}$ : Temperatura de ponto de orvalho (°C).

Foi determinado o Índice de Conforto Humano (ICH) desenvolvido por Rosenberg (1983) e calculado pela Equação 12, a partir dos dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão de vapor (Equação 13) e pressão de vapor do ar saturado (Equação 14).

$$ICH = T_a + \frac{5}{9}(e_a - 10) \quad (12)$$

$$e_a = \frac{(e_s \times UR)}{100} \quad (13)$$

$$e_s = 0,611 \times 10^{\left[\frac{7,5 \times T_a}{237,3 + T_a}\right]} \quad (14)$$

Em que:

$T_a$ : Temperatura do ar (°C);

UR: Umidade relativa do ar (%);

$e_a$ : Pressão de vapor (kPa);

$e_s$ : Pressão de vapor do ar saturado (kPa).

A Carga Térmica Radiante (CTR) estabelecida por Kelly; Bond (1958) foi determinada em função das trocas térmicas radiantes do telhado e calculada com a Equação 15 por meio da constante de Stephan-Boltzmann e dos valores de temperatura radiante média (TRM) apresentada na Equação 16.

$$CTR = \sigma TRM^4 \quad (15)$$

Em que:

$\sigma$  - constante de Stephan-Boltzmann, W. (m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>)<sup>-1</sup>; TRM, (K).

$$TRM = 100 \left( 2,51 \sqrt{V} (T_g - T_s) + \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (16)$$

Em que:

V: Velocidade do ar (m.s<sup>-1</sup>);

$T_g$ : temperatura de globo negro (K);

$T_s$ : temperatura de bulbo seco (K).

### 3.6 Análises estatísticas

Todos os dados obtidos foram submetidos à análise de variância através do procedimento gls do software R (R CORE TEAM, 2021), sendo analisados os efeitos do tipo de telha, presença ou ausência de telhado verde e hora de coleta, bem como a interação entre

esses efeitos. O efeito de hora de coleta foi inserido no modelo como medida repetida no tempo, sendo testadas as seguintes estruturas de co(variância): simetria composta, simetria composta heterogênea, autorregressiva de primeira ordem e autorregressiva heterogênea de primeira ordem. A escolha da matriz de covariância se deu pelo menor valor de AIC (Critério de Informação de Akaike), sendo que para todas as análises foi utilizada a matriz autorregressiva heterogênea de primeira ordem. Quando necessário foi realizada a separação das médias através do teste Tukey a 0,05 de probabilidade, e em caso de interação realizou-se o desdobramento das interações.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como foram realizados dois experimentos, com protótipos abertos e fechados, todas as variáveis estudadas em todos os horários analisados são apresentadas separadamente. Além disso, todas as análises estatísticas foram aplicadas separadamente em cada experimento e apresentados os comportamentos de cada variável estudada para as duas tipologias construtivas.

### 4.1 Ambiente externo dos protótipos

Na Tabela 7 constam os resultados da estatística descritiva da caracterização do ambiente externo da área experimental. São apresentados os valores médios, mínimos e máximos de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo dos dois períodos experimentais nas duas tipologias construtivas, em protótipos abertos e fechados.

Tabela 7. Caracterização do ambiente térmico durante o período de realização dos experimentos com os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar no ambiente externo das duas tipologias construtivas testadas, com protótipos abertos e fechados

Protótipos Abertos						
Dia	Temperatura do Ar (°C)			Umidade Relativa (%)		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
1	23,50	18,20	29,60	79,40	55,00	97,00
2	23,70	19,00	29,70	78,30	51,00	97,00
3	23,10	18,40	28,80	79,20	47,00	97,00
4	22,40	17,60	30,40	80,30	48,00	98,00
5	22,80	17,80	27,80	78,20	40,00	98,00
6	21,30	16,20	26,50	75,90	49,00	97,00
7	21,60	16,30	28,70	75,60	40,00	98,00
Protótipos Fechados						
Dia	Temperatura do Ar (°C)			Umidade Relativa (%)		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
1	23,40	18,60	29,50	75,90	49,00	97,00
2	23,00	18,40	29,50	78,20	54,00	97,00
3	23,10	17,60	27,70	77,20	54,00	97,00
4	22,80	18,40	28,90	79,20	50,00	97,00
5	23,70	17,50	29,60	76,80	50,00	98,00
6	26,90	25,80	28,10	55,00	49,00	61,00
7	25,90	23,10	27,80	63,70	54,00	76,00

Fonte: Adaptada do INMET (2022).

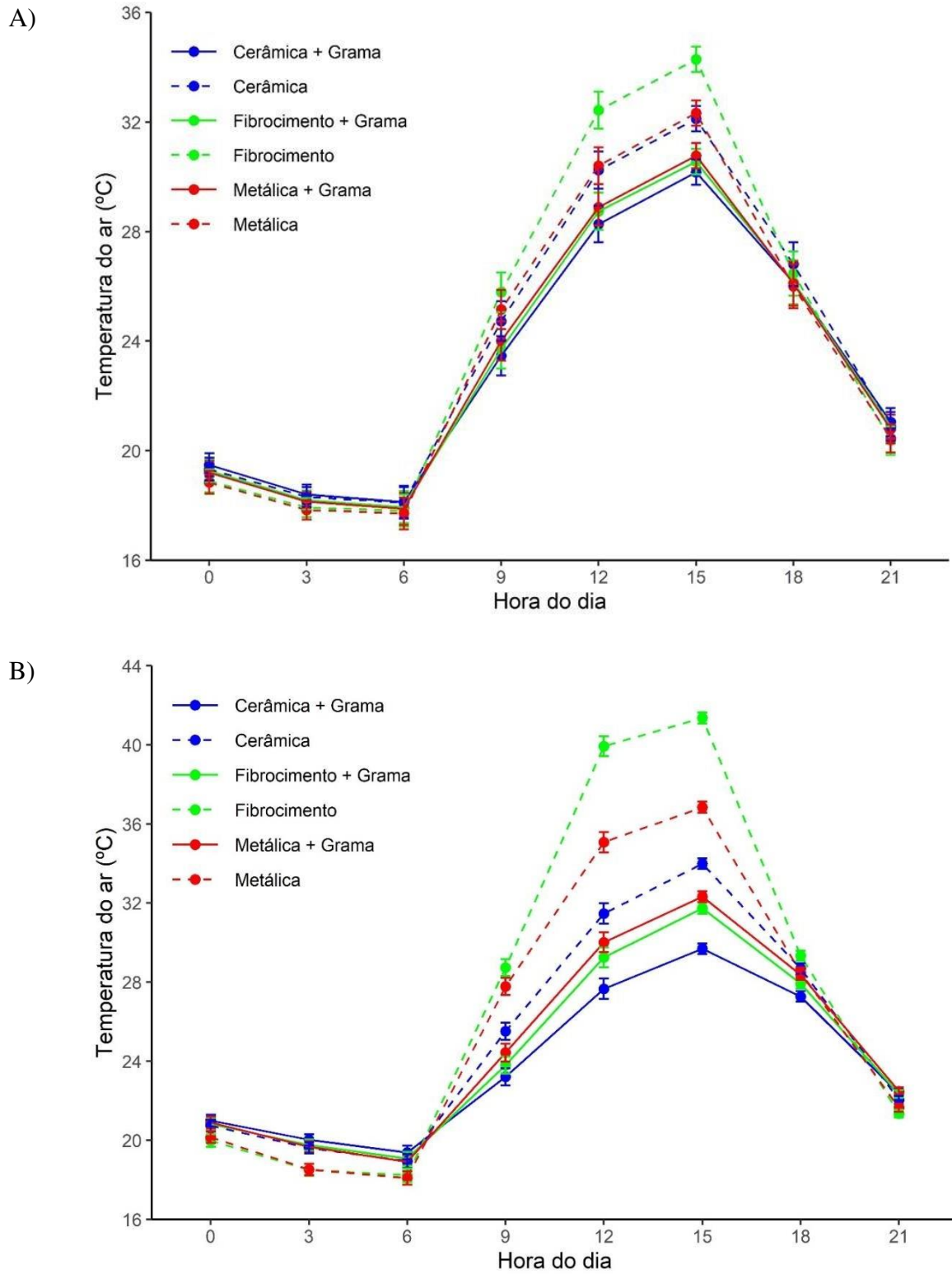
Pelos dados apresentados na Tabela 7, observa-se que não houve diferença significativa entre os valores de temperatura do ar no ambiente externo em ambas as fases experimentais. No entanto, durante a coleta de dados dos protótipos fechados, foi constatado que a umidade relativa do ar do ambiente externo apresentou uma média de variação entre 55,00 e 79,20%, em contraste com o experimento dos protótipos abertos, em que os valores médios da umidade relativa do ar foram consistentemente superiores a 75,00% ao longo dos dias (Tabela 7). Essa condição climática é típica de ocorrência durante o verão, no local do experimento, caracterizado como quente e chuvoso. Esses resultados destacam a importância de adaptar o ambiente térmico das instalações para atender às necessidades dos animais alojados, promovendo o conforto térmico e o bem-estar dos mesmos (TINÔCO, 2001).

## **4.2 Ambiente térmico dos protótipos**

### **4.2.1 *Temperatura do ar***

Pela análise estatística dos dados de temperatura do ar no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ) de interação simples de horário e interação dupla entre presença/ausência do telhado verde e o horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observadas interações ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ) simples, duplas e triplas. Portanto, foi realizado o desdobramento das interações separadamente e analisados todos os efeitos significativos nas horas. Os dados de temperatura do ar no interior dos protótipos são apresentados na Figura 5, sendo os dados do experimento com protótipos abertos referente ao gráfico da Figura 5A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 5B.

Figura 5. Valores de temperatura do ar no interior dos protótipos abertos (A) e fechados (B) nos diferentes horários analisados para os diferentes tipos de telhas e para presença/ausência do telhado verde



Fonte: Autores.

Pelos dados de temperatura do ar obtidos no experimento com protótipos abertos (Figura 5A), analisando os três tipos de telhas foi observada diferença estatística significativa ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ) entre as telhas, somente às 15:00 horas, sendo o maior valor de temperatura do ar observado no protótipo com telha de fibrocimento, seguido do protótipo com telha metálica e por último o protótipo com telha cerâmica. Tal situação já era esperada e deve-se principalmente ao fato de que a telha de fibrocimento apresenta a menor inércia térmica, em relação às telhas de cerâmica e metálica (VERBEKE; AUDENAERT, 2018). Além disso, o processo de envelhecimento da telha de fibrocimento causa um aumento na absorvância do material, devido principalmente ao seu escurecimento (Figura 3), e conseqüentemente aumento da capacidade de ganho de calor pela sua superfície. Com isso, o seu coeficiente de absorção em presença de radiação solar pode aumentar de 0,45 em telha nova para até 0,80 em telha envelhecida (GONÇALVES *et al.*, 2022; ROBERTO RIVERO, 1986).

Analisando o desdobramento dos dados de temperatura do ar nos protótipos abertos em relação a presença e ausência do telhado verde nos diferentes horários foram observadas diferenças estatísticas significativas nos horários de 9:00, 12:00 e 15:00 horas. Nesses horários, foram observados os maiores valores de temperatura do ar nos protótipos sem a presença do telhado verde (Figura 5A). Por esse resultado, fica evidente o efeito significativo do uso do telhado verde sobre o ambiente térmico do interior do protótipo principalmente nos horários de ocorrência de maiores valores de temperatura do ar, que normalmente demandam maior uso de energia para promover o acondicionamento térmico do ambiente de acordo com as exigências térmicas dos animais. Pelos dados e pelo gráfico (Figura 5A) foi observada uma redução nos valores da temperatura do ar dos protótipos com telhado verde em relação aos protótipos sem telhado verde, nos horários mais quentes do dia, chegando a uma redução média de 2,4°C às 12:00 e às 15:00 horas.

Na condição de protótipos fechados (Figura 5B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ) nos valores de temperatura do ar no interior dos protótipos entre praticamente todas as variáveis analisadas. Foram observadas interações simples: entre cada uma das variáveis; Interações duplas: entre tipo de telha e hora, presença/ausência do telhado verde e hora, tipo de telha e presença/ausência do telhado verde; Além de interação tripla: entre tipo de telha, presença/ausência de telhado verde e hora. Foram feitos os desdobramentos das interações duplas e tripla. No desdobramento da interação tripla não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de temperatura do ar dos protótipos fechados às 00:00 e às 06:00 horas. Nos outros horários, principalmente nos horários mais quentes do dia, observou-se que a presença do telhado verde foi capaz de proporcionar redução

significativa dos valores médios de temperatura do ar, chegando às 12:00 horas nas reduções mais expressivas, de 10,6 °C nos protótipos com telhas de fibrocimento, 5,1 °C nos protótipos com telhas metálicas e de 3,8 °C nos protótipos com telhas de cerâmica. Apesar de não terem sido observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de temperatura do ar nos protótipos fechados às 00:00 e 06:00 horas, observa-se que o telhado verde proporcionou um maior amortecimento dos valores de temperatura do ar nos horários de ocorrência de menores valores de temperatura do ar, entre 21:00 e 06:00 horas, sendo que às 03:00 horas houve diferença estatística significativa e foram observados os maiores efeitos nos protótipos com telhas metálicas. Além disso, percebe-se que todas essas diferenças se mostraram muito mais evidentes no experimento com os protótipos fechados (Figura 5B) em relação aos protótipos abertos (Figura 5A).

Resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo para temperatura do ar em protótipos com telha de fibrocimento nos horários mais quentes do dia (Figura 5A), foram observados por Barnabé *et al.* (2014), em estudo na região Nordeste do Brasil, onde foram encontrados valores máximos de temperatura do ar em torno de 31,8 °C em instalações para bezerros com telha de fibrocimento. Oliveira *et al.* (2023) avaliaram telhas de fibrocimento em modelos reduzidos de aviários e observaram valores de temperatura do ar (33,8 °C e 33,2 °C) próximos aos estimados no presente estudo, nos momentos mais quentes do dia. Os autores também observaram que as telhas de cerâmica apresentaram melhor interceptação da radiação solar (valores de 30,6 °C a 31,6 °C), em comparação às telhas de fibrocimento e metálica sem proteção extra sobre o telhado. As observações realizadas por Oliveira *et al.* (2023) destacam que a telha de cerâmica tem melhor eficiência como barreira para as altas temperaturas sobre a cobertura das instalações de produção animal. Os dados obtidos por estes autores estão de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, e corroboram pela eficiência no isolamento térmico da telha de cerâmica, uma vez que, nos horários mais quentes do dia, os menores valores de temperatura do ar foram observados nos protótipos com esse tipo de telha, tanto em protótipos abertos quanto fechados e sem o telhado verde (Figura 5).

Resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo para a temperatura do ar em protótipo com fechamento lateral com telha cerâmica e com telhado verde ( $27,7 \pm 0,5$  °C), mensurados às 12:00 horas (Figura 5B), foram observados por Carneiro *et al.* (2015). Os autores avaliaram o uso do telhado verde no Estado de Pernambuco, em protótipos de galpões avícolas, utilizando grama esmeralda (*Zoysia japonica*) e amendoim (*Arachis repens*), e observaram valores médios de temperatura do ar no interior dos protótipos em torno de 27,7 °C para ambas as espécies vegetais estudadas. No presente estudo, a temperatura do ar variou entre  $18,0 \pm 0,3$

°C e  $30,5 \pm 0,2$  °C ao longo do período estudado, nos protótipos abertos com presença do telhado verde (Figura 5A), possibilitando um ambiente adequado para aves adultas, que é de 18,0 a 28,0 °C, em condição de verão e com ventilação natural (BAÊTA; SOUZA, 2010). Porém, as condições ideais de conforto térmico animal variam em função da idade do animal. Entre a terceira e a quarta semanas do ciclo produtivo das aves, a temperatura do ar para o conforto destes animais varia entre 23,0 e 29,0 °C (ABREU; ABREU, 2011; CÂNDIDO et al., 2016). Assim, o telhado verde, nessas fases, poderia contribuir como uma técnica de construção alternativa para promover conforto térmico na produção animal, promovendo uma redução nos valores de temperatura do ar do interior das instalações agrícolas.

O aumento da temperatura do ar no interior dos protótipos com fechamento lateral em relação ao protótipo aberto (Figura 5B) ocorre devido às trocas de ar entre o ambiente interno e externo serem reduzidas, fazendo com que a energia promovida pela radiação solar incidente aumente a temperatura da massa de ar do interior do protótipo, e pela redução das trocas de ar devido ao fechamento lateral, essa massa de ar quente permanece no interior do protótipo.

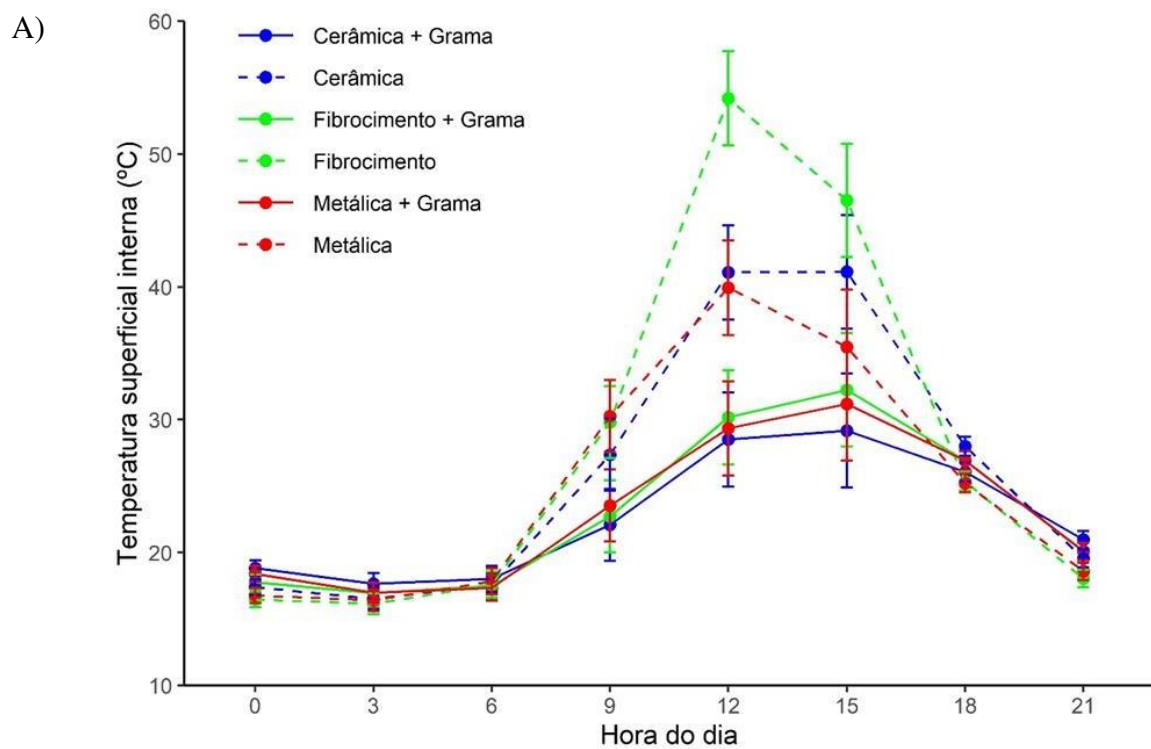
No entanto, ao utilizar o telhado verde, é possível reduzir significativamente a temperatura do ar do ambiente interno (FAGGIANELLI *et al.*, 2014), uma vez que a proteção verde reduz o ganho de temperatura ao longo das horas de incidência solar. ABREU; ABREU (2011) estabeleceram faixas representativas de conforto térmico para a criação de aves durante o seu ciclo reprodutivo, sendo na segunda semana de 29,0 a 32,0 °C e na quinta semana de 20,0 a 23,0 °C. Esses valores encontram-se nas faixas de valores encontrados no presente estudo, sendo que os menores valores foram observados nos protótipos com presença de telhado verde e com telhas cerâmicas. LA ROCHE; YEOM; PONCE, 2020, estudaram o conforto térmico proporcionado pelo telhado verde em habitações humanas. Esses autores classificaram a variação de temperatura em horas frias, quando ocorrem temperaturas abaixo de 21,1 °C, como confortável, quando os valores estão entre 21,1 °C e 25,5 °C, e como quentes, quando os valores ultrapassam 25,5 °C.

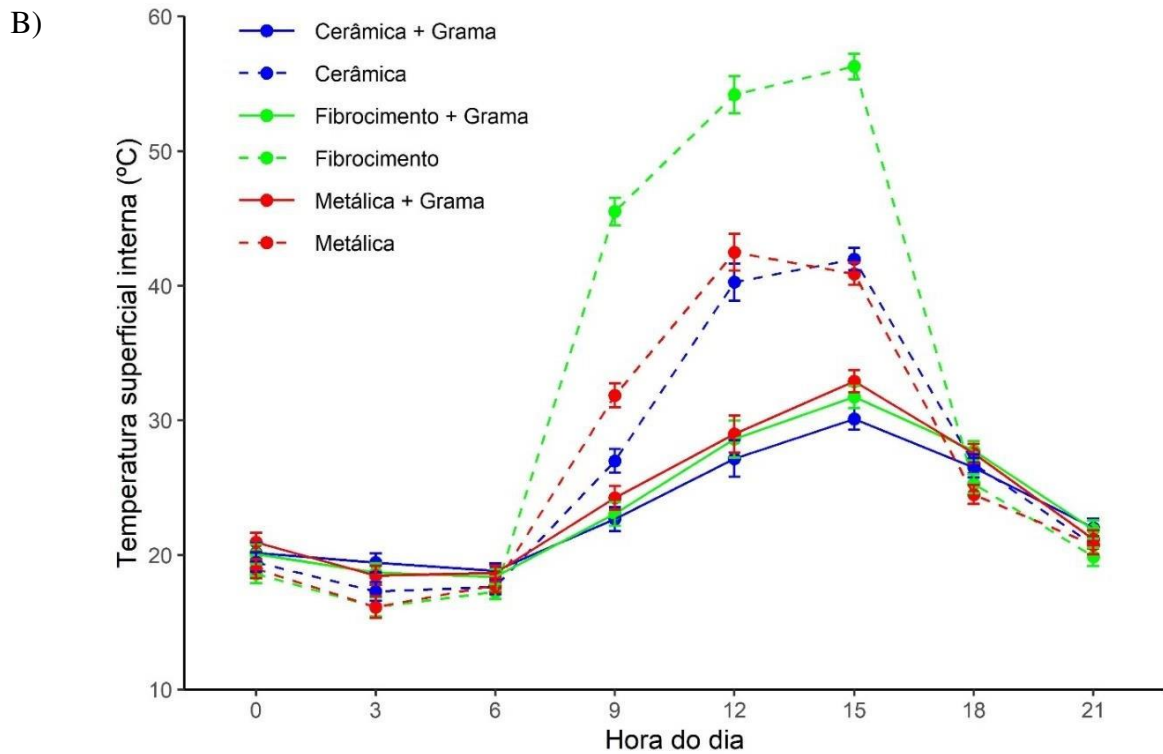
#### ***4.2.2 Temperatura superficial interna da cobertura***

Pela análise estatística dos dados de temperatura superficial interna da cobertura no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito significativo de interação (*p*-valor < 0,0001) simples de horário e de presença/ausência do telhado verde; e interação dupla entre presença/ausência do telhado verde e o horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observados efeitos significativos (*p*-valor < 0,0001) de interações simples,

duplas e triplas entre todas as variáveis analisadas. Portanto, foi realizado o desdobramento de todas as interações separadamente e analisados todos os efeitos significativos nas horas. Os dados de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos são apresentados na Figura 6, sendo os dados do experimento com protótipos abertos no gráfico da Figura 6A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 6B.

Figura 6. Valores de temperatura superficial interna das coberturas dos protótipos abertos (A) e fechados (B) n os diferentes horários considerando os diferentes tipos de telhas e presença/ausência de telhado verde





Fonte: Autores.

Pelos dados de temperatura superficial interna da cobertura obtidos no experimento com protótipos abertos (Figura 6A), desdobrando as interações foi observada diferença estatística significativa ( $p$ -valor < 0,0001) entre os dados, somente às 15:00 e 21:00 horas. Entretanto o maior valor de temperatura superficial interna da cobertura foi observado às 12:00 horas no protótipo sem o telhado verde e com telha de fibrocimento. Nesse momento, a presença do telhado verde foi capaz de reduzir a temperatura superficial interna da cobertura, em torno de 24,0 °C na telha de fibrocimento, 12,6 °C na telha cerâmica e 10,5 °C na telha metálica. Com isso, observa-se que o telhado verde é capaz de promover reduções significativas na carga térmica do interior das instalações e conseqüentemente, pode promover um ambiente térmico mais adequado para os animais de produção. Resultados similares aos encontrados no presente estudo foram reportados por Carneiro *et al.* (2015), que avaliaram o telhado verde e encontraram valores de temperatura superficial de 34,2 °C com a utilização da grama amendoim (*Arachis repens*) e de 36,7 °C utilizando grama esmeralda (*Zoysia japonica*), certificando a eficiência térmica do efeito do telhado verde nas instalações agrícolas.

Na condição de protótipos fechados (Figura 6B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor < 0,0001) nos valores de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos em praticamente todas as variáveis analisadas. Foram observadas interações simples: entre cada uma das variáveis; Interações duplas: entre tipo de telha e hora, presença/ausência do telhado

verde e hora, tipo de telha e presença/ausência do telhado verde; Além de interação tripla: entre tipo de telha, presença/ausência de telhado verde e hora. Foram feitos os desdobramentos das interações duplas e tripla. Não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos fechados às 00:00, 06:00 e 21:00 horas. Nos outros horários, principalmente nos horários mais quentes do dia, entre as 9:00 e as 15:00 horas, observou-se que a presença do telhado verde foi capaz de proporcionar redução significativa dos valores médios de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos, chegando às 15:00 horas nas reduções mais expressivas, de 24,6 °C nos protótipos com telhas de fibrocimento, 8,0 °C nos protótipos com telhas metálicas e de 11,9 °C nos protótipos com telhas de cerâmica. Apesar de não terem sido observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos fechados às 21:00, 00:00 e 06:00 horas, observa-se pelos dados e pelo gráfico (Figura 6B) que o telhado verde proporcionou um maior amortecimento dos valores nos horários mais frios, entre 21:00 e 06:00 horas, sendo que às 03:00 horas houve diferença estatística significativa entre os valores de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos com e sem o telhado verde. Tal situação refere-se ao tempo gasto da transferência de calor da superfície externa da cobertura para a interna, ocasionar mudanças de temperatura no período posterior, ou seja, à noite, promovendo estabilidade natural da temperatura superficial interna dos protótipos. Além disso, percebe-se que todas essas diferenças, entre tipos de telhas e telhado verde, se mostraram muito mais evidentes no experimento com os protótipos fechados (Figura 6B) em relação aos protótipos abertos (Figura 6A).

O aumento de temperatura superficial interna da cobertura dos protótipos com telha de fibrocimento sem o telhado verde ocorreu provavelmente devido ao escurecimento do material (Figura 3), que, nessas condições, absorvem uma maior quantidade de calor do ambiente externo (ROBERTO RIVERO, 1986). Sampaio *et al.* (2011) avaliaram os materiais de cobertura no período do verão, no Sul do Brasil, e observaram que a telha de fibrocimento apresenta valores inferiores aos resultados encontrados no presente trabalho sem o telhado verde, provavelmente devido às condições climáticas e o estado de conservação da telha de fibrocimento.

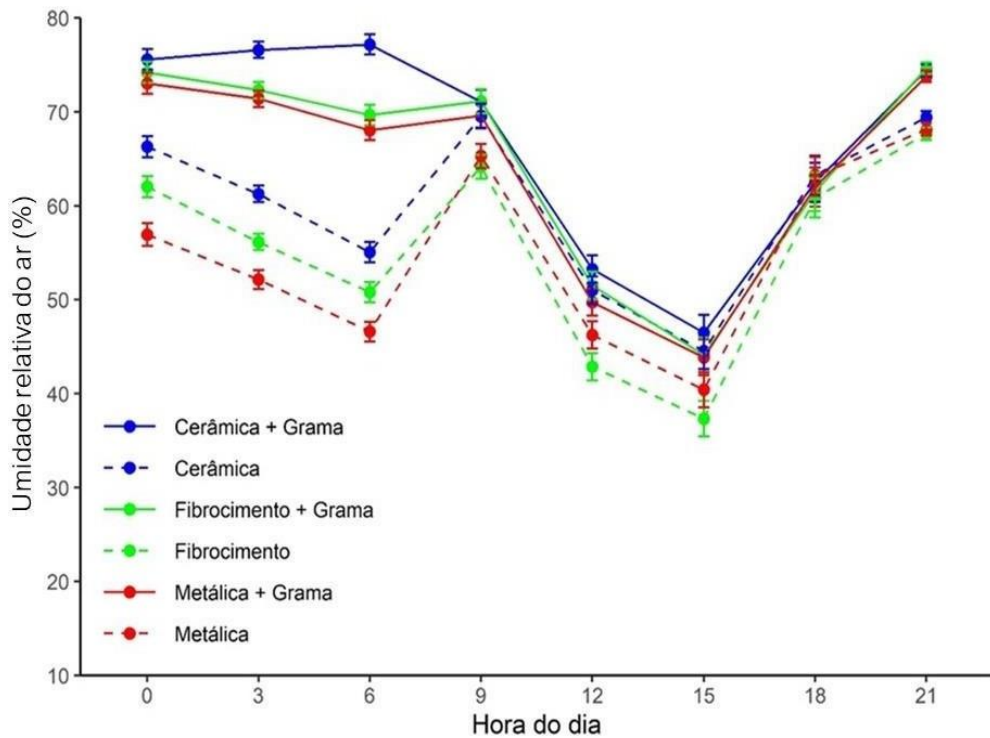
#### **4.2.3 Umidade relativa do ar**

Pela análise estatística dos dados de umidade relativa do ar no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito significativo ( $p$ -valor < 0,0001) de interação

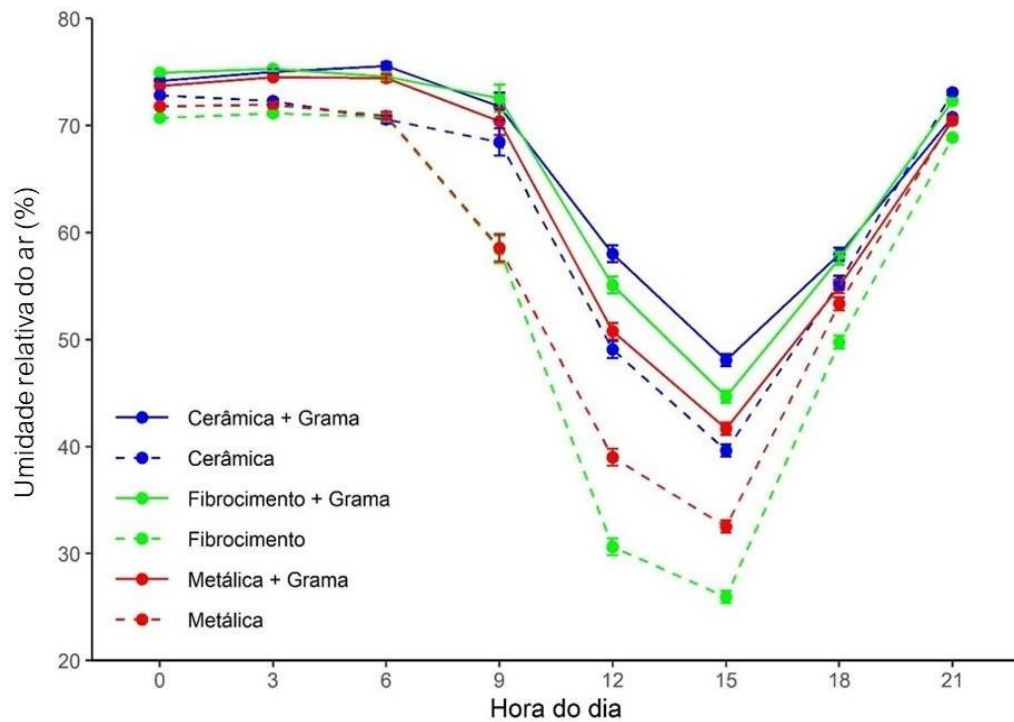
simples de horário, de tipo de telha e de presença/ausência do telhado verde; interação dupla entre presença/ausência do telhado verde e horário e tipo de telha e horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observados efeitos significativos ( $p\text{-valor} < 0,0001$ ) de interações simples, duplas e triplas entre todas as variáveis analisadas. Portanto, foi realizado o desdobramento das interações separadamente e analisados todos os efeitos significativos nas horas. Os dados de umidade relativa do ar dos protótipos são apresentados na Figura 7, sendo os dados do experimento com protótipos abertos referente ao gráfico da Figura 7A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 7B.

Figura 7. Umidade relativa do ar no interior dos protótipos abertos (A) e fechados (B) nos diferentes horários considerando os diferentes tipos de telhas e presença/ausência de telhado verde

A)



B)



Fonte: Autores.

Pelos dados de umidade relativa do ar obtidos no experimento com protótipos abertos (Figura 7A), analisando os três tipos de telhas só não foi observada diferença estatística significativa ( $p\text{-valor} < 0,0001$ ) às 09:00, 18:00 e 21:00 horas. Em todos os outros horários foram observadas diferenças significativas, sendo os maiores valores de umidade relativa do ar observados no protótipo com telha cerâmica nos horários mais frios do dia e os menores valores de umidade relativa do ar encontrados nos protótipos com telhas de fibrocimento nos horários mais quentes do dia.

Analisando o desdobramento dos dados de umidade relativa do ar nos protótipos abertos em relação a presença e ausência do telhado verde nos diferentes horários foram observadas diferenças estatísticas significativas em praticamente todos os horários, com exceção das 18 horas. Os maiores valores de umidade relativa do ar foram encontrados nos protótipos com a presença do telhado verde, independentemente do tipo de telha, mantendo-se acima de 70,00 % (Figura 7A) entre 21:00, e 06:00 horas, quando a temperatura do ar é menor (Figura 5A). Pelos dados e pelo gráfico (Figura 7A) foram observadas diferença expressivas entre os valores da umidade relativa do ar dos protótipos com e sem o telhado verde, nos horários mais frios do dia, chegando a uma diferença média de 20,8 % às 06:00 horas. Esse aumento dos valores de umidade relativa do ar no interior dos protótipos com o telhado verde e laterais abertas provavelmente ocorreu devido à elevada umidade relativa do ar no ambiente externo (Tabela

7) e pela retenção da água de irrigação no substrato do telhado verde, ao longo do dia. Já os baixos valores de umidade relativa do ar, às 12:00 e 15:00 horas são provavelmente explicados pela ocorrência de elevados valores de temperaturas do ar nesse período do dia, uma vez que a umidade relativa do ar e a temperatura do ar são inversamente proporcionais. A variação da umidade relativa do ar foi de 40,80 a 74,30 % no presente estudo (Figura 7A). Estes valores são inferiores aos encontrados por Santos *et al.* (2014), que verificaram valores médios mensais da umidade relativa do ar superiores a 83,00%, em ambientes para produção de aves, no estado de Sergipe. O estudo foi realizado em região caracterizada como litorânea (úmida), agreste (subúmida) e semiárida, uma região de umidade relativa do ar média inferior àquela da área do experimento.

Na condição de protótipos fechados (Figura 7B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor < 0,0001) nos valores de umidade relativa do ar no interior dos protótipos em todas as variáveis analisadas, sendo observadas interações simples, duplas e tripla e feitos todos os desdobramentos das interações. Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de umidade relativa do ar dos protótipos fechados em todos os horários analisados, principalmente nos horários mais quentes do dia, observou-se que a presença do telhado verde foi capaz de proporcionar aumento significativo dos valores médios de umidade relativa do ar, chegando às 15:00 horas nas alterações mais expressivas, de 18,73 % nos protótipos com telhas de fibrocimento, 9,16 % nos protótipos com telhas metálicas e de 8,45 % nos protótipos com telhas de cerâmica. Essa diferença pode ser decorrente ao fechamento lateral dos protótipos, o que provoca uma redução da ventilação natural no interior do ambiente, afetando assim as trocas de calor. Os menores valores de umidade relativa do ar foram observados nos protótipos com a telha de fibrocimento no momento de ocorrência dos maiores valores de temperatura do ar entre às 12:00 e às 15:00 horas (Figura 7B). Tal baixa umidade relativa do ar deve-se aos elevados valores de temperatura do ar (STEADMAN, 1979). A presença do telhado verde retém maior teor de umidade no substrato e pode, conseqüentemente, ter promovido o aumento da umidade relativa do ar no período mais quente do dia.

Nos horários mais frios, também foram observados maiores valores de umidade relativa do ar nos protótipos com presença do telhado verde. Além disso, percebe-se que todas essas diferenças se mostraram mais evidentes no experimento com os protótipos fechados (Figura 7B) em relação aos protótipos abertos (Figura 7A). Nos protótipos com as laterais fechadas, a umidade relativa do ar também se manteve superior a 70,00 % em determinados momentos do dia, em todos os tipos de telhas com e sem a presença do telhado verde.

Os valores de umidade relativa do ar nos protótipos com telha cerâmica com e sem presença do telhado verde se sobressaem dos demais (Figura 7). A telha cerâmica absorve naturalmente uma quantidade significativa de água do ambiente, uma vez que é constituída de material poroso, mantendo assim o desempenho térmico natural, ou seja, dispendendo maior tempo na transmissão de calor para o ambiente (BUENO, 1994). Os dados obtidos no presente estudo demonstram que, quando associada com o telhado verde, a telha de cerâmica, participa de forma importante na manutenção da umidade relativa do ar (Figura 7). A associação entre telha de cerâmica e telhado verde pode ser adequada para regiões de clima quente e seco, auxiliando assim o manejo ambiental na produção animal.

A diferença entre os valores médios da umidade relativa do ar para os protótipos abertos e fechados, ocorre provavelmente em função da redução da ventilação do ambiente interno e o comportamento da velocidade do ar no ambiente externo dos protótipos, retirando calor pela superfície das telhas. Resultados semelhantes aos do presente estudo foram reportados por Bollman *et al.* (2021). Os autores verificaram alteração no comportamento da umidade relativa do ar a partir da retenção da água no substrato do telhado verde, ou seja, uma das possíveis causas do aumento da umidade relativa, causando uma redução da temperatura no ambiente interno do edifício. Apesar da variação da umidade relativa do ar encontrada no ambiente interno com e sem o fechamento lateral nos protótipos com o telhado verde (Figura 7), observam-se valores de umidade relativa do ar dentro da faixa considerada propícia para a produção de aves, que é de 40,00 % a 70,00 %, segundo Tinôco (2001) e Ferreira (2005). Bollman *et al.* (2021), também utilizando telhado verde, observaram resultados da umidade relativa do ar semelhantes aos encontrados no presente estudo (Figura 7). Os autores avaliaram os efeitos do sombreamento refletivo artificial sobre o regime da umidade relativa do ar a partir do telhado verde, em Corvalli/EUA, em sistema de bandeja, com médias de 51,60 %, durante o dia, e 72,70 %, durante a noite.

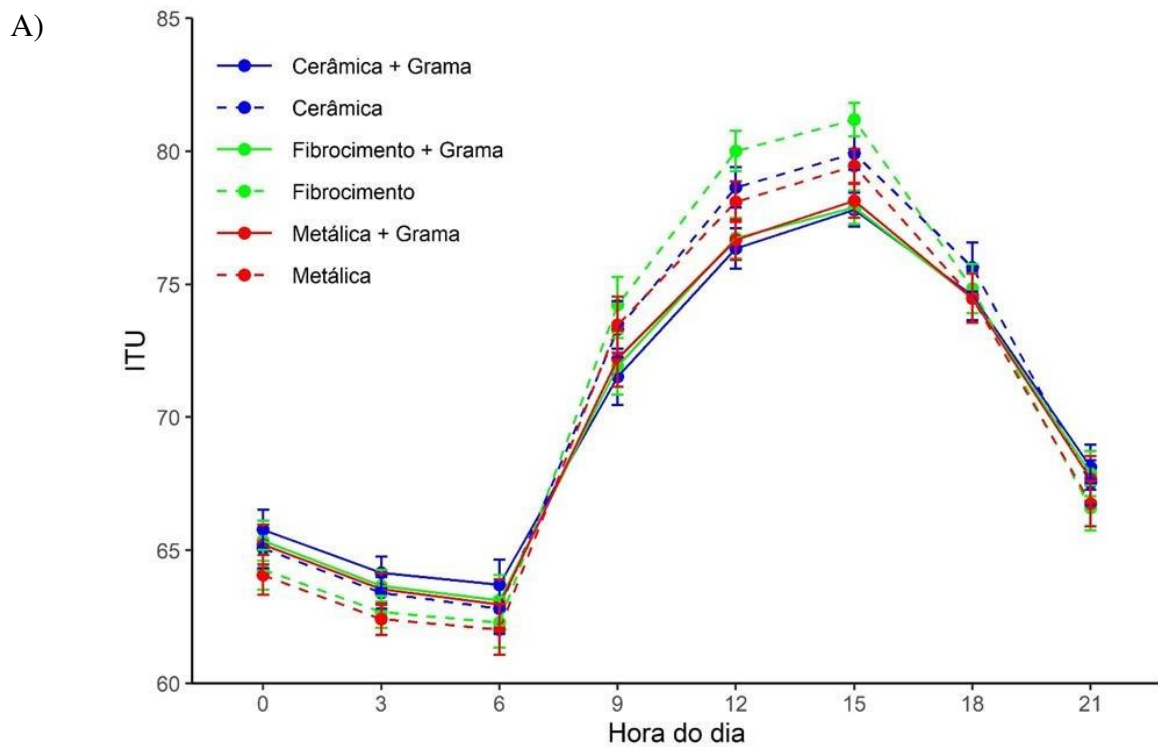
### **4.3 Conforto térmico dos protótipos**

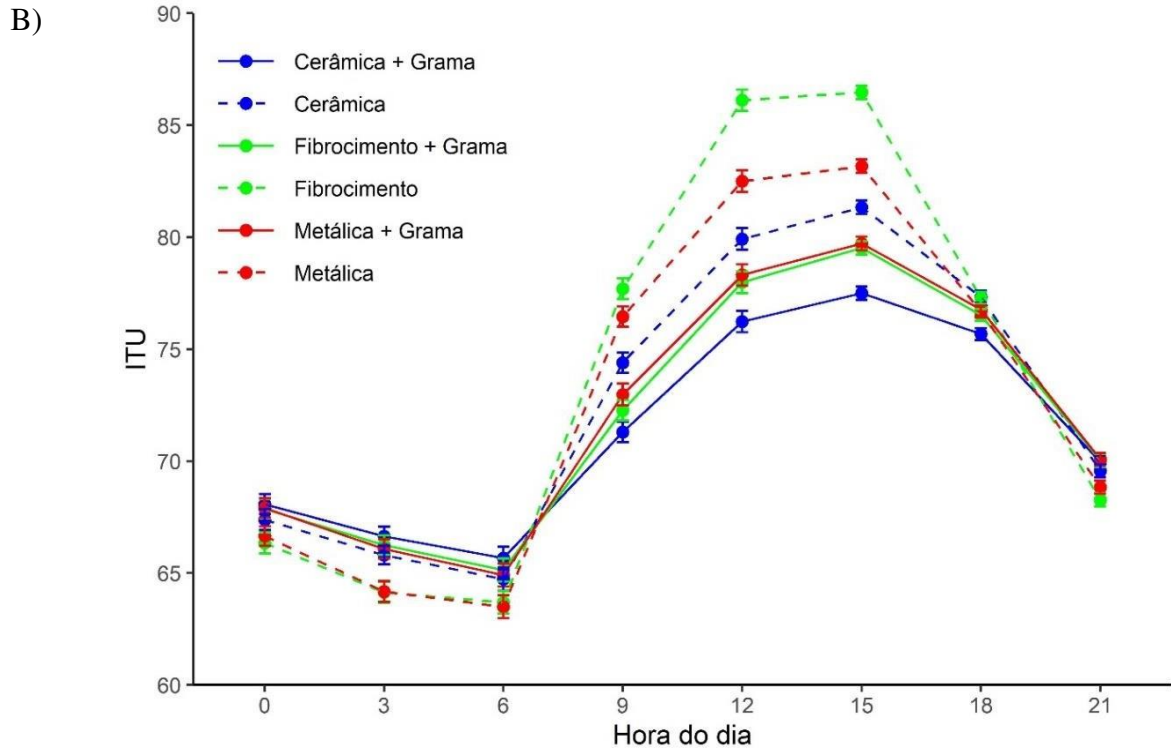
#### **4.3.1 Índice de Temperatura e Umidade**

Pela análise estatística dos dados referentes ao Índice de Temperatura e Umidade (ITU) no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito significativo ( $p$ -valor < 0,0001) de interação simples de horário e interação dupla entre presença/ausência do telhado

verde e o horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observados efeitos significativos ( $p\text{-valor} < 0,0001$ ) de interações simples, duplas e triplas entre praticamente todas as variáveis analisadas. Portanto, foi realizado o desdobramento das interações separadamente e analisados todos os efeitos nas horas. Os dados de ITU dos protótipos são apresentados na Figura 8, sendo os dados do experimento com protótipos abertos referente ao gráfico da Figura 8A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 8B.

Figura 8. Índice de Temperatura e Umidade (ITU) em protótipos abertos (A) e fechados (B) nos diferentes horários considerando os diferentes tipos de telhas e presença/ausência de telhado verde





Fonte: Autores.

Analisando o desdobramento dos dados de ITU nos protótipos abertos em relação a presença e ausência do telhado verde nos diferentes horários foram observadas diferenças estatísticas significativas nos horários de 9:00, 12:00 e 15:00 horas. Nesses horários, foram observados os maiores valores de ITU nos protótipos sem a presença do telhado verde (Figura 8A). Isso ocorre com os três tipos de telhas analisadas, mas principalmente nos protótipos com telha de fibrocimento, nos horários de ocorrência de maiores valores de temperatura do ar, entre 09:00 e 15:00 horas. Independentemente do tipo de telha, ocorreu uma variação de 2,3 no ITU às 15:00 horas entre os protótipos com a presença do telhado verde e sem o telhado verde. Em contrapartida, no período noturno, apesar da diferença não ser estatisticamente significativa, observa-se maiores valores médios do ITU nos protótipos com o telhado verde em relação aos protótipos sem o telhado verde. Segundo os autores Silva *et al.* (2004), a faixa ideal de ITU para aves na primeira semana de vida é de 72,00 a 80,00. Os valores médios do ITU dos protótipos com a presença do telhado verde obtidos nesse estudo garantem condições de conforto térmico, não apenas para os animais na primeira semana de vida, mas também durante todo o ciclo produtivo. Sem presença do telhado verde, o ITU no interior dos protótipos no presente estudo aproximou-se do limite superior da faixa ideal, no protótipo de telha de fibrocimento apresenta uma pequena elevação em relação à faixa ideal para a produção de frangos de corte.

Na condição de protótipos fechados (Figura 8B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor < 0,0001) nos valores de ITU dos protótipos entre praticamente todas as variáveis analisadas. Foram observadas interações simples: entre cada uma das variáveis; Interações duplas: entre tipo de telha e hora e presença/ausência do telhado verde e hora; Além de interação tripla: entre tipo de telha, presença/ausência de telhado verde e hora. Não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de ITU dos protótipos fechados somente às 00:00 horas. Nos outros horários, principalmente nos horários mais quentes do dia, observou-se que a presença do telhado verde foi capaz de proporcionar redução significativa dos valores médios de ITU, chegando às 15:00 horas nas reduções mais expressivas, de 7,0 nos protótipos com telhas de fibrocimento, 3,8 nos protótipos com telhas de cerâmica e 3,5 nos protótipos com telhas metálicas. Observa-se que o telhado verde proporcionou um maior amortecimento dos valores de ITU nos horários de ocorrência de menores valores de temperatura do ar, sendo que às 06:00 horas houve diferença estatística significativa e foram observados os maiores efeitos nos protótipos com telhas metálicas. Além disso, percebe-se que todas essas diferenças se mostraram muito mais evidentes no experimento com os protótipos fechados (Figura 8B) em relação aos protótipos abertos (Figura 8A).

Observa-se que nos protótipos fechados e sem a presença do telhado verde ocorreram os maiores valores médios do ITU nos momentos mais quentes do dia entre 12:00 e 15:00 horas, principalmente nos protótipos com telha de fibrocimento e metálica. Esse aumento nos valores do ITU provavelmente ocorreu devido ao tempo de uso e das propriedades térmicas das telhas, de modo a influenciar a quantidade de calor transmitido através do material de construção. Já os protótipos com a presença do telhado verde apresentaram menores valores do ITU, sobretudo na telha cerâmica. Os valores de ITU encontrado no presente estudo se assemelham aos valores utilizados na classificação de ITU proposta por Silva *et al.* (2004) para a primeira semana de vida das aves, de 72,40 a 80,00. Então, observa-se que o uso da telha cerâmica associada com o telhado verde pode promover melhor ITU e conseqüentemente, maior conforto térmico para o ambiente interno dos protótipos.

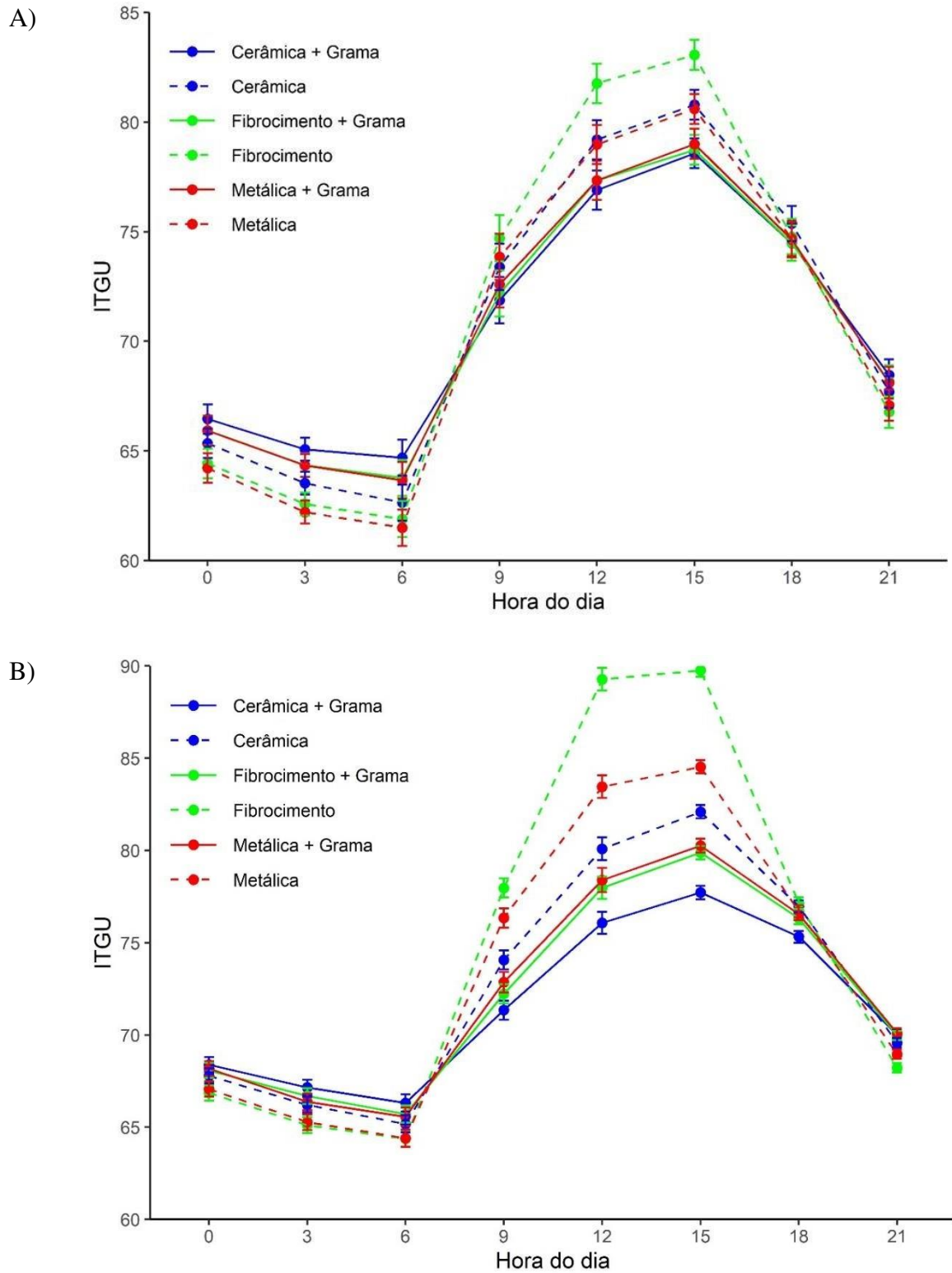
Passini *et al.* (2013) encontraram valores médios do ITU semelhantes aos encontrados do presente estudo (Figura 8), sendo o valor de ITU médio de 77,00, em instalação para avicultura de corte utilizando pintura reflexiva branca na face externa do telhado associada a ventilação artificial. O ambiente dos protótipos com valores médios de ITU encontrados no presente estudo também poderia ser considerado adequado para produção de bovinos leiteiros, pois o ITU no intervalo de 72 a 79 classifica o ambiente de produção animal como confortável a moderadamente adequado (ARMSTRONG, 1994). Então, compreende-se que o telhado verde

é eficaz como técnica construtiva alternativa às técnicas convencionais para as construções rurais, podendo promover melhor condição térmica do ambiente de produção animal. Entretanto, Carneiro *et al.* (2015), em estudo no estado de Pernambuco com telhado verde em modelos reduzidos de instalações zootécnicas, observaram valores médios do ITU em torno de 26 para grama amendoim (*Arachis repens*) e grama esmeralda (*Zoysia japônica*), valores estes diferentes dos resultados encontrados no presente estudo, porém essa diferença pode ser atribuída aos diferentes microclimas das regiões estudadas.

#### **4.3.2 Índice de Temperatura de Globo e Umidade**

Pela análise estatística dos dados referentes ao Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU) no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito significativo ( $p\text{-valor} < 0,0001$ ) de interação simples de horário e interação dupla entre presença/ausência do telhado verde e o horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observados efeitos significativos ( $p\text{-valor} < 0,0001$ ) de interações simples de horário, dupla entre tipo de telha e horário e entre presença/ausência do telhado verde e o horário e interação tripla entre horário, tipo de telha e presença/ausência de telhado verde. Portanto, foi realizado o desdobramento das interações separadamente e analisados todos os efeitos nas horas. Os dados de ITGU dos protótipos são apresentados na Figura 9, sendo os dados do experimento com protótipos abertos referente ao gráfico da Figura 9A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 9B.

Figura 9. Índice de temperatura de globo e umidade (ITGU) em protótipos abertos (A) e fechados (B) nos diferentes horários considerando os diferentes tipos de telhas e presença/ausência de telhado verde



Analisando o desdobramento dos dados de ITGU nos protótipos abertos em relação a presença e ausência do telhado verde nos diferentes horários só não foram observadas diferenças estatísticas significativas às 18:00 e às 21:00 horas. Os valores médios do ITGU nos protótipos abertos sem a presença do telhado verde (Figura 9A) são maiores em relação àqueles com o telhado verde, nos horários mais quentes do dia, os maiores valores de ITGU ocorreram no protótipo com telhas de fibrocimento. Já no período noturno, a telha de cerâmica com a cobertura verde apresentou maior capacidade de isolamento térmico do ambiente interno, mantendo o valor médio do ITGU acima dos demais tratamentos (Figura 9A). É notório que a utilização do telhado verde influencia o comportamento do ITGU dos protótipos, principalmente nos horários mais quentes do dia, sendo os valores médios do ITGU nos protótipos com o telhado verde  $78,80 \pm 0,40$  às 15:00 horas, valor esse dentro da faixa estabelecida como de conforto térmico para as aves de corte entre 68 e 8 (OLIVEIRA, RITA FLÁVIA MIRANDA *et al.*, 2006) 1. Desse modo, os dados obtidos no presente estudo confirmam que o telhado verde pode proporcionar um ambiente térmico mais adequado termicamente para a produção animal, especialmente para frango de corte. Os valores médios do ITGU nos protótipos com telhado verde obtidos no presente estudo às 12:00 horas (Figura 9A), são semelhantes aos valores médios do ITGU reportados por Passini *et al.* (2013). Esses autores utilizaram pintura reflexiva branca em combinação com a ventilação artificial em instalação para frango de corte na análise do conforto térmico.

Nos protótipos fechados (Figura 9B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor < 0,0001) nos valores de ITGU dos protótipos entre praticamente todas as variáveis analisadas. Foram observadas interações simples: entre os horários; Interações duplas: entre tipo de telha e hora e entre presença/ausência do telhado verde e hora; Além de interação tripla: entre tipo de telha, presença/ausência de telhado verde e hora. Não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os dados de ITGU dos protótipos fechados somente às 00:00 horas. Nos outros horários, principalmente nos horários mais quentes do dia, observou-se que a presença do telhado verde foi capaz de proporcionar redução significativa dos valores médios de ITGU, chegando às 15:00 horas nas reduções mais expressivas, de 9,9 nos protótipos com telhas de fibrocimento, 4,4 nos protótipos com telhas de cerâmica e 4,3 nos protótipos com telhas metálicas. No horário mais quente o maior valor de ITGU ocorreu no protótipo com telha de fibrocimento e sem o telhado verde enquanto o menor valor ocorreu no protótipo com telha de cerâmica e com telhado verde. Por outro lado, observa-se também que o telhado verde proporcionou um maior amortecimento dos valores de ITGU nos horários de ocorrência de menores valores de temperatura do ar, sendo que às 06:00 horas houve diferença estatística

significativa entre os dados de ITGU em todos os tipos de telhas, mas os valores de ITGU com a presença do telhado verde manteve-se maior em relação aos protótipos sem telhado verde. Além disso, percebe-se que todas essas diferenças se mostraram muito mais evidentes no experimento com os protótipos fechados (Figura 9B) em relação aos protótipos abertos (Figura 9A).

Nota-se também, que o protótipo com a telha cerâmica sem a presença do telhado verde apresenta valores de ITGU semelhantes aos encontrados no protótipo com telha metálica e com telhado verde (Figura 9B), isso devido ao desempenho térmico natural da telha cerâmica, segundo as características térmicas descritas por Bueno (1994). Ao confrontar os valores de ITGU obtidos no presente trabalho com os reportados por Oliveira *et al.* (2006), considera-se que a presença do telhado verde pode promover conforto térmico aos animais, com base nos valores de ITGU estabelecido para a fase adulta das aves. Já Cardoso *et al.* (2011), observaram valor médio do ITGU em torno de 80,20 em protótipos de aviários em situação de fechamento lateral, utilizando telha cerâmica como material de cobertura, às 12:00 horas, um valor fora da faixa de conforto para os animais. Tal valor observado pelos autores é semelhante ao valor do ITGU encontrado com a mesma telha no presente trabalho (Figura 9B).

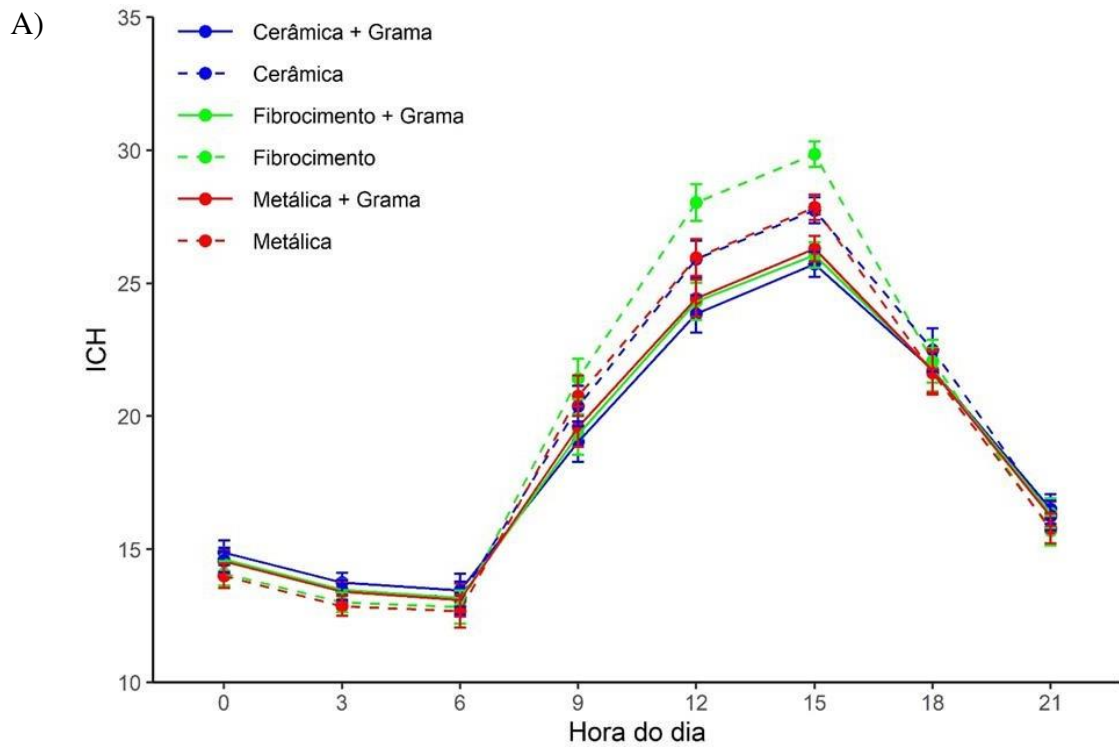
Sampaio *et al.* (2011), em pesquisa com modelos reduzidos de instalações para produção animal, afirmam que a cobertura vegetal pode causar estresse por frio, com ITGU médio de 70,00 conforme o momento do dia e a estação do ano, diferentemente dos valores médios do ITGU dos protótipos com o telhado verde do presente trabalho, que são superiores, promovendo condições de conforto térmico (Figura 9). Buffington *et al.* (1981) afirmam que valores de ITGU até 74,00 definem conforto e, acima de 84,00, é considerado sinal de emergência para produção animal para aves, bovinos e suínos. Diante dos resultados encontrados no presente estudo, torna-se evidente que a presença do telhado verde pode proporcionar um ambiente térmico favorável às exigências térmicas dos animais, podendo ainda auxiliar o acondicionamento térmico natural no interior das instalações.

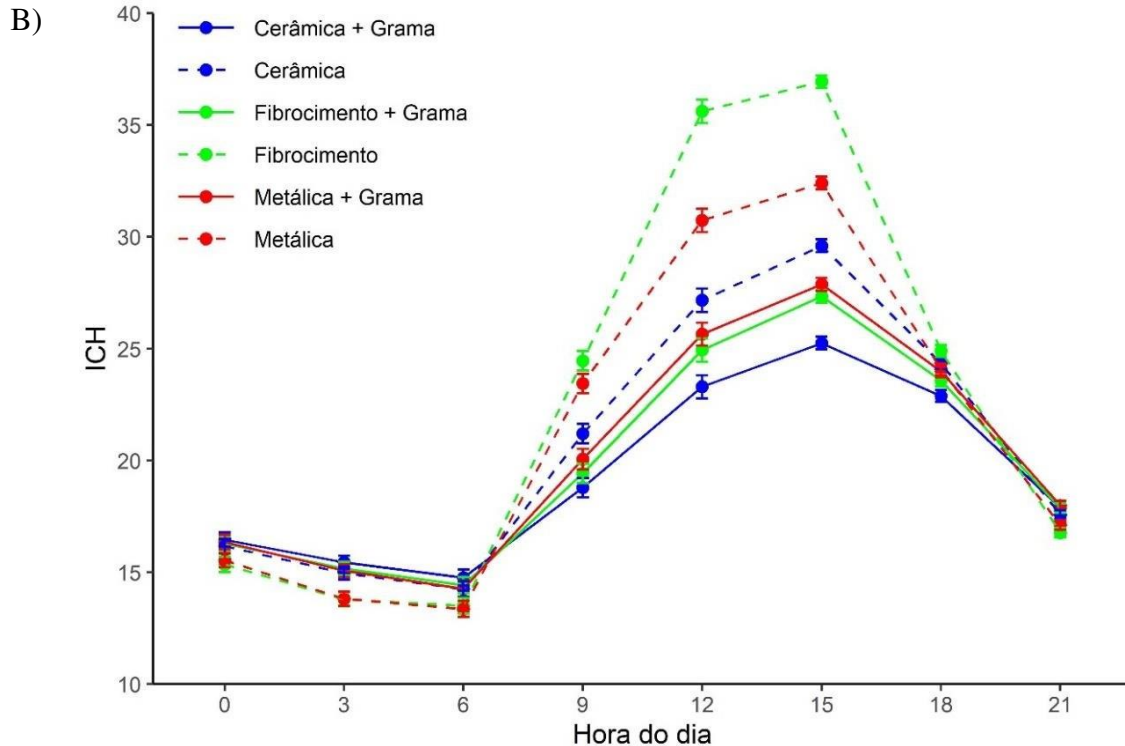
### **4.3.3 Índice de Conforto Humano**

Pela análise estatística dos dados referentes ao Índice de Conforto Humano (ICH) no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito significativo ( $p$ -valor < 0,0001) de interação simples de horário e interação dupla entre presença/ausência do telhado verde e o horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observados efeitos significativos ( $p$ -valor < 0,0001) de interações simples, dupla e tripla entre todas as variáveis

testadas. Portanto, foi realizado o desdobramento das interações separadamente e analisados todos os efeitos nas horas. Os dados de ICH dos protótipos são apresentados na Figura 10, sendo os dados do experimento com protótipos abertos referente ao gráfico da Figura 10A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 10B.

Figura 10. Índice de Conforto Humano (ICH) em protótipos abertos (A) e fechados (B) nos diferentes horários considerando os diferentes tipos de telhas e presença/ausência de telhado verde





Fonte: Autores.

Analisando o desdobramento dos dados de ICH nos protótipos abertos em relação a presença e ausência do telhado verde nos diferentes horários foram observadas diferenças estatísticas significativas ( $p$ -valor < 0,0001) às 09:00, 12:00 e 15:00 horas. Em relação ao tipo de telha foram observadas diferenças estatísticas significativas ( $p$ -valor < 0,0001) somente às 15:00 horas. Os valores médios do ICH nos protótipos abertos sem a presença do telhado verde (Figura 10A) são maiores em relação àqueles com o telhado verde, nos horários mais quentes do dia, sendo os maiores valores de ICH no protótipo com telhas de fibrocimento. Já no período noturno, a telha de cerâmica com a cobertura verde apresentou maior capacidade de isolamento térmico do ambiente interno, mantendo o valor médio do ICH acima dos demais tratamentos (Figura 10A). A diferença entre os tratamentos estudados, pode ser explicada pelas características dos materiais de cobertura e suas propriedades térmicas (ROBERTO RIVERO, 1986), no qual as telhas sem a proteção da cobertura verde vão absorver uma quantidade maior de calor em relação às telhas com a cobertura verde, que atuam na interceptação direta da radiação solar.

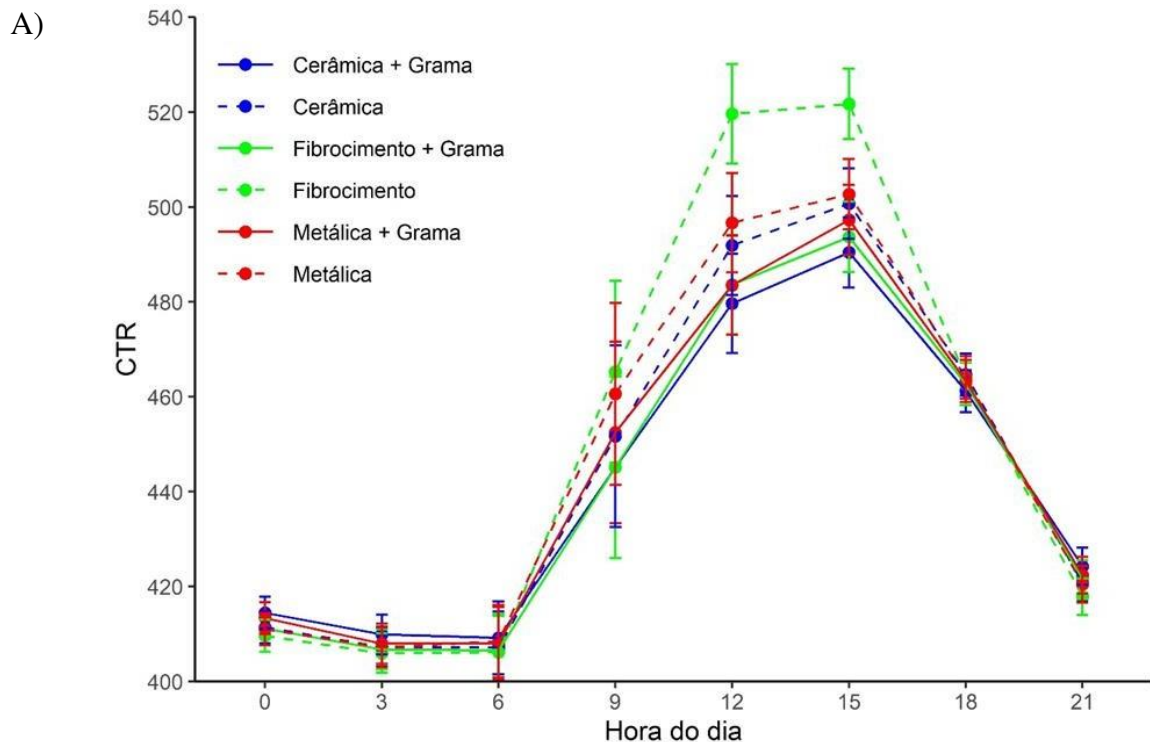
Nos protótipos fechados (Figura 10B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor < 0,0001) nos valores de ICH dos protótipos entre praticamente todas as variáveis analisadas. Os protótipos com o telhado verde proporcionaram menores ICH e melhores condições térmicas entre as 09:00 horas e as 18:00 horas, em relação aos valores de ICH encontrados nos protótipos

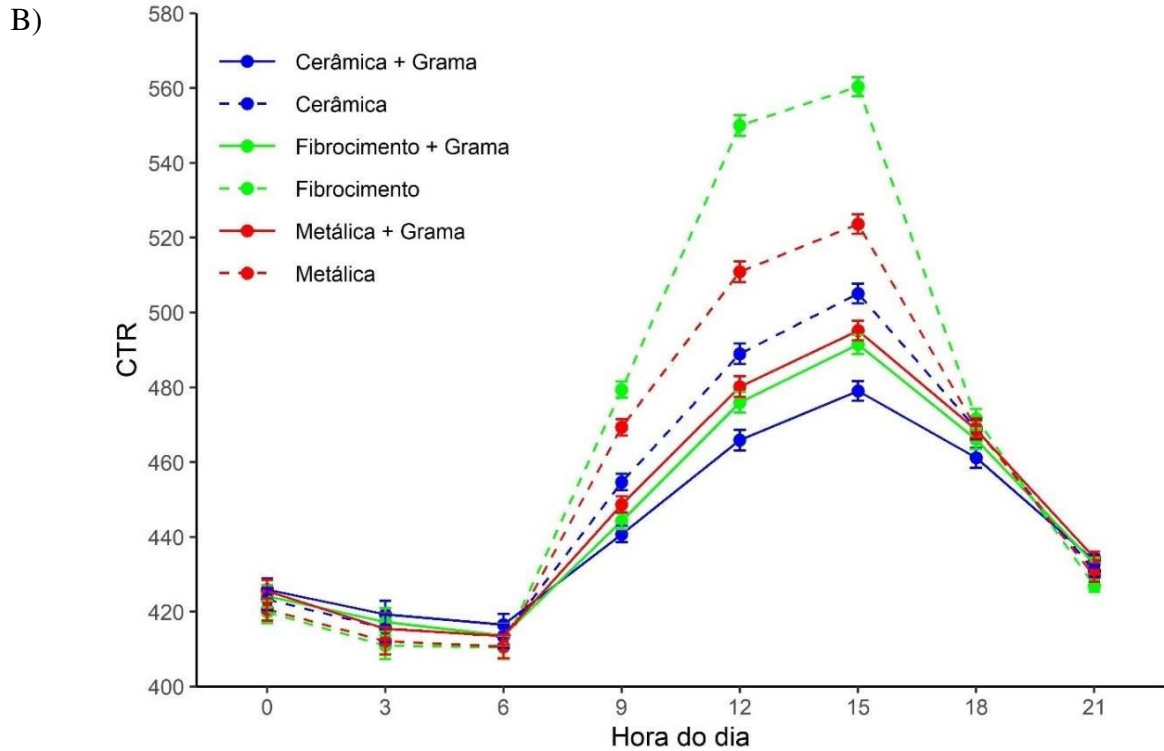
sem o telhado verde, quando os valores médios de ICH chegaram próximos a 40,0 caracterizando-se como um ambiente desconfortável ao ser humano (ROSENBERG, 1983). A partir dos valores médios do ICH do ambiente interno dos protótipos com a presença do telhado verde, nos três tipos de telhas analisadas, observou-se que ele possibilita condições confortáveis para todos os tipos de telhas (Tabela 9).

#### 4.3.4 Carga Térmica Radiante

Pela análise estatística dos dados referentes a Carga Térmica Radiante (CTR) no experimento com protótipos abertos observou-se que houve efeito significativo ( $p$ -valor < 0,0001) de interação simples de horário e interação dupla entre presença/ausência do telhado verde e o horário. Já no experimento com protótipos fechados foram observados efeitos significativos ( $p$ -valor < 0,0001) de interações simples, dupla e tripla entre todas as variáveis testadas. Portanto, foi realizado o desdobramento das interações separadamente e analisados todos os efeitos nas horas. Os dados de CTR dos protótipos são apresentados na Figura 11, sendo os dados do experimento com protótipos abertos referente ao gráfico da Figura 11A e os dados do experimento com os protótipos fechados encontram-se no gráfico da Figura 11B.

Figura 11. Carga Térmica de Radiação (CTR) em protótipos abertos (A) e fechados (B) nos diferentes horários considerando os diferentes tipos de telhas e presença/ausência de telhado verde





Fonte: Autores.

Pelo desdobramento dos dados de CTR nos protótipos abertos em relação a presença e ausência do telhado verde nos diferentes horários foram observadas diferenças estatísticas significativas ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ) às 12:00 e 15:00 horas. Os valores médios da CTR nos protótipos abertos sem a presença do telhado verde (Figura 11A) são maiores em relação àqueles com o telhado verde, nos horários mais quentes do dia, sendo os maiores valores de CTR no protótipo com telhas de fibrocimento. Já no período noturno, a telha de cerâmica com a cobertura verde apresentou maior capacidade de isolamento térmico do ambiente interno, mantendo o valor médio do ICH acima dos demais tratamentos (Figura 10A).

Em estudo, Cardoso *et al.* (2011) afirmam que, independentemente do tipo de cobertura, as instalações de produção animal têm capacidade de reduzir a CTR em torno de 40%, nos horários mais quente do dia, assim como observado no presente estudo, porém com a presença do telhado verde observou-se uma redução da CTR ainda maior (Figura 11A). A eficiência na redução da CTR depende do tipo de telha associada à cobertura verde, por conta das características físicas e das propriedades térmicas do material.

Nos protótipos fechados (Figura 11B), houve efeito de interação significativa ( $p$ -valor  $< 0,0001$ ) nos valores de CTR dos protótipos entre todas as variáveis analisadas. Observa-se

que a utilização do telhado verde também reduziu os valores médios da CTR nos momentos mais quentes do dia, proporcionando maior proteção contra a radiação solar incidente.

Os valores de CTR obtidos no presente estudo, em protótipos com telha cerâmica e telhado verde, em ambas as condições dos protótipos, abertos e fechados (Figura 11), apresentaram valores semelhantes aos encontrados por Sampaio *et al.* (2011), que obtiveram valores da CTR do inverno e verão, no Sul do Brasil, em protótipos cobertos por telha cerâmica, variando de 406,70 a 479,20 W/m<sup>2</sup>. Passini *et al.* (2013) observaram que a cobertura pintada de branco e com ventilação artificial têm capacidade de reduzir a CTR em torno de 6,40 W/m<sup>2</sup>. Esse efeito de redução, no entanto, maior, foi observado com os resultados obtidos no presente estudo, nos protótipos com a presença do telhado verde. Destacam-se os protótipos fechados com telhas de fibrocimento, uma redução entre os protótipos com e sem telhado verde de 74,00 W/m<sup>2</sup> às 12:00 horas e de 69,00 W/ m<sup>2</sup> às 15:00 horas (Figura 11B).

## 5 CONCLUSÕES

O uso telhado verde na produção animal representa uma alternativa sustentável para minimizar os impactos dos sistemas agroindustriais sobre as mudanças climáticas globais bem como minimizar os impactos do aquecimento global sobre a condição térmica dos ambientes de produção. Como parte dos poluentes atmosféricos que compõem os gases de efeito estufa são gerados nas instalações de produção animal, o telhado verde pode contribuir com o sequestro de CO<sub>2</sub>, promovendo o ciclo natural do gás, melhorando o balanço de CO<sub>2</sub> no ambiente.

O telhado verde contribui significativamente com a melhoria da condição térmica do interior da instalação ao amenizar a ocorrência de extremos térmicos, que afetam o conforto térmico e o bem-estar dos animais e, indiretamente, contribui com menor demanda dos sistemas de condicionamento térmico artificial. A utilização do telhado verde, independentemente do tipo de telha, reduziu a temperatura do ar no interior dos protótipos nas horas mais quentes do dia, em até 2,4 °C nos protótipos abertos, e 10,6 °C nos protótipos fechados. O uso do telhado verde foi capaz de promover redução significativa na temperatura superficial interna dos protótipos com telhas de fibrocimento, na hora mais quente do dia de 24,0 °C nos protótipos abertos e 27,0 °C nos protótipos fechados. A aplicação do telhado verde sobre a cobertura de protótipos abertos, foi capaz de reduzir o ITU em 2,3, o ITGU entre 2,8, e a CTR em 21,0 W/m<sup>2</sup>, independentemente do tipo de telha, nas horas mais quentes do dia. Já em condições de protótipos fechados, o telhado verde foi capaz de reduzir o ITU em até 8,1, o ITGU em até 11,3, e a CTR em até 74,00 W/m<sup>2</sup>, nos horários mais quentes do dia. Pelo ICH, para ambas as tipologias construtivas dos protótipos, abertos e fechados, com a presença do telhado verde, apresentou situação de conforto térmico.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, Naeem A. *et al.* Modelling carbon dioxide emissions under a maize-soy rotation using machine learning. **Biosystems Engineering** v. 212, p. 1–18, 1 dez. 2021.
- ABPA. Relatório anual 2022. **Brazilian Association of Animal Protein** p. 144, 2022.
- ABREU, V. M. N. *et al.* Influência da Cortina e do Programa de Luz no Desempenho Produtivo de Frangos de Corte e no Consumo de Energia Elétrica. **Comunicado técnico 437 - Embrapa**, 2006. Acesso em: 27 maio 2021.
- ABREU, Valéria Maria Nascimento; ABREU, Paulo Giovanni De. Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia** v. 40, p. 1–14, 2011.
- ALLEN, RG *et al.* **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p.
- ALMEIDA, Isaias Vitorino Batista De; SOUZA, José Thyago Aires; BATISTA, Mateus Costa. Melhoramento genético de plantas forrageiras xerófilas: Revisão. **Pubvet** v. 13, n. 8, p. 1–11, 2019.
- ANDRIC, Ivan; KAMAL, Athar; AL-GHAMDI, Sami G. Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: Case study of Qatar. **Energy Reports** v. 6, p. 2476–2489, 1 nov. 2020.
- ANTUNES, Marcelo Moreira *et al.* Efeitos do estresse calórico sobre a produção e reprodução do gado leiteiro. p. 1–5, 2009.
- ANVISA. **Resolução-RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**, 2003.
- ARCHER, David. Fate of fossil fuel CO<sub>2</sub> in geologic time. **Journal of Geophysical Research: Oceans** v. 110, n. 9, p. 1–6, 8 set. 2005.
- ARMSTRONG, D. V. Heat Stress Interaction with Shade and Cooling. **Journal of Dairy Science** v. 77, n. 7, p. 2044–2050, 1994.
- ATTIA-ISMAIL, Salah A. Influence of Climate Changes on Animal Feed Production, the Problems and the Suggested Solutions. **Springer Water** p. 451–464, 2020. Acesso em: 20 maio 2022.
- BAÊTA, F. C; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. 2<sup>a</sup> ed. Viçosa-MG: UFV, 2010. 269 p.
- BARNABÉ, Janice M. C. *et al.* Temperatura superficial de materiais utilizados para cobertura individual de bezerreiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 18, n. 5, 2014.

- BARRETO-MENDES, Luciano *et al.* A refined protocol for calculating air flow rate of naturally ventilated broiler barns based on CO<sub>2</sub> mass balance. **Dyna** v. 81, n. 185, p. 189, 2014.
- BOLLMAN, Michael A. *et al.* Effects of shading and composition on green roof media temperature and moisture. **Journal of Environmental Management** v. 281, p. 111882, 1 mar. 2021.
- BORGES, Pedro; MORAIS, Pedro; MENDOZA, Zaíra. Quantificação da emissão de gases oriundos da suinocultura. **Enciclopédia Biosfera** v. 16, n. 30, p. 530–543, 15 dez. 2019.
- BROUWER, E. Report of sub-committee on constant factors. In: K. L. BLAXTER (Org.). **Energy Metabolism: Proceedings of the 3rd Symposium held at Troon, Scotland**. EAAP ed. Publ. No. 11. London, U.K.: Academic Press, 1964. p. 441–443.
- BUENO, A. D. **Transferência de Calor e Umidade em Telhas: Simulação e Análise Experimental Dissertação**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. 132 p.
- BUFFINGTON, D. E. *et al.* Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **elibrary.asabe.org** v. 24, n. 3, p. 711–0714, 1981.
- BUSCH, Florian A.; SAGE, Rowan F. The sensitivity of photosynthesis to O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration identifies strong Rubisco control above the thermal optimum. **New Phytologist** v. 213, n. 3, p. 1036–1051, 1 fev. 2017.
- CAI, Lu *et al.* Reduction in Carbon Dioxide Emission and Energy Savings Obtained by Using a Green Roof. **Aerosol and Air Quality Research** v. 19, n. 11, p. 2432–2445, 2019.
- CALVET, S. *et al.* Characterization of gas emissions from a Mediterranean broiler farm. **Poultry Science** v. 90, n. 3, p. 534–542, 2011.
- CAMPOS, Josiane A. *et al.* Qualidade do ar, ambiente térmico e desempenho de suínos criados em creches com dimensões diferentes. **Engenharia Agrícola** v. 29, n. 3, p. 339–347, 2009.
- CÂNDIDO, Márcia G.L. *et al.* Determination of thermal comfort zone for early-stage broilers. **Engenharia Agrícola** v. 36, n. 5, p. 760–767, 2016.
- CARNEIRO, Thaisa A. *et al.* Condicionamento térmico primário de instalações rurais por meio de diferentes tipos de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 19, n. 11, p. 1086–1092, nov. 2015.
- COSTA, Annamaria; GUARINO, Marcella. Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry. **Atmospheric Environment** v. 43, n. 8, p. 1548–1556, 1 mar. 2009.
- COSTANTINO, Andrea *et al.* The reduction of gas concentrations in broiler houses through ventilation: Assessment of the thermal and electrical energy consumption. **Biosystems Engineering** v. 199, p. 135–148, 1 nov. 2020.
- CURTIS, S. E. **Environmental management in animal agriculture**. The Iowa State University: Ames, 1983. 410 p.

DA FONSECA, Luiz Carlos Neves *et al.* CO<sub>2</sub> fluxes in oil palm plantation in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 33, n. 1, p. 181–192, 2018.

DE MIRANDA, Jussara L. *et al.* The Anthropocene and CO<sub>2</sub>: Processes of capture and conversion. **Revista Virtual de Química** v. 10, n. 6, p. 1915–1946, 2018.

DONG, H. *et al.* Greenhouse gas emissions from swine barns of various production stages in suburban Beijing, China. **Atmospheric Environment** v. 41, n. 11, p. 2391–2399, 1 abr. 2007.

DORNELES, Keilor da Rosa *et al.* Respostas morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo mediados pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** v. 14, n. 1, p. 1–7, 2019.0000000221.

DOURMAD, Jean-Yves; RIGOLOTT, Cyrille; HAYO, Van Der Werf. Emission of greenhouse gas, developing management and animal farming systems to assist mitigation. **Livestock and Global Climate Change** p. 17–20, 2008.

DROZ, Anna G.; COFFMAN, Reid R.; BLACKWOOD, Christopher B. Plant diversity on green roofs in the wild: Testing practitioner and ecological predictions in three midwestern (USA) cities. **Urban Forestry and Urban Greening** v. 60, p. 127079, 1 maio 2021.

D'URSO, Provvidenza Rita *et al.* Assessing Influence Factors on Daily Ammonia and Greenhouse Gas Concentrations from an Open-Sided Cubicle Barn in Hot Mediterranean Climate. **Animals** **2021**, Vol. 11, Page 1400 v. 11, n. 5, p. 1400, 14 maio 2021.

D'URSO, Provvidenza Rita; ARCIDIACONO, Claudia. Effect of the milking frequency on the concentrations of ammonia and greenhouse gases within an open dairy barn in hot climate conditions. **Sustainability (Switzerland)** v. 13, n. 16, p. 9235, 17 ago. 2021.

FACHINELLO KREBS, Lisandra; JOHANSSON, Erik. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. **Energy and Buildings** v. 241, p. 110963, 15 jun. 2021.

FAGGIANELLI, Ghjuvan Antone *et al.* Natural cross ventilation in buildings on Mediterranean coastal zones. **Energy and Buildings** v. 77, p. 206–218, 1 jul. 2014.

FAVARETO, Arilson. ODS 2 - Fome zero e agricultura sustentável. **Leituras dos ODS para um Brasil Sustentável** p. 28–48, 2021.0000000280.

FERREIRA, R. A. **Maior produção com melhor ambiente para aves, suínos e bovinos.** Viçosa: Aprenda Fácil, 2005. 371 p.

FREITAS, Leticia Cibele da Silva Ramos *et al.* Air quality, sound pressure level, and thermal environment of two swine nursery styles. **Revista Ciência Agronômica** v. 49, n. 2, p. 211–220, 2018.

GONÇALVES, Indira C.M. *et al.* Thermal performance of aviary located in the semiarid region of Pernambuco based on computer simulation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 26, n. 7, p. 533–540, 20 abr. 2022.

GROSSI, Giampiero *et al.* Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies. **Animal Frontiers** v. 9, n. 1, p. 69–76, 3 jan. 2019.

H. XIN *et al.* Use of CO<sub>2</sub> Concentration Difference or CO<sub>2</sub> Balance to Assess Ventilation Rate of Broiler Houses. **Transactions of the ASABE** v. 52, n. 4, p. 1353–1361, 2009.

HENN, J. D. *et al.* Determination of the equation parameters of carbon flow curves and estimated carbon flow and CO<sub>2</sub> emissions from broiler production. **Poultry Science** v. 94, n. 9, p. 2303–2312, 2015.

INMET. **Estações Meteorológicas Automáticas:Tempo**, 2022. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A510>

IPCC. **Climate change 2013: The physical science basis, in contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Monika Rhein**: Gian-Kasper Plattner, 2013.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>

KELLY, C.F; BOND, T.E. Effectiveness of artificial shade materials. **Agriculture Engineering** v. 39, n. 12, p. 758–764, 1958.

KLUGE, Ricardo Alfredo; TEZOTTO-ULIANA, Jaqueline V.; DA SILVA, Paula P.M. Aspectos Fisiológicos e Ambientais da Fotossíntese. **Revista Virtual de Química** v. 7, n. 1, p. 56–73, 2015.

LA ROCHE, Pablo; YEOM, Dongwoo Jason; PONCE, Ariane. Passive cooling with a hybrid green roof for extreme climates. **Energy and Buildings** v. 224, p. 110243, 1 out. 2020.

LI, H. *et al.* Comparison of direct vs. indirect ventilation rate determinations in layer barns using manure belts. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers** v. 48, n. 1, p. 367–372, 2005.

LI, Jian Feng *et al.* Effect of green roof on ambient CO<sub>2</sub> concentration. **Building and Environment** v. 45, n. 12, p. 2644–2651, 2010.

LIMA, Karla A.O. *et al.* Impact of different light sources on broiler rearing environment. **Engenharia Agrícola** v. 34, n. 3, p. 428–434, 2014.

LIU, Hongqing *et al.* Impacts of green roofs on water, temperature, and air quality: A bibliometric review. **Building and Environment** v. 196, p. 107794, 1 jun. 2021.

LIU, Hui *et al.* Life history is a key factor explaining functional trait diversity among subtropical grasses, and its influence differs between C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> species. **Journal of Experimental Botany** v. 70, n. 5, p. 1567–1580, 11 mar. 2019.

LOURENÇONI, Dian *et al.* Condições ambientais em galpão convencional telado para galinhas poedeiras hyline w-36. **Engenharia Agrícola** v. 35, n. 1, p. 1–10, 2015.

MADER, T. L.; DAVIS, M. S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science** v. 84, n. 3, p. 712–719, 2006.

MARTINEZ, Carlos Alberto *et al.* Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura Carlos. **Revista Brasileira de Geografia Física** v. 8, n. VI SMUD, p. 635–650, 2015.

MATTHEWS, H. Damon; CALDEIRA, Ken. Stabilizing climate requires near-zero emissions. **Geophysical Research Letters** v. 35, n. 4, 28 fev. 2008.

MELO, Thiago Vasconcelos *et al.* Roof pitch and exposure and different roofing materials in reduced models of animal production facilities in the fall and winter. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal** v. 16, n. 3, p. 658–666, set. 2015.

MENEGALI, Irene *et al.* Ambiente térmico e concentração de gases em instalações para frangos de corte no período de aquecimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 13, n. SUPPL.0, p. 984–990, 2009.

MORAES, Anibal De; PALHANO, Ana Luiza. Fisiologia da produção de plantas forrageiras., 2002.

MOREIRA, Catarina. Fotossíntese. **Revista de Ciência Elementar** v. 1, n. 1, p. 1–6 , 30 dez. 2013.

MURPHY, Glenn. Similitude in engineering. p. 41, 1950.

OBERNENDORFER, Erica *et al.* Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience** v. 57, n. 10, p. 823–833, 1 nov. 2007.

OGINK, N. W.M. *et al.* Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. **Biosystems Engineering** v. 116, n. 3, p. 297–308, 2013.

OLIVEIRA, Charles Paranhos *et al.* Thermal Environment and Animal Comfort of Aviary Prototypes with Photovoltaic Solar Panel on the Roof. **Energies 2023, Vol. 16, Page 2504** v. 16, n. 5, p. 2504, 6 mar. 2023.

OLIVEIRA, Paulo Armando V. De; ANGNES, Graciele; COLDBELLA, Arlei. Emissão de gases na produção de frangos de corte em sistema dark House. **Avicultura Industrial** v. 04, p. 16–24, 2020.

OLIVEIRA, Rita Flávia Miranda *et al.* Effects of temperature and relative humidity on performance and yield of noble cuts of broilers from 1 to 49 days old. **Revista Brasileira de Zootecnia** v. 35, n. 3, p. 797–803, 2006.

PAINES, Patrícia de Andrade; CAUDURO, Carlos Roberto; POSSAMAI, Osmar. Avaliação preliminar da concentração de co2 em função da temperatura do ar, umidade e radiação solar em santa maria/rs 1. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo** v. 4, n. 5, p. 214–231, 2019.

PASSINI, Roberta *et al.* Intervenção ambiental na cobertura e ventilação artificial sobre índices de conforto para aves de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 17, n. 3, p. 333–338, 2013.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 4.0.4 "Los ed. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing., 2021.

REECE, F.N.; LOTT, B.D.; DEATON, J.W. Ammonia in the Atmosphere during Brooding Affects Performance of Broiler Chickens. **Poultry Science** v. 59, n. 3, p. 486–488, 1980.

RENAN BESEN, Marcos *et al.* Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. **Scientia Agropecuaria** v. 9, n. 3, p. 429–439, 28 set. 2018. 99172018000300015&lng=es&nrm=iso&tlng=pt>.

ROBERTO RIVERO. **Arquitetura e Clima: acondicionamento térmico natural**. 2<sup>a</sup>. Ed. Rev. e Ampl. ed. Porto Alegre, RS, 1986. 240 p.

ROLPH, K. A.; FOREST, C. E.; RUARK, M. D. The role of non-CO2 mitigation options within the dairy industry for pursuing climate change targets. **Environmental Research Letters** v. 14, n. 8, 6 ago. 2019.

ROSENBERG, N. J.; Bland, B. L.; Verma, S. B. **Microclimate: The biological environment**. [S.l.]: New York: Jonh Wiley & Sons, 1983. 467 p.

RUGGIERI, Ana Cláudia; CARDOSO, Abmael da Silva. Balanço de carbono em sistemas de produção animal: fontes de emissão e opções de mitigação. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal** v. 25, n. 1–2, p. 37–44, 2017.

SALISBURY, F. B., ROSS, C. W. **Plant Physiology**. [S.l.]: Wadsworth Publishing Company, 1992. 141 p.

SAMPAIO, C. A. P.; CARDOSO, C. O.; SOUZA, G.P. Temperatura superficiais de telhas e sua relação com o ambiente térmico. **Engenharia Agrícola** v. 31, n. 2, p. 1–11, 2011.

SANTOS, Gleicianny de Brito *et al.* Estudo bioclimático das regiões litorânea, agreste e semiárida do estado de Sergipe para a avicultura de corte e postura. **Ciência Rural** v. 44, n. 1, p. 123–128, jan. 2014.

SCHMIDT, Nádia Solange; SILVA, Christian Luiz Da. Pesquisa e Desenvolvimento na Cadeia Produtiva de Frangos de Corte no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural** v. 56, n. 3, p. 467–482, 1 set. 2018.

SEJIAN, Veerasamy *et al.* Livestock as Sources of Greenhouse Gases and Its Significance to Climate Change. **Greenhouse Gases**. [S.l.]: IntechOpen, 2016.

SEYEDABADI, Mohammad Reza; EICKER, Ursula; KARIMI, Saghar. Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint. **Environmental Challenges** p. 100119, 25 abr. 2021.

SHAFIQUE, Muhammad; KIM, Reeho; RAFIQ, Muhammad. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 90, p. 757–773, 1 jul. 2018.

SILVA, Eduardo Teixeira Da *et al.* Determinação do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para produção de aves na mesorregião metropolitana de Curitiba – PR. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais** v. 2, n. 3, p. 47–60, 2004.

SILVEIRA, Neidimila A. *et al.* Aerial environment in farrowing and swine nursery. **Engenharia Agrícola** v. 29, n. 3, p. 348–357, 2009.

SOUZA, Cecília de Fátima *et al.* **Unidades para Produção Animal – UPAs: Planejamento e Projeto**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2021. 125 p.

STEADMAN, R. G. The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. **Journal of Applied Meteorology and Climatology** v. 18, n. 7, p. 861–873, 1979.

SULTANA, Mst. Nilufa; AKIB, Shatirah; ASHRAF, Muhammad Aqeel. Thermal comfort and runoff water quality performance on green roofs in tropical conditions. **Geology, Ecology, and Landscapes** v. 1, n. 1, p. 47–55, 2 jan. 2017.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal .pdf**. 6. ed ed. [S.l.: s.n.], 2017. 888 p. Artmed v.

THOM, E. C. The Discomfort Index. **Weatherwise** v. 12, n. 2, p. 57–61, abr. 1959.

TINÔCO, IFF. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola** v. 3, n. 1, p. 01–26, 2001.

VALADARES, Leonora Ribeiro *et al.* Effect of roof painting of aviaries on thermal comfort, productive performance and physiological variables of broilers chickens. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal** v. 19, n. 3, p. 336–346, set. 2018.

VAZ, Sílvio; RODRIGUES DE SOUZA, Ana Paula; LOBO BAETA, Bruno Eduardo. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. **Cleaner Engineering and Technology** v. 8, p. 100456, 1 jun. 2022.

VERBEKE, Stijn; AUDENAERT, Amaryllis. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 82, p. 2300–2318, 1 fev. 2018

VIGODERIS, Ricardo Brauer *et al.* Avaliação do uso de ventilação mínima em galpões avícolas e de sua influência no desempenho de aves de corte no período de inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia** v. 39, n. 6, p. 1381–1386, 2010.

WALTER, Lidiane Cristine; ROSA, Hamilton Telles; STRECK, Nereu Augusto. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO<sub>2</sub>. **Ciência Rural** v. 45, n. 9, p. 1564–1571, 17 jul. 2015.

WATHES, C. M. Strive for clean air in your poultry house. **World Poultry** v. 15, n. 3, p. 17–19, 1999.

YACOB, Mohamad Norfekry Md.; KASMIN, Hartini; HASHIM, Muhammad Iqbal Hakeem. Estimating Carbon Sequestration of Green Roof Plants in Tropical Climate. **International Journal of Integrated Engineering** v. 13, n. 3, p. 200–206, 10 jun. 2021.

YADAV, Dhananjay; WANG, Junye. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada. **Environmental Pollution** v. 230, p. 1040–1049, 2017.

ZHAO, Y. *et al.* Environmental assessment of three egg production systems—Part I: Monitoring system and indoor air quality. **Poultry Science** v. 94, n. 3, p. 518–533, 1 mar. 2015.

ZOU, Bing; SHI, Zhengxiang; DU, Songhuai. Gases emissions estimation and analysis by using carbon dioxide balance method in natural-ventilated dairy cow barns. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** v. 13, n. 2, p. 41–47, 2020.