

RAFAELLA RESENDE ANDRADE

**AMBIÊNCIA E BEM-ESTAR ANIMAL NA PRODUÇÃO INTENSIVA DE LEITE
EM SISTEMAS *COMPOST BARN* FECHADOS PARA A TIPOLOGIA
CONSTRUTIVA E CLIMA DO BRASIL**

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

Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

Coorientadores: Cecília de Fátima Souza Ferreira
Flávio Alves Damasceno
Gabriel Araújo e Silva Ferraz
Matteo Barbari

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

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

T

A553a
2021
Andrade, Rafaella Resende, 1989-
Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de
leite em sistemas *Compost Barn* fechados para a tipologia
construtiva e clima do Brasil : . / Rafaella Resende Andrade. –
Viçosa, MG, 2021.
158 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Ilda de Fatima Ferreira Tinoco.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Construções rurais - Aquecimento e ventilação.
2. Bovinos de leite - Instalações - Aquecimento e ventilação.
3. Saúde animal. 4. Compostagem. 5. Geologia - Modelos
matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.22

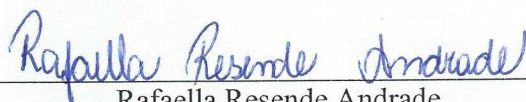
RAFAELLA RESENDE ANDRADE

AMBIÊNCIA E BEM-ESTAR ANIMAL NA PRODUÇÃO INTENSIVA DE LEITE
EM SISTEMAS *COMPOST BARN* FECHADOS PARA A TIPOLOGIA
CONSTRUTIVA E CLIMA DO BRASIL

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

APROVADA: 23 de fevereiro de 2021.

Assentimento:



Rafaella Resende Andrade
Autora



Ilda de Fátima Ferreira Tinôco
Orientadora

A agropecuária brasileira.

Em especial a todos os produtores de leite.

OFEREÇO!

A Deus,

Ao meu querido pai, Adir Andrade (in memoriam),

Minha saudade e inspiração em todos os momentos desta jornada!

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

O meu maior agradecimento é para Deus, por iluminar a minha caminhada, principalmente nos momentos difíceis, me dando discernimento, força e coragem.

Aos meus pais, Adir e Magda, pelo exemplo de vida, pelo amor, apoio incondicional e compreensão, essenciais para que eu seguisse em frente nos meus estudos. Obrigada por me ajudarem a realizar mais este sonho. Toda a minha gratidão!

Aos meus familiares pelo amor, incentivo e apoio constante.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, em especial ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, por me darem a honra de viver seis anos neste ambiente de tão grande aprendizado.

Ao Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais (AMBIAGRO).

À Profa. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, pela grande oportunidade, orientação, confiança, pelos valiosos ensinamentos, tanto profissional quanto pessoal e pela amizade construída. Minha eterna gratidão!

À Profa. Cecília de Fátima Souza, pela coorientação, assim como os ensinamentos repassados, carinho e amizade.

Ao Prof. Flávio Alves Damasceno, pela coorientação, amizade, por todo conhecimento compartilhado sobre o sistema *Compost Barn* e valiosas sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao Prof. Gabriel Araújo e Silva Ferraz pela coorientação, ensinamentos, pelo suporte com a análise geoestatística e pelas valiosas sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao Prof. Matteo Barbari, pela coorientação, ensinamento e pela grande oportunidade que me foi concedida de realizar parte do doutorado na Univeristà degli Studi di Firenze - UNIFI/ Itália.

A Profa. Fátima de Jesus Folgôa Baptista e ao Prof. Vasco Manuel Fitas da Cruz, pelos ensinamentos, carinho e amizade, dando-me a oportunidade e todo suporte para realizar o doutorado sanduíche na Universidade de Évora (UÉvora-Portugal). Toda a minha gratidão!

Aos professores Fernando da Costa Baêta, Sérgio Zolnier e Valmir Sartor, pelo conhecimento a mim transmitido e por toda a contribuição durante o doutorado.

Ao Prof. Giuseppe Rossi pelo suporte, acolhimento e amizade durante o período que estive na Univeristà degli Studi di Firenze - UNIFI/ Itália.

À equipe de pesquisadores do AMBIAGRO, Luís Gustavo, Willian, Márcia, Monique, Kelle, Lina, Robinson, Tatiany, Fatinha, Fernanda e Múcio, pelos momentos de profissionalismo, amizade e descontração. Em especial agradeço a Letícia, Diogo e Carlos Gutemberg pela força excepcional em todas as etapas da elaboração deste trabalho, bem como durante os seis anos de Ambiagro. Agradeço também aos mais novos amigos do Ambiagro, Charles, João Antônio, Carlos Eduardo, Leonardo e Matheus.

Ao Bernard Yaméogo pela amizade e parceria durante a condução do experimento.

Meu especial agradecimento aos estagiários Desirée, Guilherme, Eduardo e Thiago pela disposição, comprometimento e companhia diária durante a montagem e condução do experimento. Muito obrigada!

A minha família do coração portuguesa, Tércia Azevedo, Bruno Magalhães e Teresa Morgado, pelo acolhimento, amizade e tanto carinho. Vocês são demais!

À Fazenda Nô da Silva, seus proprietários, familiares e funcionários pela amizade construída e disponibilidade para a realização desta pesquisa.

Também sou grata aos membros da banca de defesa, pelo tempo despendido na leitura e pelas correções.

Ao Programa da União Europeia ERASMUS +, International Credit Mobility (ICM), pela concessão de bolsa e suporte durante o período sanduíche que estive na Universidade de Évora-UÉvora/Portugal.

A Univeristà degli Studi di Firenze - UNIFI/ Itália.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil; da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; e da FAPEMIG.

Obrigado a todos que direta ou indiretamente contribuíram para mais essa conquista na minha vida!

BIOGRAFIA

RAFAELLA RESENDE ANDRADE, filha de Adir Andrade (*in memoriam*) e Magda Aparecida Andrade, nasceu em Lavras, Minas Gerais, em 21 de março de 1989. Em março de 2009, ingressou no curso de graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras.

Em novembro de 2014, submeteu-se à defesa de sua monografia intitulada “Ambiente acústico e produção de gases em diferentes instalações de crescimento e terminação de suínos”, sob a orientação do Prof. Dr. Alessandro Torres Campos, assim concluindo o curso de graduação em Engenharia Agrícola.

Em março de 2015, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em nível de mestrado, na área de Construções Rurais e Ambiente.

Em fevereiro de 2017 submeteu-se à defesa de sua dissertação intitulada “Determinação da faixa de conforto térmico para galinhas poedeiras na fase inicial de criação”, sob a orientação da Profa. Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

Em março de 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em nível de doutorado, na área de Construções Rurais e Ambiente.

Em fevereiro de 2021 submeteu-se à defesa de sua Tese intitulada “**Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas *Compost Barn* Fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**”, sob a orientação da Profa. Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

RESUMO

ANDRADE, Rafaella Resende, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas *Compost Barn* Fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil.** Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Coorientadores: Cecília de Fátima Souza Ferreira, Flávio Alves Damasceno, Gabriel Araújo e Silva Ferraz e Matteo Barbari.

O Brasil é responsável por uma significativa parte da produção mundial de leite, sendo essa atividade uma das principais fontes econômicas do setor de produção de alimentos de origem animal do país. Dessa forma, a incessante busca por sistemas de criação que contribuam para o aumento da produtividade e qualidade do leite com o uso racional dos recursos, e que sejam compatíveis com o clima do país, constitui um dos principais desafios da pecuária moderna, em especial ao que diz respeito à adoção de sistemas de alojamento adequados ao bem-estar animal e aplicáveis a realidade climática brasileira. Nesse sentido, como uma das alternativas de acondicionar melhor as vacas em produção, o sistema *Compost Barn* (CB) corresponde a uma promissora alternativa para a criação de bovinos de leite. Tal sistema vem sendo adotado, há décadas e com sucesso, nos países de climas temperados e, mais recentemente, em países de climas tropicais e subtropicais, como é o caso do Brasil. Contudo, ainda carecem respostas quanto à aplicabilidade deste sistema para as condições de climas tropicais e subtropicais, sobretudo para as tipologias técnicas e construtivas de instalações CB mais recentemente praticadas nos diferentes países. Desta forma, o objetivo geral desta tese foi avaliar a distribuição espacial das variáveis térmico-ambientais, qualidade de cama e indicadores de bem-estar de vacas em lactação, alojadas em instalação *Compost Barn* Fechada (CBF), com sistema de ventilação negativa em túnel, associada a resfriamento adiabático evaporativo. A pesquisa foi conduzida durante o verão e inverno e para a situação do clima do Brasil, mais especificamente para a bacia leiteira da Zona da Mata, no Estado de Minas Gerais, maior estado produtor de leite do país. Foram levantadas e descritas as principais características e inovações praticadas em sistemas CB abertos e fechados, abordando os aspectos gerais construtivos, qualidade de cama, sistemas de ventilação e indicadores de bem-estar de vacas lactantes. A partir de tal levantamento, procedeu-se à avaliação, em campo, da distribuição espacial e temporal das condições térmico-ambientais, no interior de uma instalação CBF, com o uso da técnica geoestatística. Conforme tipologia construtiva praticada no Brasil a instalação CBF não tinha isolamento térmico nos fechamentos e possuía sistema

de ventilação negativa em modo túnel, associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE, acionado para funcionamento a partir de 21°C), durante o verão e o inverno. Foi possível observar, pelos mapas de krigagem, que as condições mais críticas de habitação foram encontradas, principalmente, a partir da parte central da instalação CBF, em direção à face noroeste, próximo aos exaustores. Durante as tardes de verão, toda a região da instalação CBF apresentou-se em situação de desconforto. Durante o inverno, contudo, os dados ambientais mensurados permaneceram dentro da zona de conforto ao longo de toda instalação CBF. A distribuição da velocidade do ar ao longo de toda a área interior da instalação CBF permaneceu inferior ao recomendado pela literatura, indicando necessidade de se ajustar os isolamentos laterais e de cobertura, e de se promover maior intensificação do sistema de ventilação. O sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE) auxiliou na melhoria das condições térmicas internas da instalação CBF. Porém, provavelmente em razão da falta de isolamento térmico dos fechamentos, não possibilitou uniformidade térmica espacial e nem temporal para as duas estações avaliadas. Também, provavelmente em razão de necessidade de ajuste nos comandos de entrada e saída dos componentes ventilação e molhamento do material poroso, não foi eficiente em manter o ambiente na faixa de conforto de bovinos em lactação, durante o período crítico de verão. A instalação CBF também foi caracterizada para as principais variáveis da cama, indicadores de bem-estar animal e produção de leite, para as condições de inverno e verão. Pela análise geoestatística, foi possível verificar a não uniformidade da distribuição espacial das variáveis da cama. Os piores níveis de temperatura e teor de umidade da cama foram encontrados nas regiões próximas à placa de resfriamento evaporativo, na área circunvizinha ao corredor de alimentação e na região com menor área de cama por animal ($7,8 \text{ m}^2 \text{ vaca}^{-1}$). Durante o verão e inverno, os valores de temperatura e as características químicas da cama indicaram que o material esteve em níveis aquém dos desejáveis para a compostagem ideal; no entanto, a camada interna aerada da cama apresentou-se biologicamente ativa. A elevada densidade animal repercutiu expressivamente na piora do teor de umidade e temperatura interna na cama, sendo que o sistema demandou constante reposição de material. Em geral, as vacas leiteiras mostraram adequada pontuação para o escore de sujeidade e locomoção, para as duas estações climáticas avaliadas, indicando boas condições de bem-estar relativo a estes quesitos. Durante o inverno, a produção média de leite foi de $28,1 \pm 7,2 \text{ kg leite dia}^{-1}$ e durante o verão foi de $26,9 \pm 6,7 \text{ kg leite dia}^{-1}$. Conclui-se que a instalação CBF indicou potencial de uso, desde que seja feito um estudo criterioso do clima da região antes da implantação, sejam ajustados os fatores relativos a manejo do sistema de acondicionamento ambiente, garantia de

melhor isolamento dos fechamentos e aumento da área de cama por animal. Contudo, da forma que o sistema CBF estudado foi concebido e operado, este não foi eficiente em manter as variáveis microclimáticas e qualidade de cama dentro do ideal recomendado pela literatura.

Palavras-chave: Bem-estar animal. Bovinos de leite. Geoestatística. Resfriamento evaporativo. Ventilação em túnel.

ABSTRACT

ANDRADE, Rafaella Resende, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2021. **Environment control and animal welfare in intensive milk production in closed "Compost Bedded Pack Barns" for the Brazilian constructive typology and climate.** Adviser: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Co-advisers: Cecília de Fátima Souza Ferreira, Flávio Alves Damasceno, Gabriel Araújo e Silva Ferraz and Matteo Barbari.

Brazil is responsible for a significant part of the world's milk production, which is one of the main economic sources of the country's animal production sector. Thus, the incessant search for breeding systems that contribute to increasing milk productivity and quality with the rational use of resources and that are compatible with the country's climate constitutes one of the main challenges of modern livestock, especially as to the adoption of housing systems suitable for animal welfare and applicable to the Brazilian climate. In this sense, as one of the alternatives of better conditioning the cows in production, the compost-bedded pack barn (CBP) is a promising alternative for dairy cattle's breeding. This system has been successfully adopted for decades in countries with temperate climates and, more recently, in countries with tropical and subtropical climates, such as Brazil. However, answers still lack in this system's applicability to the tropical and subtropical climate conditions, especially for the technical and CBP constructive typologies most recently practiced in different countries. In this way, the general objective of this thesis was to evaluate the spatial distribution of the thermal-environmental variables, bed quality, and welfare indicators of lactating cows housed in a closed CBP, with a negative ventilation system in a tunnel, associated with adiabatic evaporative cooling. The research was performed during Brazilian summer and winter in the dairy basin of the "Zona da Mata" in Minas Gerais, its largest milk-producing state. The main characteristics and innovations practiced in the open and closed CBP were raised and described, addressing the general constructive aspects, bed quality, ventilation systems, and welfare indicators of lactating cows. Based on this survey, the spatial and temporal distribution of thermal-environmental conditions was assessed in the field, inside a CBP, with the use of geostatistical technique. According to Brazil's constructive typology, the closed CBF had no thermal insulation in the closings and had a negative ventilation system in tunnel mode, associated with the adiabatic evaporative cooling system (AECS, activated for operation from 21 °C), during summer and winter. The kriging map highlighted that the most critical housing conditions were mainly in the central part of the closed CBP, towards the

northwest face, close to the exhaust fans. During the summer afternoons, the entire region of the CBP was in discomfort. During the winter, however, the environmental data measured remained within the comfort zone throughout the CBP. The airspeed distribution over the entire interior area of the CBP remained lower than recommended by the literature, indicating the need to adjust the side and roof insulation and intensify the ventilation system. The AECS helped to improve the internal thermal conditions of the CBP. However, probably due to the closures' lack of thermal insulation, it did not allow spatial or temporal thermal uniformity for the two stations evaluated. Also, probably due to the need to adjust the input and output controls of the ventilation and wetting components of the porous material, it was not efficient in maintaining the environment in the comfort range for lactating cattle during the critical summer period. The CBP was also characterized for the bed's main variables, indicators of animal welfare and milk production, for winter and summer conditions. By geostatistical analysis, it was possible to verify the non-uniformity of the spatial distribution of bed variables. The worst levels of temperature and moisture content of the bed were found in the regions close to the evaporative pad cooling, surrounding the feeding alley, and in the region with the least space per animal ($7.8 \text{ m}^2 \text{ vaca}^{-1}$). During the summer and winter, the temperature values and the bed's chemical characteristics pointed out that the material was below desirable levels for the ideal composting; however, the bed's aerated inner layer was biologically active. The high cow stocking density reflected significantly in the moisture worsening of the bed's content and internal temperature, demanding the constant material replacement. In general, dairy cows showed an adequate score for the dirt and locomotion scores during the two climatic seasons evaluated, indicating good welfare conditions concerning these requirements. During winter, the average milk production was $28.1 \pm 7.2 \text{ kg milk day}^{-1}$. During summer, it was $26.9 \pm 6.7 \text{ kg milk day}^{-1}$. The study can conclude that the closed CBP has potential use but requires a careful study of the region's climate before implantation to adjust the factors related to the ambient conditioning system's handling, guarantee better insulation of the closures, and increase the animals' bedding area. However, the way the studied closed CBP was designed and operated was inefficient in preserving the microclimate variables and bed quality within the ideal recommended by the literature.

Keywords: Animal welfare. Dairy cattle. Geostatistics. Evaporative cooling. Tunnel ventilation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 OBJETIVOS	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
2. CAPÍTULO I: INSTALAÇÕES <i>COMPOST BARN</i> NA PRODUÇÃO INTENSIVA DE LEITE E SUA APLICABILIDADE PARA AS CONDIÇÕES ARQUITETÔNICO-AMBIENTAIS DO BRASIL	21
2.1 INTRODUÇÃO	23
2.2 IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i> NO MUNDO	25
2.3 IMPLANTAÇÃO E POSSÍVEIS PERSPECTIVAS E PROBLEMÁTICAS DOS SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i> NO BRASIL.....	26
2.4 PRÁTICAS DE MANEJO DO MATERIAL DE COMPOSTAGEM	27
2.4.1 Materiais de cama.....	29
2.4.2 Área de cama por animal.....	30
2.5 PROCESSO DE COMPOSTAGEM DA CAMA NOS SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i>	32
2.5.1 Características da cama que interferem no seu processo de compostagem	33
2.5.1.1 Umidade da cama	33
2.5.1.2 Temperatura da cama	34
2.5.1.3 Potencial hidrogeniônico (pH)	36
2.5.1.4 Concentração de nutrientes da cama	36
2.5.1.5 Aeração da cama	37
2.6 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E ARQUITETÔNICAS GERAIS DAS INSTALAÇÕES <i>COMPOST BARN</i>	37
2.7 EFEITOS DO AMBIENTE SOBRE O CONFORTO TÉRMICO, BEM-ESTAR E DESEMPENHO DE BOVINOS DE LEITE EM INSTALAÇÕES <i>COMPOST BARN</i>	40
2.7.1 Temperatura e umidade relativa do ar	40
2.7.2 Índices de conforto térmico.....	42
2.7.3 Escore de sujidade e locomoção.....	43
2.7.4 Produção de leite	45
2.8 SISTEMAS DE ACONDICIONAMENTO TÉRMICO AMBIENTE UTILIZADOS EM INSTALAÇÕES <i>COMPOST BARN</i>	46

2.8.1	Sistemas de ventilação natural e ventilação mecânica	46
2.8.2	Sistema de ventilação mecânica ou artificial por pressão positiva	48
2.8.3	Sistema de ventilação por pressão negativa	49
2.8.4	Processo de resfriamento adiabático evaporativo	54
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		58
3. CAPÍTULO II: ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS EM INSTALAÇÃO COMPOST BARN COM SISTEMA DE VENTILAÇÃO NEGATIVA EM MODO TÚNEL		67
3.1	INTRODUÇÃO	70
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	72
3.2.1	Caracterização e descrição da instalação <i>Compost Barn</i>	72
3.2.2	Instrumentos e medições ambientais	74
3.2.2.1	Sistema de coleta das variáveis microclimáticas.....	74
3.2.2.2	Índices de conforto térmico	76
3.2.3	Análise Estatística	77
3.2.3.1	Análise descritiva	77
3.2.3.2	Geoestatística	77
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
3.3.1	Avaliação do Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo.....	78
3.3.2	Geoestatística	82
3.3.3	Níveis de ruído	101
3.4	CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
4. CAPÍTULO III: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DA CAMA, INDICADORES DE BEM-ESTAR ANIMAL E PRODUÇÃO DE LEITE EM INSTALAÇÃO COMPOST BARN FECHADA COM SISTEMA DE VENTILAÇÃO NEGATIVA EM MODO TÚNEL		109
4.1	INTRODUÇÃO	112
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	113
4.2.1	Caracterização e descrição da instalação <i>Compost Barn</i> Fechada.....	113
4.2.2	Sistema de coleta das variáveis microclimáticas.....	117
4.2.3	Caracterização da cama	117

4.2.3.1	Temperatura, umidade e pH da cama.....	117
4.2.3.2	Propriedades químicas do material de compostagem	119
4.2.4	Indicadores de bem-estar animal.....	120
4.2.5	Produção média de leite	121
4.2.6	Análise Estatística	121
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	123
4.3.1	Análise das variáveis microclimáticas	123
4.3.2	Análise geoestatística – Temperatura, teor de umidade e pH do material de compostagem da cama	125
4.3.3	Análise química do material de compostagem.....	139
4.3.4	Indicadores de bem-estar.....	142
4.3.4.1	Escore de Sujidade	142
4.3.4.2	Escore de Claudicação	144
4.3.5	Produção de leite	145
4.4	CONCLUSÕES.....	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
5.	CONCLUSÃO GERAL E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	156

1. INTRODUÇÃO GERAL

A busca por técnicas que aumentem a produtividade animal e qualidade do leite, com o uso racional dos recursos, compatíveis com o clima regional e que contribuam para amenizar ou impedir os efeitos deletérios que ambientes térmicos inadequados possam afligir sobre as vacas em seu período de lactação, constitui um dos principais desafios da atividade de produção leiteira moderna.

No Brasil, a cadeia produtiva do leite tem passado por importantes transformações, nas últimas décadas, registrando grande crescimento de produção e consumo. Atualmente o país ocupa a quarta posição entre os maiores produtores mundiais de leite, ficando atrás apenas da Índia, EUA e Paquistão. Segundo o Anuário de Leite (Embrapa, 2020), no ano de 2018 foram produzidos, no país, 33,8 bilhões de litros de leite. Entretanto, a produtividade animal no Brasil ainda é baixa comparada aos patamares da Europa e América do Norte, uma vez que os bovinos de alta aptidão leiteira são, principalmente, originários de países de clima temperado.

Assim, um problema a ser enfrentado pelo Brasil é o fato do clima predominante no país ser tropical e subtropical. Em condições naturais, nos momentos e períodos mais quentes do dia e do ano, isto pode repercutir em expressiva redução na produtividade e qualidade do leite.

Desta forma, para que a bovinocultura de leite brasileira possa garantir a manutenção de resultados satisfatórios na produção, demanda-se, cada vez mais, dedicação e investimentos por parte dos produtores, de maneira a adaptarem sua atividade de forma a vencer os inúmeros desafios advindos das condições climáticas do país.

Neste sentido, as instalações para o confinamento de vacas leiteiras devem ser bem projetadas, para promover o máximo conforto do animal e mitigar os efeitos de fatores climáticos que possam interferir negativamente na qualidade da produção. Dentre as opções que indicam ser economicamente acessível e tecnicamente promissora para a pecuária leiteira, podendo possibilitar melhorias nos problemas térmicos enfrentados no campo, o sistema *Compost-Bedded Pack Barn* (CBP), comumente denominado de *Compost Barn* (CB) pode ser interessante para as condições climáticas do Brasil.

O sistema CB, já vem sendo usado, com sucesso, há cerca de duas décadas na bovinocultura leiteira de regiões de climas temperados, como Estados Unidos e Europa, mas ainda há grande carência de respostas quanto à aplicabilidade deste sistema para as condições de climas tropicais e subtropicais e tipologia construtiva praticada no Brasil, muito embora tal sistema já venha sendo implantado neste país, especialmente na última década.

Os principais motivos que tem despertado o interesse dos produtores brasileiros a optar por este tipo de sistema de confinamento referem-se ao maior conforto, saúde, longevidade dos animais, manejo dos dejetos e facilidade para completar as tarefas diárias (Barbeg et al., 2007). As instalações CB têm sido consideradas como um sistema de confinamento mais sustentável do que as tradicionais instalações de produção de leite (Bewley et al., 2017).

No sistema CB, o alojamento animal geralmente é projetado de tal forma a dispor de uma área de “cama” onde as vacas circulam livremente, um corredor de alimentação, onde é distribuída a ração e uma pista de trato. A “cama” é o elemento de destaque neste sistema, tendo como objetivo receber as dejeções dos animais e incorporá-lo ao material base (maravalha, serragem, casca de café, casca de amendoim, entre outros) formando um composto rico de grande aplicabilidade agrícola, ao mesmo tempo em que causa conforto aos animais pela maciez para o pisoteio.

Assim, para cumprir sua função adequadamente, a cama deve ser revolvida, de duas a três vezes ao dia, para fornecer a necessária superfície seca, macia e confortável para os animais, e garantir o seu mencionado principal diferencial, que é a ocorrência do processo de compostagem aeróbia do substrato componente, compostagem esta a qual é induzida pela constante homogeneização dos dejetos animais associados à aeração da cama orgânica (Janni et al., 2007; Leso et al., 2020).

As condições microclimáticas da instalação CB influenciam no conforto térmico e, conseqüentemente, no bem-estar dos animais, possuindo relação direta com a qualidade da cama (Black et al., 2013). Neste sentido, a utilização de sistemas de acondicionamento térmico ambiente passa a ser imprescindível nas instalações CB, como recurso para amenizar a temperatura dentro da instalação e contribuir para a renovação e qualidade do ar e o bem-estar dos animais, auxiliando na secagem da cama e no processo de compostagem.

Em condições de valores de temperatura e umidade do ar e/ou da cama elevados, torna-se imperativo a adoção de sistemas de ventilação eficientes para ajudar a manter estes índices sob controle e em níveis adequados para o processo de compostagem da cama, o que representa um dos principais desafios para o sucesso do sistema CB.

No Brasil, a maioria das instalações CB são abertas nas laterais, podendo ser ventiladas naturalmente ou utilizando-se de ventilação mecânica (artificial) por pressão positiva. Porém, recentemente, foram implementadas, no país, algumas instalações *Compost Barn* Fechadas (CBF), neste caso são obrigatoriamente equipadas com sistemas de ventilação mecânica por pressão negativa. Embora o sistema CB convencional (aberto), já venha sendo

amplamente aderido por grande parte dos produtores de leite no país, o fato é que a adoção do sistema CBF associado com ventilação negativa em modo túnel é relativamente nova para a indústria de laticínios brasileira. O projeto CBF pioneiro reportado foi construído no estado de Minas Gerais, em 2015, e, desde então, já vem se difundindo em diversas regiões do país (Damasceno, 2020). O sistema busca garantir uma ventilação mais uniforme e que proporcione melhores condições de conforto no interior das edificações animais, principalmente, durante os períodos mais quentes do dia e do ano.

Contudo, na medida em que se observa o aumento dessa tecnologia CBF em sistemas de produção de leite no Brasil, também vem se intensificando os questionamentos, por parte dos produtores, quanto a real aplicabilidade de instalações totalmente fechadas para a tipologia construtiva e as condições climáticas presentes no país.

As instalações totalmente fechadas dependem da ventilação mecânica e, geralmente, devem estar associadas ao sistema de resfriamento evaporativo, o qual tem a finalidade de possibilitar a redução da temperatura do ar de ventilação através do uso da evaporação de água durante os períodos mais quentes (Lobeck et al., 2012). Nesse caso, a maneira como o sistema é construído e as adaptações às condições de clima quente podem permitir a manutenção da temperatura e velocidade do ar ideais, desde que se garanta bom gerenciamento dos níveis de umidade relativa, concentração de amônia, dióxido de carbono do ar, entre outros.

Portanto, o conhecimento da variabilidade espacial de atributos do microclima e da qualidade da cama ao longo de toda a área onde permanecem os animais na instalação CB e, em diferentes alturas deste, permite uma visualização espacial que é útil para o planejamento e controle de informações do ambiente de produção. Além de indicar possíveis zonas de estresse no interior da instalação, possibilitando tomadas de decisões para o correto controle ambiental, bem como para melhorias na qualidade da cama, nos índices produtivos e de bem-estar animal, com possível redução nos custos de produção e melhor sustentabilidade econômica e ambiental.

Com base no exposto, pode-se considerar que o sistema CBF apresenta elevado potencial para o adequado desempenho na criação de vacas leiteiras. Entretanto, ainda são escassas na literatura informações sobre a utilização da instalação CBF equipada com sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel, para a tipologia construtiva e as condições climáticas do Brasil. Assim, tendo em vista o crescente interesse de produtores brasileiros pela utilização de sistema CBF e conseqüente intensificação de implantação de muitas unidades no país, justifica-se a presente pesquisa, que visou estudar os aspectos do ambiente

sob o cenário térmico, qualidade da cama e bem-estar animal, possibilitando uma visão de eventuais pontos críticos passíveis de serem melhorados.

1.1 OBJETIVOS

Geral

Avaliar a distribuição espacial das variáveis térmico-ambientais, qualidade de cama e indicadores de bem-estar de vacas em lactação alojadas em instalação *Compost Barn* fechada, com sistema de ventilação negativa em modo túnel, associada a resfriamento adiabático evaporativo, promovido por placas porosas umedecidas, durante as estações climáticas de verão e inverno.

Específicos

- I. Abordagem das principais características e inovações em sistemas *Compost Barn* abertos e fechados, sob os aspectos gerais arquitetônicos e construtivos, qualidade de cama, sistemas de ventilação e indicadores de bem-estar de vacas lactantes;
- II. Avaliar a distribuição espacial e temporal das variáveis térmico-ambientais e índices de conforto térmico ambiental (temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, velocidade do ar, índice de temperatura e umidade, entalpia específica do ar) em instalação *Compost Barn* fechada, durante o verão e inverno;
- III. Caracterizar, avaliar e comparar a distribuição espacial das variáveis da cama, indicadores de bem-estar animal e produção de leite, em instalação *Compost Barn* fechada, durante o verão e inverno.

A fim de reportar os resultados da presente pesquisa, este estudo encontra-se apresentado em três capítulos, assim intitulados:

- Capítulo I – Instalações *Compost Barn* na produção intensiva de leite e sua aplicabilidade para as condições arquitetônico-ambientais do Brasil
- Capítulo II – Análise espacial e temporal das variáveis microclimáticas em instalação *Compost Barn* com sistema de ventilação negativa em modo túnel
- Capítulo III – Distribuição espacial de variáveis da cama, indicadores de bem-estar animal e produção de leite em instalação *Compost Barn* fechada com sistema de ventilação negativa em modo túnel

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barberg, A. E.; Endres, M. I.; Salfer, J. A.; Reneau, J. K. Performance and welfare of dairy cows in an alternative housing system in Minnesota. **Journal of dairy science**, v. 90, n. 3, p. 1575-1583, 2007.
- Bewley, J. M.; Robertson, L. M.; Eckelkamp, E. A. 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 12, p. 10418-10431, 2017.
- Black, R. A.; Taraba, J. L.; Day, G. B.; Damasceno, F. A.; Bewley, J. M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 12, p. 8060-8074, 2013.
- Damasceno, F.A. 2020. **Compost Barn como alternativa para a pecuária leiteira**. 1. ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Anuário Leite 2020**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/198698/1/AnuarioLEITE2019.pdf>. Acesso em: 23 novembro 2020.
- Janni, K. A.; Endres, M. I., Reneau, J. K.; Schoper, W. W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied engineering in agriculture**, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.
- Leso, L.; Barbari, M.; Lopes, M. A.; Damasceno, F.A.; Galama, P.; Taraba, J.L.; Kuipers, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 2, p. 1072-1099, 2020.
- Lobeck, K. M.; Endres, M. I.; Janni, K. A.; Godden, S. M.; Fetrow, J. Environmental characteristics and bacterial counts in bedding and milk bulk tank of low profile cross-ventilated, naturally ventilated, and compost bedded pack dairy barns. **Applied engineering in agriculture**, v. 28, n. 1, p. 117-128, 2012.

CAPÍTULO I

INSTALAÇÕES *COMPOST BARN* NA PRODUÇÃO INTENSIVA DE LEITE E SUA APLICABILIDADE PARA AS CONDIÇÕES ARQUITETÔNICO-AMBIENTAIS DO BRASIL

Instalações *Compost Barn* na produção intensiva de leite e sua aplicabilidade para as condições arquitetônico-ambientais do Brasil

RESUMO

Uma das grandes preocupações no setor da pecuária de leite, em todas as regiões do mundo, certamente tem sido amenizar ou impedir os efeitos deletérios que ambientes inadequados de criação possam afligir sobre as vacas em seu período de lactação. Como uma das alternativas de acondicionar melhor as vacas em produção e propiciar melhor manejo ao resíduo gerado pela atividade, o sistema denominado *Compost Barn* (CB) corresponde a uma alternativa que vem sendo largamente adotada nos países de climas temperados e de maiores produções de leite do mundo. Tal sistema CB vem atraindo o interesse global, inclusive de países de climas tropicais e subtropicais, como é o caso do Brasil, no qual um grande número de produtores tem passado a utilizá-lo em razão das boas respostas à produtividade leiteira. Entretanto, o sistema CB pode ser: a) concebido em instalações abertas (com ventilação natural ou sistema de ventilação por pressão positiva, e que corresponde ao padrão convencional mais difundido, estudado e com resultados positivos no Brasil); b) concebido em instalações totalmente fechadas (munidos por sistemas de ventilação por pressão negativa e controle térmico permanente, sendo implantados no país e, portanto, ainda sem respostas quanto a sua eficiência). Desta forma, as opiniões contraditórias são recorrentes, sendo que há enorme carência de investigações sobre a aplicabilidade do novo sistema CB fechado, para as condições climáticas do Brasil. Nesse sentido, o objetivo desta revisão de literatura foi reunir e descrever algumas das principais características e inovações em sistemas CB, sob o prisma da ambiência, envolvendo os aspectos gerais arquitetônicos e construtivos, qualidade da cama, sistemas de ventilação e indicadores de bem-estar de vacas lactantes, que envolvem os sistemas CB abertos e fechados.

Palavras-chave: bem-estar animal, bovinos de leite, densidade de criação de vacas, estresse por calor, sistemas de resfriamento, ventilação em túnel.

Compost-bedded pack barns in intensive milk production and their applicability to architectural-environmental conditions in Brazil

ABSTRACT

One of the major concerns in the dairy farming sector worldwide has undoubtedly been to alleviate or prevent the harmful effects of inadequate breeding environments on cows during their lactation period. As an alternative to improve the cows' welfare in production and provide better handling of the waste generated by the activity, the system called compost-bedded pack barn (CBP) corresponds to an alternative that has been widely adopted in countries with temperate climates and higher milk production outside Brazil. This CBP system has been attracting global interest, including from countries with tropical and sub-tropical climates, such as Brazil, where many producers have started to use it due to the good responses to milk productivity. However, the CBP system can be: a) designed in an open facility (with natural ventilation or positive pressure ventilation system, which corresponds to the most widespread, studied conventional pattern with positive results in Brazil); b) designed in totally closed facilities (equipped with negative pressure ventilation systems and permanent thermal control). This last system is being implemented in the country, even with insufficient knowledge about its efficiency. Contradictory opinions on the system's efficiency are recurrent, and there is a massive lack of research on the applicability of the new closed CBP system to Brazil's climatic conditions. This literature review aimed to gather and describe some of the main features and innovations in CBP systems, under the environment prism, involving the general architectural and construction aspects, bed quality, ventilation systems, and welfare indicators lactating cows, involving both open and closed CBP systems.

Keyword: animal welfare, dairy cattle, cow stocking density, heat stress, cooling systems, tunnel ventilation.

2.1 INTRODUÇÃO

Os fatores climáticos estão entre os primeiros e cruciais fatores que limitam o desenvolvimento da produção animal, principalmente em regiões de climas quentes, sendo que as necessidades de controle térmico podem variar, substancialmente, de acordo com as condições do clima de cada região (Menconi & Grohmann, 2014). Dessa forma, demanda-se

cada vez mais dedicação e investimentos por parte dos produtores, de maneira a adaptarem suas atividades de forma a vencer os desafios advindos, principalmente, das condições climáticas inadequadas.

Além da adoção de modernas tecnologias para a melhoria do ambiente interior das instalações pecuárias, observa-se também a necessidade de busca por alojamentos que proporcionem a sustentabilidade da produção animal, realçada pela própria tendência de sustentabilidade atualmente sinalizada pelos consumidores. De acordo com Galama et al. (2020), grande parte dos produtores de leite tem optado por sistemas de alojamento que permitam, ao animal, expressar o seu comportamento natural, que os mantenha em conforto térmico, que proporcione redução nas emissões de amônia e gases de efeito estufa e que possibilite o reaproveitamento de resíduos.

De acordo com essas considerações, o confinamento de bovinos de leite em sistemas *Compost Barn* (CB) tem se mostrado promissor para a pecuária leiteira. O sistema vem sendo utilizado, por vários anos e com sucesso, na bovinocultura leiteira de regiões de climas temperados. Neste sistema de criação alternativo, as vacas permanecem em uma extensa área de descanso (área de cama), sem nenhuma das divisórias de contenção encontradas em instalações do tipo *Free Stall* e *Tie Stall* (Eckelkamp et al., 2016a; Bewley et al., 2017; Blanco-Penedo et al., 2020). Os produtores utilizaram a tipologia do sistema com cama convencional e incorporaram métodos de compostagem, através da adição periódica de material fonte de carbono e o revolvimento diário da cama, promovendo a decomposição microbiológica aeróbia do material orgânico (Janni et al., 2007; Shane et al., 2010; Bewley et al., 2017).

Os principais motivos que despertaram o interesse dos produtores de leite a optar por este tipo de sistema de confinamento referem-se ao maior conforto, saúde, longevidade dos animais, manejo dos dejetos e facilidade para completar as tarefas diárias (Barberg et al., 2007b; Black et al., 2013). Cabe ressaltar que, as instalações CB podem ser um sistema de confinamento mais sustentável do que as tradicionais instalações de produção de leite (Bewley et al., 2017).

Entretanto, ainda existe enorme carência de estudos quanto à aplicabilidade do sistema CB para as condições climáticas tropicais e subtropicais do Brasil, não somente para sistemas *Compost Barn* abertos, mas, em especial, para sistemas *Compost Barn* totalmente fechados e climatizados, que vem sendo paulatinamente incorporados ao país.

Dessa forma, objetivou-se, com este trabalho, reunir e descrever algumas das principais características e inovações em sistemas CB, sob o prisma da ambiência,

abrangendo os aspectos gerais construtivos, qualidade de cama, sistemas de ventilação e indicadores de bem-estar de vacas lactantes, que possam nortear respostas quanto a aplicabilidade para as condições climáticas tropicais e subtropicais, e sob tipologia construtiva praticada no Brasil, das duas composições principais e opostas de sistemas CB: instalações fechadas e acondicionadas por sistema de ventilação negativa e instalações abertas, acondicionados naturalmente ou por sistemas de ventilação por pressão positiva.

2.2 IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS *COMPOST BARN* NO MUNDO

O primeiro sistema CB reportado pela literatura foi construído por produtores de leite da Virgínia nos anos 80 (Bewley et al., 2017). Posteriormente, em outubro de 2001, no sul de Minnesota, EUA, produtores dessa região, conhecidos como os irmãos Portners, tiveram a ideia de construir uma instalação diferente, com um novo conceito e sem reproduzir nenhum dos sistemas de produção de leite intensivos até então adotados (Damasceno, 2020).

A ideia desse tipo de instalação surgiu a partir da leitura de um artigo em uma revista agrícola local (*Minnesota Farm Journal*), que descrevia sobre um sistema de produção de leite diferente dos tradicionais que haviam sido construídos no estado da Virgínia, EUA, o qual se baseava em uma instalação aberta, com piso de terra batida, sobre a qual era adicionada a serragem, formando uma área de descanso para os animais se deitarem (Janni et al., 2007; Petzen et al., 2009).

Já em Israel, o primeiro sistema CB foi desenvolvido em 2006 e se espalhou rapidamente entre os produtores de leite, onde na área de cama da instalação não é adicionado nenhum material orgânico, além de fezes e urina de vacas, necessitando revolver o material uma ou duas vezes por dia (Klaas et al., 2010). Essa forma de condução do sistema CB nesta região do mundo foi possível devido às condições áridas de Israel, onde a cama não requer material adicional (Balcells et al., 2020).

Enquanto, nos EUA, o processo de compostagem foi aprimorado, adicionando a serragem ou maravalha como material de cama, sendo este material revolvido duas ou três vezes ao dia, ocorrendo assim a degradação aeróbica do material, o que resulta no aumento da temperatura interna da cama (Janni et al., 2007).

Conforme descrito, os conceitos dos sistemas CB norte-americano e israelense são bastante diferentes e parecem ter fornecido uma base para o desenvolvimento de outros sistemas em todo o mundo (Leso et al., 2020). Portanto, o sistema CB foi e continua sendo difundido em diversas regiões, despertando o interesse de vários produtores, especialmente

nos Estados Unidos, Canadá, Nova Zelândia, Alemanha, Itália, Holanda, Áustria, Dinamarca, Colômbia e Coréia do Sul (Janni et al., 2007; Klaas et al., 2010; Black et al., 2013; Leso et al., 2013; Fávero et al., 2015a; Bewley et al., 2017).

Recentemente, os sistemas CB passaram a serem difundidos em países presentes na América do Sul, principalmente no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai, com as variações nas características da tipologia, materiais de construção e sistemas de climatização comumente empregados no país, mas poucos estudos existem quanto a sua aplicabilidade e eficiência para estas específicas condições.

Marcondes et al. (2019), relatam que em países tropicais da América do Sul, como é o caso do Brasil, o uso do sistema CB aumentou significativamente nos últimos cinco anos, o que gera a demanda por maiores investigações neste campo.

2.3 IMPLANTAÇÃO E POSSÍVEIS PERSPECTIVAS E PROBLEMÁTICAS DOS SISTEMAS *COMPOST BARN* NO BRASIL

As instalações implantadas em clima tropical e subtropical enfrentam um desafio diferente ao dos países de clima temperado, por terem que lidar com elevadas temperaturas e umidade relativa do ar, durante grande parte do ano. Por outro lado, a amplitude térmica é muito baixa nos climas quentes, o que favorece a aplicação de sistemas de condicionamento ambiente com menores demandas de energia, sendo mais econômicos e naturais o que pode ser uma vantagem, se o projeto for adequado.

No Brasil, o primeiro sistema CB aberto reportado, foi construído em 2012 no estado de São Paulo (Mota et al., 2017), seguindo o desenho do modelo norte-americano, sendo preconizado como um indicativo de confinamento animal de baixo custo e economicamente viável para os produtores brasileiros, por ser aberto nas laterais.

Contudo, recentemente, como forma de amenizar as variações do ambiente térmico entre as diferentes estações do ano e facilitar o gerenciamento no manejo do sistema, tem-se observado adesão de produtores brasileiros ao sistema CB fechado (Andrade et al., 2020). O projeto pioneiro do sistema CB fechado foi concebido para receber ventilação por pressão negativa em modo túnel (como é tecnicamente obrigatório nas instalações fechadas), associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE), e foi construído no estado de Minas Gerais, em 2015, e desde então já vem se difundindo em diversas regiões do país (Damasceno, 2020). A grande problemática que reside, contudo, é que os sistemas CB fechado existentes no Brasil, são concebidos com fechamentos e coberturas sem isolamento

térmico, o que impede um controle adequado e econômico da temperatura interna do alojamento dentro das faixas de conforto térmico exigida pelas vacas leiteiras.

Sabidamente, o sistema CB fechado tem como principal objetivo garantir uma ventilação mais uniforme e que proporcione melhores condições de conforto no interior da instalação, principalmente, durante os períodos mais quentes do dia e do ano (Damasceno, 2020). Porém, a falta de isolamento dos paramentos laterais e das coberturas pode comprometer esta eficácia drasticamente e ainda são escassos estudos para avaliar o comportamento térmico dos alojamentos CB fechado no Brasil. Entre os fatores que podem ser afetados negativamente estão à qualidade de cama, o bem-estar animal, a limpeza dos animais, o comportamento animal, o desempenho produtivo, qualidade do ar, entre muitos outros, e que precisam ser investigados.

Da mesma forma, alguns pontos críticos de bem-estar de bovinos de leite indesejáveis e reconhecidos internacionalmente como nocivos às vacas leiteiras, podem ocorrer, mas parecem prováveis de serem contornáveis e adaptáveis de uso no sistema CB para as condições climáticas brasileiras, contudo, ainda carecem de respostas, especialmente para o sistema CB fechado. Atualmente, o número exato de sistemas CB abertos e fechados no Brasil são desconhecidos, mas o número de novos sistemas cresce rapidamente (Leso et al., 2020). Além da quantidade de sistemas CB fechados muito expressiva nas regiões sul e sudeste do Brasil, também já se observa a expansão dos novos sistemas CB fechados nas regiões centro-oeste, norte e nordeste.

Com base no exposto, para se traçar uma avaliação relativa à aplicabilidade do sistema CB aberto e fechado para o Brasil, alguns pontos relevantes devem ser discutidos, dentre os quais os princípios que regem a compostagem do substrato cama, as práticas de manejo do material de compostagem, seu material constituinte, a densidade de alojamento das vacas, entre outros, a serem discutidos neste estudo.

2.4 PRÁTICAS DE MANEJO DO MATERIAL DE COMPOSTAGEM

É importante salientar que o manejo da cama nos sistemas CB abertos e fechados devem ser realizados de forma criteriosa. Black et al. (2014) ressaltam que os produtores devem gerenciar a instalação para manter a área de cama com superfície seca e, assim, evitar piora no escore de higiene das vacas e aumento de contagem de células somáticas (CCS). A literatura recomenda o revolvimento da cama de duas a três vezes ao dia, preferencialmente na saída dos animais para a ordenha (Janni et al., 2007; Black et al., 2014; Leso et al., 2020).

Porém, sistemas CB abertos localizados em Israel e Dinamarca têm optado por realizar o revolvimento da cama apenas uma vez ao dia (Klaas et al., 2010). Em regiões com invernos mais rigorosos, a aeração frequente pode resultar em uma perda excessiva de calor da cama, perturbando, assim, o processo de compostagem (Leso et al., 2020). Para sistemas CB fechados no Brasil, o revolvimento da cama tem sido realizado seguindo as mesmas recomendações dos sistemas CB abertos, ou seja, de duas a três vezes por dia, geralmente no horário da ordenha (Andrade et al., 2020).

A profundidade de revolvimento varia de acordo com o manejo praticado pelo produtor e tipo de implemento utilizado, mas estudos recomendam as profundidades de 18 a 30 cm (Barberg et al., 2007a; Janni et al., 2007). O principal objetivo do processo de revolvimento é introduzir oxigênio nas camadas superiores da cama, promover a degradação microbiana aeróbica, que faz com que o calor resultante do processo ajude na secagem da camada superficial do material (Petzen et al., 2009).

O revolvimento auxilia na incorporação de nutrientes, misturando o carbono oriundo do material utilizado na cama, com o nitrogênio proveniente dos dejetos dos animais (Petzen et al., 2009). Durante o processo de revolvimento, o vapor d'água é visível, indicando uma temperatura mais alta do composto em comparação com a do ar, o que mantém o processo de compostagem ativo (Leso et al., 2020). A observação deste vapor d'água durante o revolvimento é um bom sinal de que o composto está aquecendo (Bewley et al., 2012).

Klaas et al. (2010) enfatizam que a geração de calor a partir dos processos de compostagem torna-se crucial para o funcionamento do sistema. Outro ponto importante é evitar revolver a base do solo compactado junto com o material de cama, sendo que isto se torna mais susceptível de ocorrer quando a cama tem profundidade inferior a 0,30 m (Janni et al., 2007).

O tempo entre a adição de nova camada de material da cama depende da área disponível por animal, condições climáticas, taxa de ventilação (troca de ar), tipo de material da cama, sendo que mais quantidade de material é necessária durante o tempo úmido e se houver troca de ar insuficiente no interior do sistema CB (Janni et al., 2007). Estudos realizados por Llonch et al. (2020) e Eckelkamp et al. (2016b), indicam que mais material de cama foi necessário ser adicionado quando a umidade da cama foi superior a 55-60%.

No sistema CB é necessário equipamento específico para lidar, tanto com o manejo do material sólido, como também com os resíduos líquidos proveniente da limpeza do corredor de alimentação (Janni et al., 2007). Conforme destacado por Leso et al. (2018), quando comparado ao sistema de confinamento *Free Stall* (FS), o emprego do sistema CB permite

produzir mais quantidades de resíduos sólidos; em contrapartida, reduz a quantidade de resíduos líquidos.

Normalmente, nos sistemas CB abertos, a cama é totalmente renovada a cada 6 a 12 meses (Leso et al., 2020). Contudo, esta renovação depende das características construtivas da instalação, área de cama disponível por animal, teor de umidade, práticas de manejo, entre outros fatores. De acordo com Klaas et al. (2010), o composto removido da instalação pode ser espalhado diretamente nos campos, quando necessário, sendo que os custos de transporte são baixos em comparação com o esterco líquido oriundo de outros tipos de instalações. Nos sistemas CB abertos e fechados, os benefícios adicionais incluem o uso do material compostado para armazenamento dos dejetos dos animais, e a possibilidade de comercialização do material para gerar uma linha adicional de receita para a propriedade (Petzen et al., 2009).

Nos tradicionais sistemas de confinamento para bovinos de leite, o manejo de dejetos representa um desafio crescente para os produtores, sendo necessários altos investimentos em sistemas para o tratamento adequado dos resíduos. Neste sentido, tem sido observado que as instalações CB com corredor de alimentação (com piso de concreto) têm gerado aproximadamente 30% a menos de efluentes líquidos, quando comparado com um sistema FS tradicional (Mota et al., 2017).

2.4.1 Materiais de cama

Para a escolha do melhor material de cama devem ser considerados os nutrientes para os microrganismos, conforto dos animais, disponibilidade e a relação custo-benefício (Damasceno, 2020). Em sistemas CB abertos e fechados para vacas leiteiras tem sido comum o uso, principalmente de serragem e maravalha como material de cama. Este material como fonte de carbono tem sido claramente satisfatório, sobretudo, em decorrência da combinação de absorvência e forma estrutural, tornando um tipo de material ideal para o sistema CB (Petzen et al., 2009).

Shane et al. (2010) observaram que diferentes tipos de materiais de cama (serragem, maravalha, palha de trigo, palha de soja, espigas de milho e combinações de materiais) utilizados em sistema CB aberto, em Minnesota, EUA, foram capazes de iniciar a atividade microbiana e produzir calor quando foram revolvidos pelo menos duas vezes ao dia. No entanto, a preferência dos produtores foi pela serragem.

Mais recentemente, Llonch et al. (2020), em estudo em instalações CB aberta, compararam a serragem com um material alternativo, a biomassa florestal (composto formado

principalmente de cascas de árvores e fibras vegetais de uma floresta mediterrânea). Os resultados indicaram que o desempenho do processo de compostagem da cama e o conforto das vacas foram realmente melhorados com a cama de serragem, porém, as contagens de algumas espécies microbianas foram melhores controladas quando utilizado a biomassa florestal.

Em sistemas CB fechados no Brasil, grande parte dos produtores de leite tem escolhido utilizar como material de cama, a maravalha, serragem e/ou casca de café; poucos produtores têm optado por utilizar a palha de arroz e, mesmo assim, quando utilizada, tem ocorrido em quantidades reduzidas e com certa cautela (Andrade et al., 2020). A casca de arroz apresenta alta dureza superficial, baixa capacidade de absorção e elevado teor de sílica que proporciona dificuldades na degradação biológica da cama (Damasceno, 2020).

Radavalli et al. (2020) observaram que no Oeste do estado de Santa Catarina, Brasil, os materiais mais utilizados como cama foram a serragem (70% dos sistemas CB abertos), uma mistura de serragem e maravalha (26,7% dos sistemas CB abertos) e apenas maravalha (3,3% dos sistemas CB abertos).

Na Dinamarca, a serragem e maravalha são matérias-primas valiosas para a produção de energia verde e, portanto, foi planejada a utilização de materiais de cama mais baratos, como resíduos de jardim, raízes picadas e vegetação típica da região (Bjerg & Klaas, 2014). De acordo com os autores ainda demandam-se mais estudos sobre a eficiência desses outros materiais.

Cabe ressaltar que, em muitas das fazendas comerciais de laticínios, o material de cama é selecionado com base na viabilidade econômica, conforto das vacas, limpeza e saúde do úbere (Fournel et al., 2017). Outro ponto a ser considerado é que o material de cama é dependente da disponibilidade e custo nas diferentes épocas do ano. Porém, deve-se atentar ao tipo e manejo do material de cama escolhido, visto que são as principais fontes de exposição ao patógeno da mastite (Barberg et al., 2007b).

2.4.2 Área de cama por animal

No sistema CB, no mínimo todas as vacas devem ser capazes de deitar ao mesmo tempo, enquanto ainda permite espaço para as vacas irem para o comedouro e bebedouro (Janni et al., 2007). Os resultados revisados com relação a área de cama por animal em sistemas CB estão resumidos na Tabela 2.1.

Em Minnesota, EUA, pesquisadores recomendaram a área de cama por animal de 7,4 m² vaca⁻¹ para uma vaca Holandesa de 540 kg ou 6,0 m² vaca⁻¹ para uma vaca Jersey de 410

kg (Janni et al., 2007). Em Israel utiliza-se a área de cama por animal de 20 a 30 m² vaca⁻¹ (Klaas et al., 2010). Em Kentucky, EUA, a área de cama por animal recomendada é de 9 m² vaca⁻¹ (Black et al., 2013). Em Barcelona, Espanha, a área de cama por animal recomendada é de 12,5 m² vaca⁻¹ (Llonch et al., 2020).

Tabela 2.1 – Área de cama por animal em diferentes sistemas CB abertos.

Autores	Local	Raça	Área de cama (m² vaca⁻¹)
Janni et al. (2007)	Minnesota (EUA)	Holandesa	7,4
		Jersey	6,0
Klaas et al. (2010)	Israel	Holandesa	20 a 30
Black et al. (2013)	Kentucky (EUA)	Holandesa, Jersey e mistura de raças diferentes	9
Llonch et al. (2020)	Barcelona (Espanha)	Holandesa	12,5
Fernández et al. (2020)	Girona (Espanha)	Friesian	9,2
Oliveira et al. (2019b)	Minas Gerais (Brasil)	Holandesa e Gir	10,7
Fávero et al. (2015a)	São Paulo (Brasil)	Holandesa Simental	10,4
Radavelli et al. (2020)	Santa Catarina (Brasil)	-	11 - 19
Pilatti et al. (2019)	Paraná (Brasil)	Holandesa e Jersey	14,6
			16,4

Alguns estudos brasileiros relataram que, no país, a área de cama por animal adotada foi de 10,4 m² vaca⁻¹, no sul do estado de Minas Gerais (Oliveira et al., 2019b); de 11 a 19 m² vaca⁻¹, no estado de São Paulo (Fávero et al., 2015a); de 14,6 m² vaca⁻¹ no Oeste do estado de Santa Catarina (Radavelli et al., 2020); de 16,4 m² vaca⁻¹ no Paraná. Segundo Caldato et al. (2020), no Brasil, para vacas em lactação o valor mínimo dimensionando de área de cama por animal deve ser 15 m² vaca⁻¹; já para vacas secas, como consomem menores quantidades de alimento e, conseqüentemente, o volume de fezes e urina é menor, a área de cama pode ser dimensionada com um valor mínimo de 12 m² vaca⁻¹. Leso et al. (2020) sugeriram que, devido às diferentes condições climáticas no Brasil, a área de cama recomendada é de 10 e 12 m² vaca⁻¹ para as regiões centro-oeste e sudeste do país, respectivamente.

As diferenças observadas para a área de cama por animal são devidas a vários fatores, podendo-se citar o clima de cada localidade, tipologia construtiva da instalação, taxa de ventilação para secagem da cama, revolvimento da cama e o tipo de material de compostagem. Em clima quente, seco e bem ventilado, é provável que ocorra a secagem mais

rápida da cama, resultando na redução do espaço disponível por vaca (Janni et al., 2007). No entanto, em condições de clima frio e úmido, podem ser necessárias grandes quantidades de material para manter a superfície adequadamente seca e confortável para as vacas (Leso et al., 2020).

2.5 PROCESSO DE COMPOSTAGEM DA CAMA NOS SISTEMAS *COMPOST BARN*

A compostagem é caracterizada por ser um processo de decomposição aeróbia controlada e de estabilização da matéria orgânica em condições que permitam o desenvolvimento de temperaturas termofílicas (oriunda de uma produção calorífica de origem biológica), e tem como resultado um produto final estável, sanitizado e rico em compostos (Valente et al., 2009).

O processo de compostagem é desenvolvido por uma população diversificada de microorganismos que, nas fases principais, apresentam degradação ativa (necessariamente termofílica) e, posteriormente, maturação ou cura (Pereira Neto, 2007). No processo de compostagem, o substrato é o resíduo a ser compostado e as suas características químicas e físicas são fundamentais para a viabilidade do processo (Valente et al., 2009). O teor de umidade, temperatura, relação carbono e nitrogênio (C:N), taxa de aeração, nível de pH e matérias-primas (fezes, urina, materiais de cama, etc.) são fatores que impactam na compostagem, e quando bem gerenciada pode gerar calor devido a degradação biológica do material, podendo chegar a temperaturas internas da cama que resultam na redução de algumas espécies bacterianas patogênicas (Black et al., 2013).

Contudo, os processos microbiológicos que ocorrem na cama do sistema CB indicam que é mais um sistema de semi-compostagem que não percorre completamente todo o processo de compostagem, que possui temperaturas-alvo entre 45 e 55 °C (Black et al., 2014; Llonch et al., 2020). Este processo de semi-compostagem ocorre devido ao fluxo constante de matéria orgânica (fezes, urina e reposição de material de cama), que não permite que o material atinja o ponto final de maturação, alterando o processo estático de compostagem (Galama et al., 2011).

No sistema CB, grande parte do oxigênio (O₂) é proveniente do revolvimento da cama e também, originário da própria ventilação do sistema CB, que é fornecido para a camada aerada da cama por difusão (Bewley & Taraba, 2009). A compostagem quando feita para o tratamento de resíduos orgânicos, deve oferecer um ambiente aeróbio, principalmente, para

que os microrganismos se desenvolvam, diminuindo a emissão de odores e de gases causadores do efeito estufa como o metano e o óxido nitroso (Valente et al., 2009).

A compostagem depende de microrganismos para quebrar a matéria orgânica e produzir dióxido de carbono (CO_2), vapor de água (H_2O) e calor, sendo que no sistema CB, as fezes e urinas liberadas pelas vacas fornecem os nutrientes essenciais (carbono, nitrogênio, umidade e microrganismos) para o processo de compostagem (Bewley & Taraba, 2009).

Em um sistema CB, a profundidade da cama que é aerada chama-se zona óxica e atua como uma leira de compostagem aeróbica frequentemente revolvida com temperaturas aumentando para a faixa de 45 a 60 °C, quando ocorrem adequadas condições de compostagem (Damasceno, 2012). A camada profunda da cama que não é revolvida pelo implemento agrícola, possui baixas concentrações de O_2 disponível, sendo que ocorre, nessa região, o processo de decomposição anaeróbia, chamada de zona anóxica (Damasceno, 2012).

2.5.1 Características da cama que interferem no seu processo de compostagem

A compostagem é influenciada por diversos fatores que afetam a atividade microbológica e devem apresentar-se dentro de um intervalo adequado para o processo de decomposição. Entre os principais fatores destacam-se: umidade, temperatura, aeração, pH e concentração de nutrientes (Pereira Neto, 2007).

2.5.1.1 Umidade da cama

O teor de umidade da cama deve ser rigorosamente acompanhado pelo produtor. O teor ideal de umidade para compostagem deve, portanto, ser um compromisso entre atingir a umidade adequada para a sobrevivência dos microrganismos e o fluxo adequado de oxigênio para manter as condições aeróbias (Damasceno, 2012).

O teor de umidade do composto afeta as propriedades estruturais e temporais dos materiais, bem como a taxa de biodegradação (Stentiford, 1996). As fezes, urina e atividade microbiana produzem uma fonte de umidade na cama, que idealmente deveria estar entre 45 a 55 %, mas uma faixa operacional de teor de umidade que pode ainda ter atividade significativa está entre 40 a 60 % (Bewley et al., 2013). O excessivo teor de umidade (acima de 60 %) desloca grande parte do ar presente nos espaços porosos do material, restringindo assim, grande parte de concentração de oxigênio (O_2), induzindo a uma condição anaeróbia (Damasceno, 2020). A inibição marcada da atividade microbológica ocorre quando os valores de umidade ficam abaixo de 35 % (Stentiford, 1996).

A temperatura do ambiente também tem influência no teor de umidade interna do sistema CB. Eckelkamp et al. (2016a) observaram que o teor de umidade aumenta ao longo dos meses mais frios do ano, provavelmente, em decorrência de uma taxa de secagem mais lenta do material de compostagem. Outro ponto destacado por Fávero et al. (2015a), é que a umidade da cama é positivamente associada ao risco de mastite clínica.

2.5.1.2 Temperatura da cama

A temperatura da cama é considerada um dos principais parâmetros para avaliação do processo de compostagem, e a sua avaliação representa um dos principais instrumentos que os produtores podem utilizar no gerenciamento da cama do sistema CB. Na camada aerobiamente ativa (15 a 30 cm) a faixa de temperatura deve-se situar entre 43,0 a 65,0 °C (NRAES-54, 1992; Black et al., 2013). As temperaturas internas da cama mais altas no processo de compostagem (55 a 65 °C) pode promover a redução de microrganismos patógenos (Stentiford, 1996).

De acordo com Eckelkamp et al. (2016a), para uma compostagem eficaz, a temperatura e umidade interna da cama devem ser mantidas em níveis adequados, sendo que a manutenção de valores de temperatura na faixa de 54 a 65 °C por 3 a 4 dias pode até mesmo inativar alguns patógenos e vírus, destruir sementes de ervas daninhas e larvas de moscas, o que é muito benéfico para o processo.

No sistema CB, estudos citam que a temperatura ambiente é um preditor da temperatura e umidade da cama do sistema CB (Llonch et al., 2020), e que a temperatura da camada aerada fica acima da temperatura ambiente, indicando a ação de microrganismos decompondo a matéria orgânica (Janni et al., 2007; Shane et al., 2010).

Eckelkamp et al. (2016b) avaliaram as diferenças entre as camas de instalação CB com cama de serragem e instalação FS com cama de areia. As variações anuais nas temperaturas da superfície das camas não foram diferentes entre os dois tipos de instalação e eram similares às temperaturas ambientes. De acordo com os mesmos autores, a similaridade da temperatura da superfície da cama da instalação CB com a da instalação FS indica que a alta temperatura interna presente na cama pode não afetar adversamente o conforto dos animais alojados em instalações CB.

No entanto, as variações da temperatura interna da cama relatadas por pesquisadores em diversas regiões com condição climática adversa diferem expressivamente. A Tabela 2.2 apresenta alguns resultados encontrados na literatura sobre a temperatura e teor de umidade na

camada aerada da cama em diferentes sistemas CB abertos, localizados nos EUA, Europa e Brasil.

Tabela 2.2 - Resultados encontrados na literatura sobre a temperatura e teor de umidade na camada aerada da cama em diferentes sistemas CB abertos.

Autores	Local	Material de cama	Área de cama m² vaca⁻¹	Profundidade (cm)	Temperatura (°C)	Teor de umidade (%)
Eckelkamp et al. (2016a)	Kentucky (EUA)	S, M	-	20	43,2 ± 8,9 - 47,2 ± 6,1	59,9 ± 6,6
Black et al. (2013)	Kentucky (EUA)	S	9	0 10,2 20,3	10,5 ± 8,0 32,3 ± 10,6 36,1 ± 11,0	56,1 ± 12,4
Biasato et al. (2019)	Piemonte (Itália)	R+V	25	5	31,02±1,5	48,12±5,85
Llonch et al. (2020)	Barcelona (Espanha)	S BF	12,5	15	32,2 24,3	63,6 66,4
Brasil						
Radavelli et al. (2020)	Santa Catarina	S, S+M, M	14,6	0 20	25,2 ± 1,7 42,5 ± 6,6	48,4 ± 10,1
Oliveira et al. (2019b)	Minas Gerais	S, M, CC	10,4	20	35,9 ± 3,9	36,9 ± 5,2
Guesine (2020)	Minas Gerais	PA	8,7	0 20	22,7 30,2	- 53,75
Fávero et al. (2015b)	São Paulo	CA, S, M	11-19	0 20	26,9 ± 3,0 53,9 ± 2,7	37,4 ± 4,0

S= serragem; M= maravalha; CC = casca de café; R+V = resíduos de alimentos domésticos (60%) e vegetais (40%); CA= casca de amendoim; BF=biomassa florestal (casca de árvore e fibras vegetais); PA=palha de arroz.

Grande parte dos resultados descritos pela literatura (Tabela 2.2), de temperatura e teor de umidade, indica que estavam fora dos padrões recomendados para compostagem eficaz: temperatura do sistema CB, em profundidades de 15 a 30 cm, variação de 43,0 a 65,0 °C, e umidade com variação de 40 a 60 % (NRAES-54, 1992, Janni et al., 2007; Bewley et al., 2013), sendo que não atingiram o nível de higienização da cama exigido. Estas variações podem ser atribuídas à diferença no número e profundidade das regiões dos sistemas CB abertos amostradas, pelas diferenciações climáticas entre as localidades e área de cama por animal adotada.

A qualidade da cama nas condições internas de sistemas CB abertos tem sido relatada por algumas literaturas, a fim de avaliar as condições de manejo e propor melhorias. No

entanto, ainda são escassos resultados sobre a qualidade de cama em sistemas CB fechados, com ventilação por pressão negativa, sobretudo em diferentes estações do ano.

2.5.1.3 Potencial hidrogeniônico (pH)

De acordo com a NRAES-54 (1992), durante o processo de compostagem, a faixa ideal de pH deve estar entre 6,5 a 8,0. No entanto, Rodrigues et al. (2006) enfatizam a faixa de pH considerada ótima para crescimento microbiano de 5,5 a 8,5. O pH em níveis elevados resulta em alta volatilização da amônia quando o material da cama é exposto ao ar, especialmente quando o sistema CB for esvaziado, assim como também durante e após a aplicação no solo (Russelle et al., 2007). Para valores de pH superiores a 10 são observados períodos de estagnação do processo de compostagem. Os valores extremos de pH podem ser automaticamente regulados pelos microrganismos por meio da degradação de compostos que produzirão subprodutos ácidos ou básico, atendendo a necessidade do meio (Pereira Neto, 2007).

Radavelli et al. (2020) analisaram 30 instalações CB abertas no estado de Santa Catarina, Brasil, e observaram o pH da cama em média de 8,7. De acordo com os mesmos autores, esses resultados podem ser atribuídos ao tempo prolongado de utilização do material de cama.

2.5.1.4 Concentração de nutrientes da cama

A descrição dos microrganismos que participam do processo de compostagem é complexa, as populações e comunidades mudam continuamente em função da evolução das condições ambientais, disponibilidade de nutrientes, concentração de O₂, teor de água e pH no decorrer da compostagem, contudo, pode ser projetado para melhorar e acelerar sua eficiência (Beffa, 2002).

O cálculo da razão C:N é um componente crítico ao determinar a eficácia de um sistema de compostagem. Segundo Leso et al. (2020), no sistema CB, a quantidade de carbono necessária para a compostagem, proveniente da adição de material orgânico, está diretamente relacionada com a quantidade de nitrogênio presente, cuja principal fonte é a urina e fezes dos animais.

A relação C:N na faixa de 25-30:1 representa o momento de máxima compostagem dos nutrientes pelos microrganismos (NRAES-54, 1992). A relação C:N diminui à medida que a compostagem avança, devido à conversão de Carbono Orgânico em CO₂, ao mesmo tempo, parte do nitrogênio pode ser perdida na forma de amônia (NH₃) (Beffa, 2002). A razão

C:N abaixo de 25:1 pode aumentar a emissão de odor e influenciar nos níveis de amônia no sistema CB (Rosen et al., 2000). Por outro lado, proporções de C:N superiores a 30:1, o solo usa mais nitrogênio para quebrar o excesso de carbono, do que é liberado para o crescimento da planta, resultando em menos nitrogênio disponível para a cultura (Russelle et al., 2007). Em estudo desenvolvido por Black et al. (2014), os autores observaram a relação média de C:N de $26,7 \pm 7,8$, com variação de 11,3 a 43,2, em instalações CB em Kentucky (EUA). Shane et al. (2010) relataram que a relação C:N variou de 16 a 26 durante o inverno e de 13 a 18 durante o verão, em instalações CB. Radavelli et al. (2020) observaram que instalações CB localizadas no Sul do Brasil apresentaram a relação C:N com valores modestos, com média de 5,9.

2.5.1.5 Aeração da cama

A aeração da cama tem como principal objetivo prover a demanda de oxigênio requerida pela atividade microbiológica e atuar como agente de controle da temperatura (Pereira Neto, 2007). De acordo com o mesmo autor, a aeração é feita de acordo com a matéria-prima, por meio de ciclos de revolvimento e de ferramentas específicas. Diversos métodos de aeração podem ser usados, dependendo do sistema de compostagem. A taxa de aeração vai depender do tipo de material, temperatura, estágio e condições de compostagem (teor de umidade e estrutura do material) (Stentiford, 1996).

A compactação do material de cama pode ocorrer devido à movimentação dos animais, o que causa a redução dos espaços ocupados por ar (El Kader et al., 2007). O manejo inadequado do sistema CB poderá ocasionar a redução da aeração da cama, elevando o teor de umidade e, conseqüentemente, gerando a redução da temperatura da cama, favorecendo a proliferação de microrganismos patogênicos (Black et al., 2013). Por outro lado, a aeração excessiva pode aumentar as emissões de gases poluentes, como amônia ou óxido nitroso (El Kader et al., 2007).

2.6 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E ARQUITETÔNICAS GERAIS DAS INSTALAÇÕES *COMPOST BARN*

A adequação dos sistemas CB, com evidência na busca de melhores condições de conforto para os bovinos de leite, tem sido notadamente utilizada (Silva et al., 2020). Percebe-se uma grande diversidade dos aspectos construtivos do sistema CB, contudo, ainda não é possível destacar uma solução de tipologia ideal. De fato, uma extensa área de descanso

aberta (cama) e o revolvimento diário do material, parecem ser as únicas características que os diferentes sistemas CB têm em comum, em todo o mundo (Leso et al., 2020).

O calor no interior das instalações pode ser minimizado pela adoção de regras simples e básicas de projeto, como forma, orientação, altura do pé-direito, propriedades termo-físicas dos materiais de construção, ventilação, abertura de instalações, entre outros (Renaudeau et al., 2012).

O primeiro critério de projeto a ser considerado para instalações CB abertas deve ser a orientação da estrutura. Para as condições climáticas brasileiras recomenda-se que sejam construídas com o eixo longitudinal da cumeeira orientado no sentido Leste-Oeste (Baêta & Souza, 2010). Ter a instalação construída no sentido Leste-Oeste evita a radiação solar direta na área de cama durante as horas mais quentes do dia e, também, pode evitar o agrupamento de animais em certas áreas, fator que pode comprometer a qualidade da cama (Radavelli et al., 2020).

Os tipos de telhado variam entre os países e depende do clima, da precipitação, velocidade do vento, carga da neve, entre outros fatores (Galama et al., 2020). No Brasil, para reduzir os custos da construção, é comum o emprego, principalmente, de telhas de aço galvanizado ou alumínio; esses materiais possuem baixo coeficiente de absorção quando novas (alto poder reflexivo) e alto valor de condutividade térmica, portanto, baixo poder de isolamento (Baêta & Souza, 2010; Damasceno, 2020).

A utilização de materiais com maior resistência térmica no telhado permite uma eficiente melhoria no controle da temperatura interna da instalação (Menconi & Grohmann, 2014). Em climas quentes, esses materiais podem reduzir o fluxo de calor do telhado para a instalação, permitindo uma melhor condição de conforto térmico (House, 2016). Os materiais com baixa qualidade e a inadequação geral das estruturas levam a maiores dificuldades no controle do microclima interno. A inclinação do telhado entre 15° e 25° tem sido considerada satisfatória para os sistemas CB abertos (Bewley et al., 2012).

Para evitar que o excesso de umidade entre na cama, os beirais do telhado não devem ser inferiores a 1,0 m (Bewley et al., 2012). No entanto, Oliveira et al. (2019b) observaram a predominância de beirais de 2,0 a 3,0 m, em instalações CB abertas no Sul do estado de Minas Gerais, Brasil. Já para instalações CB fechadas, com ventilação por pressão negativa, o fechamento lateral por lonas evita a conseqüentemente entrada de água das chuvas, não sendo necessário beirais muito largos (Caldata et al., 2020).

De qualquer forma, além das características dos materiais dos fechamentos, existem outros fatores que devem ser considerados por influenciarem o ambiente térmico interno da

instalação animal, por exemplo, ventilação, penetração da radiação solar e processos ou equipamentos que liberam calor no interior da edificação (Baêta & Souza, 2010).

No Brasil, a adoção de largura da instalação CB de aproximadamente 20,0 m tem sido utilizada com certa frequência (Oliveira et al., 2019b; Radavelli et al., 2020). No sul do estado de Minas Gerais, Brasil, foi comum encontrar medidas do comprimento da instalação de 73,3 m (Oliveira et al., 2019b). Cabe ressaltar que, visando reduzir custos com terraplanagem e dificuldades com o manejo dos animais e da cama, devem-se evitar instalações com comprimentos superiores a 200 m (Damasceno, 2020). Em relação ao pé-direito do sistema CB, recomenda-se a altura mínima de 4 m (Caldato et al., 2020).

De forma geral, a estrutura física das instalações CB abertas e fechadas são compostas por área de descanso (cama), corredor de alimentação, pista de trato, comedouros, bebedouros, muretas e passagem de acesso para o corredor de alimentação (Damasceno, 2020).

A área de cama ($\text{m}^2 \text{ vaca}^{-1}$) é um dos pontos-chave no projeto de sistemas CB (Leso et al., 2020). Também é importante lembrar que menores áreas de cama por animal irão concentrar maiores volumes de urina e fezes, gerando mais umidade na cama e maiores dificuldades de manejo (Caldato et al., 2020). O nível do piso sob a área da cama deve ser projetado para manter a superfície da cama no mesmo nível que o piso do corredor de alimentação, sendo que a profundidade da cama pode variar de 0,20 m a mais de 1 m (Leso et al., 2020). Dependendo do país e legislação, o piso sob a cama pode ser pavimentado ou não (Leso et al., 2018).

A área de cama é normalmente separada do corredor de alimentação por uma mureta, geralmente de 1,2 m de altura (Barbeg et al., 2007b). Para evitar que o material de cama saia da instalação é comum mureta de 0,6 a 1,2 m em instalação CB aberta norte-americana (Bewley et al., 2012). No entanto, no estado de Minas Gerais, Brasil, tem sido comum adotar a mureta de alvenaria com altura variando de 0,3 m a 0,5 m, associada à cerca em cordoalha de aço, como forma de garantir a circulação de ar interior de forma adequada e, ao mesmo tempo, evitar a entrada de chuva e impedir o espalhamento da cama para fora da instalação (Oliveira et al., 2019b).

Os comedouros devem ser facilmente acessíveis para os animais, sendo recomendado o espaço para o comedouro de 0,7 a 1,4 m linear⁻¹ (Bewley et al., 2012). No entanto, Caldato et al. (2020) sugerem que no comprimento do corredor de alimentação deve-se considerar no mínimo 0,80 m lineares de comedouro por vaca alojada (lactantes ou secas).

O tamanho da pista de trato (corredor onde é ofertado o alimento) deve ser do mesmo comprimento do corredor de alimentação, e a largura deve ser suficiente para que máquinas (como tratores) possam trabalhar, sendo que, geralmente, larguras de 4,0 m são suficientes (Damasceno, 2020). O corredor de alimentação deve ter largura de no mínimo 4,0 m (Damasceno, 2020). Também é recomendado que toda área do corredor de alimentação e pista de trato sejam concretados. Cabe ressaltar que, o sistema CB requer potencialmente menos concreto, quando comparado ao sistema *Free Stall* (FS) (Leso et al., 2018). O corredor de alimentação poderá ser posicionado na instalação, em apenas um dos lados, lateralmente em ambos os lados ou central (Caldato et al., 2020).

Na maioria das instalações CB abertas e fechadas, os bebedouros ficam localizados ao longo das muretas que dividem o corredor de alimentação e a área de cama, voltados para o corredor de alimentação. Radavelli et al. (2020) investigaram os aspectos construtivos de 30 sistemas CB abertos localizados no Oeste de Santa Catarina, Brasil, e observaram que alguns dos sistemas CB abertos continham bebedouros na área da cama ou nas proximidades, onde os animais podiam beber enquanto estivessem na área da cama. Os bebedouros nesta região não são recomendados, pois podem adicionar maior umidade a cama e, potencialmente, terá influência negativa no processo de compostagem.

Os bebedouros podem ser nas formas retangulares ou circulares, com altura variável de 0,60 m a 0,80 m; a profundidade do bebedouro deve ser de 0,15 a 0,30 m; em relação ao comprimento dos bebedouros são fornecidos 0,60 a 1,00 m linear para cada grupo de 15 vacas (Bewley et al., 2012; Damasceno, 2020).

Outro ponto importante é a limpeza do piso do corredor de alimentação, que deve ser realizado com certa frequência. O corredor de alimentação, com piso de concreto, coleta de 25 a 30 % do esterco e da urina produzidos pelos animais (Bewley et al., 2017).

2.7 EFEITOS DO AMBIENTE SOBRE O CONFORTO TÉRMICO, BEM-ESTAR E DESEMPENHO DE BOVINOS DE LEITE EM INSTALAÇÕES *COMPOST BARN*

2.7.1 Temperatura e umidade relativa do ar

A zona de termoneutralidade explica a relação entre o animal e o ambiente, sendo definido como o intervalo dentro do qual a taxa metabólica é mínima e o animal saudável pode promover a adaptação física para manter a temperatura corporal normal com a mínima mudança na atividade metabólica (Baêta & Souza, 2010). Caso a temperatura e umidade

relativa do ar estiverem elevadas, será difícil para o animal dissipar o calor e o animal sofrerá estresse por calor (Dash et al., 2016).

Na literatura científica, existe uma grande variação sobre os valores de temperaturas que delimitam a faixa de termoneutralidade para bovinos de leite. Roenfeldt (1998) cita o intervalo entre 5 a 25 °C como sendo termicamente confortável para bovinos de leite. De acordo com Nääs (1989) a faixa de temperatura do ar caracterizada como situação de conforto para vacas em lactação está compreendida entre 4,0 e 24,0 °C e 75 % de umidade relativa, e pode ser idealmente restrita aos limites de 7,0 a 21,0 °C, dependendo da umidade relativa do ar. Perissinotto e Moura (2007), sugerem a temperatura crítica superior definida em sendo de 25-26 °C. Os autores também afirmam que a temperatura abaixo de 22 °C fornece conforto térmico para vacas, independentemente da umidade relativa do ar. Segundo Nääs e Arcaro Júnior (2001), o valor de UR de 70 % é considerado o limite superior para possibilitar o uso do sistema de resfriamento no interior do ambiente destinado a animais em lactação, através da utilização da água.

Os animais oriundos de clima temperado quando inseridos ao clima tropical e subtropical, com temperaturas mais elevada e umidade diferente da habitual, encontram no estresse térmico um entrave na produção (Ricci et al., 2013). As vacas leiteiras de alta produção tendem a produzir maior calor metabólico, sendo mais susceptíveis ao estresse térmico, o que irá impactar fortemente na produção, reprodução e sanidade dos animais (Caldato et al., 2020). As respostas fisiológicas dos animais variam de acordo com a duração e intensidade que são submetidos ao desafio do estresse térmico. A gravidade desses desafios térmicos curtos depende da magnitude de eventos de ondas de calor e da possibilidade de recuperação durante o período noturno frio, porém, sob condições tropicais e subtropicais os animais são desafiados pelo calor em grande parte do tempo (Renaudeau et al., 2012).

Portanto, quanto maior o desafio infligido pelo ambiente, mais dificuldade o animal terá em se adaptar e, conseqüentemente, afetará o seu bem-estar (Bond et al., 2012). Durante os períodos de temperatura elevada, as modificações ambientais auxiliam no processo de troca de calor do animal com o ambiente através dos processos sensíveis (convecção, condução e radiação) ou de forma latente (evaporação) (Azevedo et al., 2005).

Os principais problemas encontrados na criação de vacas leiteiras estão relacionados ao tipo de exploração comercial, portanto, proporcionar conforto aos animais é o ponto-chave relacionado ao meio ambiente, para melhorar a qualidade de vida dos animais de produção (Pilatti & Vieira, 2017).

2.7.2 Índices de conforto térmico

Uma grande variedade de índices de conforto térmico foi desenvolvida para caracterizar e quantificar as zonas de conforto adequadas a cada espécie animal (Dash et al., 2016). Estes índices visam englobar o efeito combinado dos elementos meteorológicos e do ambiente sobre o indivíduo (homem ou animal) estudado (Baêta & Souza, 2010; Renaudeau et al., 2012). Dentre os índices desenvolvidos, o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) tem sido amplamente utilizado para avaliar a zona de conforto térmico em bovinos de leite.

Os limiares de ITU que caracterizam uma situação de conforto ou desconforto de bovinos de leite divergem entre a comunidade científica. De forma geral, os limites propostos são: $ITU \leq 74$ condição de conforto térmico; $74 < ITU < 79$ - condição de alerta para os produtores; $79 \leq ITU < 84$ - condição de perigo, medidas de segurança devem ser tomadas para evitar perdas na produção e até mortalidade; e $ITU \geq 84$ - situação de emergência (Rosemberg et al., 1983; Mader et al., 2006). Segundo Dash et al. (2016), as características reprodutivas dos bovinos são suscetíveis aos impactos negativos do estresse térmico com aumento do ITU acima de 72.

Oliveira et al. (2019a) avaliaram a distribuição espacial das condições térmicas em instalações CB abertas com diferentes sistemas de ventilação. Os autores observaram que os níveis mais elevados de ITU foram verificados no interior da instalação CB aberta com ventilação natural e na instalação CB aberta equipada com ventiladores LVHS (*Low Volume High Speed*). A melhor uniformidade e condição térmica foram verificadas para as instalações CB abertas com ventiladores HVLS (*High Volume Low Speed*). Contudo, pelos valores de ITU encontrados as três instalações estavam em estresse por calor durante as horas mais quentes do dia.

Damasceno et al. (2019) avaliaram o microclima de uma instalação CB fechada com ventilação em túnel, associada ao resfriamento adiabático evaporativo, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil, no mês de outubro. Foi observado que a distribuição espacial do ITU manteve-se uniforme em toda a instalação CB, contudo, teve predomínio da condição caracterizada como alerta ao produtor durante o período da tarde.

Outro índice comumente utilizado para avaliação do conforto térmico na produção animal é a entalpia específica do ar. A medição da entalpia é considerada uma das melhores formas de quantificar o conforto térmico, pois se baseia na medição da quantidade de energia do ar, ou seja, é a combinação entre a condição de temperatura e umidade relativa do ar (Rodrigues et al., 2011). A entalpia tem sido recomendada como um indicador na avaliação das condições de criação na pecuária, uma vez que, ao contrário de outros índices, é baseada

nas propriedades termodinâmicas do ar (Castro Júnior & Silva, 2020). Guesine (2020) avaliou o microclima de uma instalação CB aberta localizada no estado de Minas Gerais considerando a Entalpia. Os resultados indicaram que o ambiente interno da instalação CB aberta foi desconfortável para os animais, também foi considerado que frequência respiratória destes animais foi alterada e classificada como em estresse térmico médio.

2.7.3 Escore de sujidade e locomoção

As instalações que fornecem maior espaço por vaca, cama macia e permitem livre circulação tem sido benéfica para o conforto e bem-estar dos animais (Blanco-Penedo et al., 2020). Fávero et al. (2015a) sugerem que o manejo da cama do sistema CB para proporcionar uma superfície seca e solta resulta em animais mais limpos e com menor incidência de mastite. De acordo com os mesmos autores, a pontuação da higiene da vaca pode ser um indicativo útil e eficiente para auxiliar no manejo da cama e avaliar o risco de mastite subclínica em sistemas CB. Os resultados revisados com relação aos escores de sujidade e locomoção em sistemas CB abertos estão resumidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Escore de sujidade e locomoção de bovinos de leite alojados em diferentes sistemas *Compost Barn* com laterais abertas

Autor	Local	Escore	Escala de pontuação
Escore de Sujidade			
Biasato et al. (2019)	Piemonte (Itália)	1,95 ± 0,09	1=limpo e 5=muito sujo
Eckelkamp et al. (2016a)	Kentucky (EUA)	2,19 ± 0,05	1=limpo e 4 = muito sujo
Lobeck et al. (2011)	Minnesota e Dakota do Sul (EUA)	3,18	1=limpo e 5=sujo
Shane et al. (2010)	Minnesota (EUA)	3,1	1=limpo e 5=sujo
Escore de Locomoção			
Barberg et al. (2007b)	Minnesota (EUA)	7,8% das vacas (≥ 3)	1=locomoção normal e 5=coxo grave
Shane et al. (2010)	Minnesota (EUA)	9,1% das vacas eram coxas e 2,5% eram gravemente coxas.	1=locomoção normal e 5=coxo grave
Pereira (2017)	Minas Gerais (Brasil)	Inverno - 40,0 % das vacas no Escore 0	0=Locomoção normal e 3= locomoção grave
Eckelkamp et al. (2016a)	Kentucky (EUA)	27,4% dos animais foram pontuados no Escore 1	1=locomoção normal e 5=coxo grave

De acordo com Blanco-Penedo et al. (2020), a higiene do corpo e do úbere do animal reflete a limpeza da superfície onde o animal permanece deitado. Em um estudo conduzido em instalações CB abertas e FS (Biasato et al., 2019), os níveis de higiene foram avaliados em uma escala de 5 pontos (1 = limpo e 5 = muito sujo). Os escores médios de higiene das instalações CB abertas foram melhores quando comparadas as instalações FS, com média de $1,95 \pm 0,09$ versus $2,18 \pm 0,06$, respectivamente. Porém, Eckelkamp et al. (2016a) não observaram diferenças entre o escore médio de higiene de vacas entre instalações CB ($2,19 \pm 0,05$) e FS ($2,26 \pm 0,06$), o que indicou que os animais em ambos os sistemas permaneceram limpos durante todo o estudo.

Por outro lado, Lobeck et al. (2011) observaram que os animais alojados em instalações CB abertas exibiram maior escore de higiene (1 = limpo e 5 = sujo) do que em instalações FS com ventilação cruzada e instalações FS com ventilação natural (3,18, 2,83 e 2,77, respectivamente). O aumento do teor de umidade permitiu que o material aderisse mais facilmente aos animais, aumentando o escore de higiene.

Em outra pesquisa, Leso et al. (2013) observaram que embora a saúde do úbere em instalações CB abertas parecesse ser adequada, as dificuldades em manter a cama seca representa desafios em termos de limpeza das vacas. Shane et al. (2010) relataram o escore médio de higiene do rebanho de 3,1 (variação de 2,2 - 3,8) para todas as vacas alojadas em instalações CB abertas usando vários materiais de cama diferentes. Este estudo mostrou elevada sujidade dos animais em comparação aos estudos anteriores mencionados.

Burgstaller et al. (2016) observaram que instalações CB abertas foram uma boa alternativa em comparação as instalações FS em termos de claudicação, saúde do casco e bem-estar animal. Bran et al. (2019) conduziram um estudo em fazendas intensivas no sul do Brasil com o intuito de investigar os fatores associados à claudicação em vacas leiteiras. Os mesmos autores observaram que fazendas que utilizavam colchões como base apresentaram maior prevalência de claudicação do que fazendas que utilizam cama de compostagem. Fregonesi et al. (2009) também sugeriram que os sistemas com cama aberta, podem ser uma opção útil para os produtores interessados em reduzir a incidência de problemas de claudicação em vacas.

Barberg et al. (2007b) analisaram o desempenho e saúde do rebanho quando as vacas foram transferidas para instalações CB abertas, e observaram que nenhuma lesão de jarretes estava presente em 74,9 % das vacas; 24,1 % das vacas tinham uma lesão leve (perda de pelo) e apenas 1,0 % tinham uma lesão grave (inchaço). Também foi observado que no geral, 7,8 % das vacas do rebanho eram clinicamente coxas (pontuação de locomoção ≥ 3), com 2

rebanhos sem vacas coxas. Além disso, as taxas de infecção por mastite diminuiram significativamente em 12 %, em 6 das 9 fazendas analisadas.

Lobeck et al. (2011) avaliaram o escore de claudicação em instalações CB abertas e FS, utilizando uma escala de cinco pontos (1 = locomoção normal e 5 = coxa grave). As vacas alojadas em instalações CB abertas com cama de compostagem apresentaram diminuição na incidência de claudicação em comparação com vacas em instalações FS com cama de areia.

As vacas permanecem mais tempo deitadas e em pé totalmente em uma área de descanso aberta do que em baias (Fregonesi et al., 2009). Segundo Blanco-Penedo et al. (2020), o sistema de criação afeta o bem-estar das vacas, sendo que as instalações com grande área de descanso tem evidenciado mais conforto quando comparado à instalação FS. Os mesmos autores observaram que, a partir de avaliações comportamentais, os animais permanecerem maior tempo deitados em sistemas com grande área de descanso.

2.7.4 Produção de leite

Marcondes et al. (2019) avaliaram as características produtivas de fazendas leiteiras, localizadas no estado de Minas Gerais, Brasil, que mudaram de um sistema de confinamento (dry-lot, DLS) para instalações CB abertas e compararam com fazendas similares que não mudaram seu sistema de criação. Os autores observaram que as fazendas com instalações CB abertas aumentaram a produção de leite por vaca em 13,3 % em comparação com as fazendas com confinamento DLS, e concluíram que provavelmente esses resultados se devem as melhores condições ambientais e de maior conforto dos animais proporcionadas pelas instalações CB abertas.

Brito (2016) também observou aumento na produção diária de leite em duas fazendas que passaram a usar o sistema CB aberto, sendo que o aumento entre março de 2014 e fevereiro de 2016 para a Fazenda 1 foi de 73 %, passando de 1.310 litros por dia para 2.270 litros diários 24 meses após a implantação do sistema. Já para a Fazenda 2, o aumento foi 42 % nos primeiros 12 meses pós implantação do sistema CB aberto.

Em pesquisa realizada por Barberg et al. (2007b) em sistemas CB abertos localizadas no estado de Minnesota, EUA, os autores observaram o aumento na produção de leite de 955 ± 315 kg/vaca por ano (variação de 395 a 1.331 kg/vaca por ano). De acordo com os autores, o potencial melhorado do conforto das vacas em sistemas CB abertos pode resultar no aumento da produção de leite.

Black et al. (2013) avaliaram 47 sistemas CB abertos localizados em Kentucky nos EUA, entre outubro de 2010 e março de 2011, e verificaram que a produção média diária de leite aumentou ao passar a utilizar o sistema de CB aberto, se comparada com a produção de leite anteriormente adota ($30,7 \pm 0,3$ vs $29,3 \pm 0,3$ kg dia⁻¹, respectivamente).

2.8 SISTEMAS DE ACONDICIONAMENTO TÉRMICO AMBIENTE UTILIZADOS EM INSTALAÇÕES *COMPOST BARN*

As instalações sem o controle adequado das variáveis microclimáticas tornam-se um desafio para o conforto térmico, sendo que condições de estresse por calor podem repercutir em danos na produtividade do animal. Nesta condição, os animais usam mecanismos para regular a temperatura corporal, o que pode ocasionar em alto nível de estresse e, como resultado, tem-se menor bem-estar e maiores reduções na produção de leite (Pilatti & Vieira, 2017). Embora o efeito do estresse por frio na produção de leite seja mínimo, o efeito do estresse por calor sobre a produção de leite pode ser extremamente danoso (Smith et al., 2007)

A ventilação adequadamente dimensionada em sistemas CB abertos e fechados é necessária para remover o calor e a umidade excessivos do ar ambiente, bem como o calor e a umidade gerados pela cama, além de garantir a qualidade higiênica do ar ambiente (Damasceno, 2020).

O processo de ventilação varia conforme a concepção do projeto adotado para a criação de vacas leiteiras, sendo que basicamente são duas as categorias de CB:

a) sistemas CB concebidos em instalações abertas, nos quais a renovação de ar interna ocorre de forma natural, através de ventilação natural ou ainda, suplementada com ventilação mecânica;

b) sistemas CB concebidos em instalações fechadas, quando se é garantido o fechamento da instalação e o controle do volume de ar interno, assim como volume e vazão de ar que entra e sai. O sistema de ventilação é realizado através de sistema por pressão negativa.

2.8.1 Sistemas de ventilação natural e ventilação mecânica

A ventilação natural constitui a movimentação do ar através de construções abertas. Este movimento do ar pode ocorrer em função da diferença de pressão existente entre o exterior e interior da instalação, chamada ventilação dinâmica; ou em função da diferença de temperatura entre o ar interno e externo, chamada ventilação térmica (Baêta & Souza, 2010).

As instalações CB naturalmente ventiladas devem estar localizadas em uma área aberta, onde os ventos possam circular livremente através das aberturas laterais e do lanternim presentes nas instalações (Damasceno, 2012). Além disso, devem ser localizados em uma ligeira elevação do terreno, livres de encostas, para minimizar a entrada de chuvas e evitar, principalmente, o molhamento da região de cama (Janni et al., 2007).

O movimento do ar é um fator importante no alívio do estresse térmico, pois afeta o animal tanto quanto a perda de calor por convecção, quanto pelas perdas de calor por formas evaporativas (Fournel et al., 2017). Além disso, a renovação do ar remove o odor, os gases, o calor e a umidade que a cama de compostagem gera, melhorando a qualidade higiênica do ar ambiente, sendo necessário, em regiões e épocas muito quentes do dia e do ano, que ocorra a troca constantemente de ar quente e úmido dentro da instalação por ar mais frio e seco do ambiente exterior (Damasceno, 2012).

Embora seja extremamente viável potencializar ao máximo o uso da ventilação natural, pode ocorrer à necessidade de se usar sistemas de ventilação artificiais ou mecânicos adicionais nas instalações de confinamento para bovinos de leite, caso o fluxo de ar fornecido por ventilação natural não seja suficiente. Desse modo, é preciso definir o tipo de ventilação que será adotada. Cabe ressaltar que, no Brasil, apenas o uso da ventilação natural não permite garantir conforto térmico permanente, devido à elevada temperatura do ar na maioria das regiões no país, o que pode gerar elevados prejuízos para os produtores de leite (Caldato et al., 2020).

Assim, os sistemas de ventilação artificial ou mecânica que se pode adicionar ao sistema de ventilação natural de instalações CB são os operados por pressão positiva ou por pressão negativa. Em ambos os casos, contudo, independentemente de se adotar sistemas de ventilação por pressão positiva ou negativa, na maioria dos casos de estresse calórico elevados, o que é muito frequente nos dias e horários mais quentes do dia e do ano, torna-se absolutamente imprescindível o emprego adicional de sistemas de resfriamento adiabático evaporativo do ar. Este é o processo de resfriamento do ar considerado o mais efetivo entre todos, uma vez que a ventilação pura apenas faz a troca de ar quente por ar frio, mas não possibilita a redução da temperatura deste (Tinôco, 1996).

O processo de resfriamento evaporativo consiste em colocar o ar ambiente quente e não saturado a ser resfriado, em contato com uma superfície líquida. O contato entre ambos possibilita a evaporação da água da superfície, ao mesmo tempo em que aumenta a umidade do ar quente, com conseqüente redução na temperatura de ambos (Tinôco, 1996).

Assim, uma combinação de ventiladores (para aumentar a perda de calor por convecção) e aspersores/nebulizadores (para promover o resfriamento adiabático evaporativo do ar) tem se mostrado uma maneira eficaz de resfriar o ambiente de criação de vacas leiteiras (Fournel et al., 2017). Os sistemas de aspersão podem ser instalados tanto na sala de espera ou na linha de cocho do sistema CB, sendo um dos meios mais eficientes em reduzir o estresse térmico dos animais (Caldato et al., 2020). Os sistemas com placas de resfriamento evaporativo (*Pad colling*) e nebulizadores devem ser usados com cautela em sistemas CB, especialmente sobre a área de cama, porque podem gerar o aumento na umidade relativa do ar, ocasionando na diminuição das taxas de evaporação da cama (Leso et al., 2020).

2.8.2 Sistema de ventilação mecânica ou artificial por pressão positiva

Quando a ventilação natural não é suficiente para melhorar o ambiente interno da instalação, é necessário o uso de ventiladores sobre a área de cama e o corredor de alimentação, a fim de promover a redução de calor do ambiente, melhorar a qualidade do ar e promover a secagem da cama (Lobeck et al., 2012). De acordo com Fagundes et al. (2020) e Leso et al. (2020), os principais tipos de ventiladores encontrados em sistemas CB abertos são os de alto volume e baixa rotação (HVLS - *High Volume Low Speed*) ou ventiladores de baixo volume e alta rotação (LVHS - *Low Volume High Speed*).

Oliveira et al. (2019b) observaram que em instalações CB abertas localizadas no sul de Minas Gerais, Brasil, o valor médio da velocidade do ar na superfície da cama e a 1,5 m de altura foi de $1,3 \pm 0,7 \text{ m s}^{-1}$ e $1,7 \pm 0,8 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. De acordo com Black et al. (2013), a velocidade do ar, próxima à superfície da cama, por volta de $1,8 \text{ m s}^{-1}$, proporciona maior taxa de secagem da cama. Manter uma velocidade do ar adequada na área de descanso das vacas é importante. Estudos mostram que as reduções das respostas fisiológicas estão diretamente associadas ao estresse térmico (Mondaca et al., 2019).

Segundo Bewley et al (2012), a ventilação deve ser homogênea para que os animais não fiquem aglomerados em uma área específica da instalação. A falta de ventiladores pode provocar a aglomeração dos animais em áreas onde o fluxo de ar natural é maior durante as condições de estresse de calor, o que leva ao excesso de esterco e acúmulo de urina, e com isso, a compostagem acontece de forma ineficiente devido ao aumento do teor de umidade.

Fagundes et al. (2020) analisaram instalações CB abertas localizados no Brasil, com diferentes sistemas de ventilação, e observaram que a utilização de ventiladores HVLS produziu um fluxo de ar mais homogêneo quando comparado aos ventiladores LVHS.

Também foi observado que, para os dois tipos de ventiladores avaliados, a velocidade do ar foi maior do que o recomendado ($1,8 \text{ m s}^{-1}$) na maior parte da região de cama.

O adequado dimensionamento do sistema de ventilação depende da escolha dos tipos e modelos de ventiladores, com base em suas rotações, potências, vazões e rendimento, além da velocidade do ar requerida no ambiente e suportada pelos animais sem estresse (depende da quantidade e tamanho dos animais). Além disso, depende do posicionamento e tamanho das áreas de entradas e saídas de ar. É importante considerar a automação envolvida no controle de acionamento dos componentes específicos, podendo-se utilizar o manejo automatizado dos ventiladores.

2.8.3 Sistema de ventilação por pressão negativa

Na última década, novos sistemas de confinamento estão ganhando espaço no cenário da pecuária leiteira mundial. A utilização do sistema fechado, associado ao resfriamento evaporativo tem sido adotado em instalações FS com ventilação por pressão negativa em túnel (Smith et al., 2006; Dikmen et al., 2020) ou cruzada (Smith et al., 2006; Smith et al., 2007; Lobeck et al., 2011).

Diversos estudos destacaram que a adoção desse tipo de climatização trouxe significativas vantagens para a produção de vacas leiteiras, ao reduzir drasticamente a exposição ao estresse térmico e melhorar o conforto dos animais, quando comparado com os sistemas de confinamento abertos ou a pasto (Smith et al., 2006). Em estudo realizado por Bucklin et al. (2009), os autores observaram que as instalação FS com ventilação por pressão negativa em modo túnel, em uma região de clima quente e úmido, tiveram as condições no interior da instalação muito melhoradas em comparação com as condições do ambiente externo.

Na verdade, as instalações totalmente fechadas devem ser obrigatoriamente associadas à ventilação mecânica e a sistemas de resfriamento evaporativo, de maneira a possibilitar a redução da temperatura do ar durante os meses mais quentes do ano e horas mais quentes do dia (Smith et al., 2006). O sistema de climatização se baseia no controle, direcionamento e resfriamento do ar no interior das instalações utilizadas para a produção animal.

O sistema com ventilação por pressão negativa normalmente é automatizado, sendo que no sistema tipo túnel, o ar é succionado através da instalação paralelamente à cumeeira, já no sistema com ventilação cruzada o fluxo de ar é succionado perpendicular à cumeeira (Fournel et al., 2017; Mondaca et al., 2019). Uma potencial vantagem deste tipo de sistema é

que as vacas são expostas a ventos com velocidades praticamente constantes (Smith et al., 2007).

No Brasil, tem-se adotado o sistema CB fechado com ventilação negativa em modo túnel, o qual se baseia em uma estrutura com fechamento das laterais utilizando cortinas de polipropileno ou de placas metálicas galvanizadas (sem isolamento térmico). Exaustores são posicionados numa das extremidades da instalação para succionar o ar interno e com isto é criada uma pressão negativa (vácuo parcial), forçando o ar externo a passar através de aberturas posicionadas na extremidade oposta, criando o efeito túnel de vento, garantindo a renovação do ar interno (Smith et al., 2006), conforme apresentado na Figura 2.1.

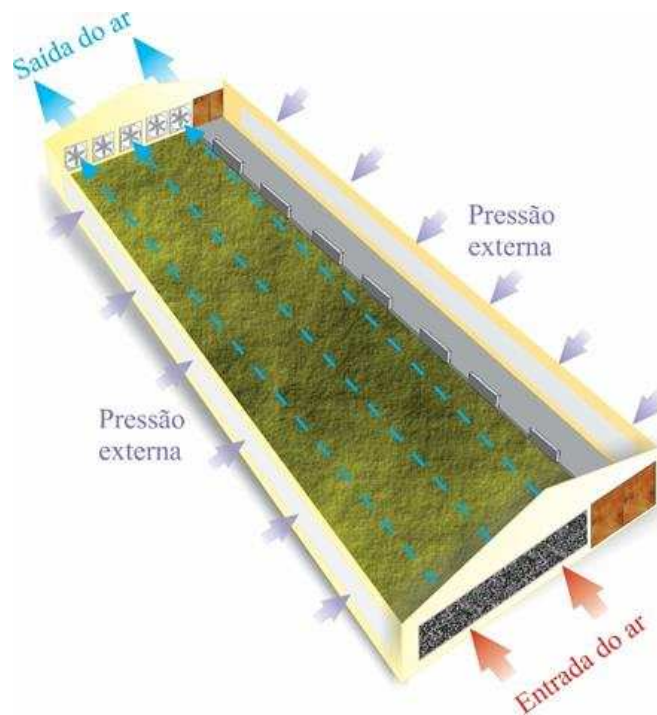


Figura 2.1 – Sistema de ventilação mecânica por exaustão (pressão negativa) em instalação *Compost Barn* em modo túnel. Fonte: Damasceno (2020).

Neste sistema, quando o ar quente e não saturado, externo a instalação, é forçado (pelos exaustores posicionados na extremidade oposta) a atravessar a placa porosa umedecida, ocorre troca simultânea de calor e massa, com mudança de estado de parte da água da fase líquida para vapor, e elevação da umidade relativa do ar de entrada, com conseqüente redução da temperatura, ou seja, ocorre redução da temperatura do ar interior, porém, com elevação da sua umidade relativa (Tinôco, 1996; Baêta & Souza, 2010), conforme a representação esquemática da Figura 2.2.

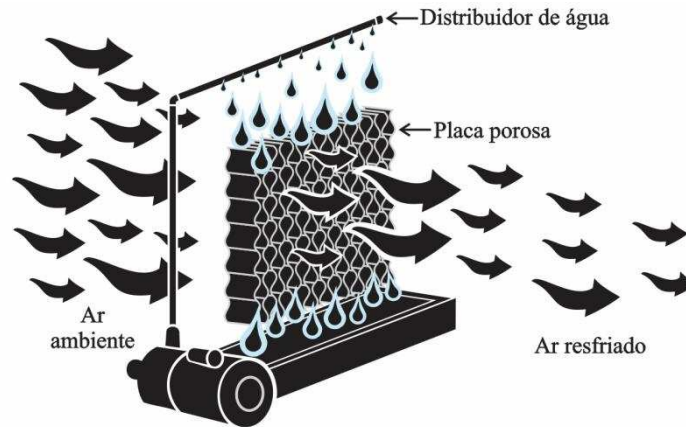


Figura 2.2 - Esquema de funcionamento da placa porosa umedecida. Fonte: Adaptado de ECOBRISA[®].

Para as regiões de climas mais quentes e secos, a utilização desse sistema pode possibilitar o resfriamento adiabático do ar em cerca de até 11 °C (Tinôco, 1996).

O ar tende a se mover através dos corredores, teto ou corredor de alimentação onde há interferência mínima com vacas, ou seja, o caminho de menor resistência (Harner et al., 2007). O conjunto de exaustores deve ser dimensionado para fornecer uma velocidade do ar mínima variando entre 2,0 a 4,0 m s⁻¹ (Damasceno, 2020). De acordo com House (2016), para sistemas com ventilação em túnel deve-se adotar uma taxa de ventilação de 1700 m³ h⁻¹ por vaca, e a velocidade do ar de entrada de no mínimo de 2,5 m s⁻¹.

Além disso, é importante verificar se a capacidade dos exaustores está adequada para garantir taxas de renovação de ar necessária no verão, deve-se calcular o tempo que leva para todos os exaustores renovarem completamente o ar interno da instalação, sendo desejável uma renovação completa do ar em um minuto ou menos (House, 2016; Damasceno, 2020).

Uma troca de ar é o equivalente a substituir todo o ar dentro da edificação por ar fresco, ou seja, se a taxa de troca de ar for de um minuto, a cada minuto, os exaustores estarão movendo o ar suficiente para trocar completamente o ar interno da edificação pelo ar externo (Harner & Smith, 2008). Entretanto, à medida que se aumenta a taxa de ventilação, os custos energéticos operacionais para o funcionamento dos exaustores também se eleva.

O sistema por pressão negativa, associado ao resfriamento adiabático evaporativo, opera através de painel com comando automático para acionamento de exaustores e do molhamento das placas porosas. Neste sistema, são posicionados no interior das edificações sensores que monitoram as condições ambientais, o que permite que o sistema de resfriamento seja acionado, normalmente, quando a temperatura do ar é igual ou superior a 21 °C e a umidade relativa do ar atinja valores próximos a 80 %, o sistema de resfriamento deve ser desligado (Ward, 2013).

Manter uma rotina de manejo bem programada é importante para o funcionamento adequado do sistema, pois, sempre que os portões são abertos ocorre à entrada de ar quente na instalação, provocando picos de aumento de temperatura do ar interno. Também se deve evitar entrada de ar periférico, por exemplo, por falhas de vedação, o que pode provocar a redução na eficiência do sistema (Damasceno, 2020).

Outro ponto é a falha no dimensionamento das dimensões de entrada de ar que podem interferir na perda de carga do sistema, sobrecarregando os exaustores e, conseqüente, ocasiona em aumento do consumo de energia elétrica (Andrade et al., 2020). Alguns produtores de leite, que adotaram este tipo de sistema, têm optado a colocar a sala de ordenha no interior da instalação CB fechada, dessa forma os animais ficam expostos ao ar climatizado durante todo o período.

Esse tipo de sistema de climatização demanda a ventilação contínua mecânica e o uso de um gerador de qualidade e que seja adequadamente projetado para manter o funcionamento em caso de falta de energia (Smith et al., 2007). Os produtores de leite devem ficar atentos, incorporando geradores aos seus projetos, já que o sistema é altamente dependente de energia elétrica e, mesmo com a abertura de cortinas, se a energia elétrica não voltar rapidamente, a temperatura do ar interna se eleva consideravelmente, podendo provocar estresse por calor nos animais e o aumento da concentração de amônia no ar, e outros poluentes, tornando o ambiente insalubre para os animais e trabalhadores (Damasceno, 2020).

O fluxo de ar longitudinal proporcionado por este tipo de climatização carrega o calor metabólico produzido pelos animais confinados alojados, pela compostagem da cama, pela carga térmica gerada pelos equipamentos utilizado, oriundo da radiação solar emitida através da cobertura e dos fechamentos laterais, bem como promove o caminhamento de poluentes do ar (alta concentração de calor, umidade, amônia, poeira, etc.) (Teles Júnior, 2019). Este comportamento resulta no aumento da temperatura do ar próximo dos exaustores, bem como a piora da qualidade do ar nesta região (Damasceno et al., 2019).

As instalações mais estreitas proporcionam melhor uniformidade do ar, sendo que instalações com largura acima de 20 m necessitam de entrada de ar adicional, e devem ser inseridas próximo ao corredor de alimentação (Damasceno, 2020). De acordo com o mesmo autor, ainda não há um consenso comum sobre o comprimento ideal para o sistema CB fechado, contudo, na prática tem-se adotado instalações com até 180 m de comprimento, necessitando de mais estudos para averiguar o comprimento ideal.

Neste tipo de instalação climatizada, recomenda-se a adição de forro no teto para reduzir a área da seção transversal e o volume de ar interno, tornando o sistema mais eficiente

e com menor custo de implantação, sendo que a altura do forro geralmente varia entre 2,5 a 4,0 m (Damasceno, 2020). O forro atua como uma segunda barreira física, a qual permite a formação de uma camada de ar móvel junto à cobertura, o que contribui na redução da transferência de calor para o interior da edificação (Tinôco, 2001).

Também é comum a utilização de defletores, feitos de metal ou lona. Os defletores têm a principal funcionalidade de redirecionar o fluxo de ar e aumentar a velocidade do ar para o local onde as vacas estão localizadas, e com isso minimizar o estresse térmico (Lobeck et al., 2012).

Harner et al. (2007) recomendaram que a parte inferior dos defletores devem ser alta o suficiente (de 3,6 a 4,0 m) para evitar interferência com operação normal do equipamento. No caso específico do sistema CB fechado, os defletores devem ser instalados a uma altura que não interfira no revolvimento, reposição e retirada de toda a cama. Na tipologia do sistema CB fechado com ventilação em túnel, os defletores estão sendo instalados no sentido transversal da instalação. Além disso, é comum a existência de defletor transversal sobre o corredor de alimentação (dispostos na continuação dos defletores que se localizam acima da cama), e localizado longitudinalmente na linha dos comedouros.

Os defletores devem ser estrategicamente localizados para direcionar o ar nos espaços das vacas (Harner et al., 2007). O design e a localização adequada dos defletores são essenciais para minimizar a pressão estática encontrada pelos exaustores, pois, conforme aumenta a pressão estática, o desempenho dos exaustores diminui (Smith et al., 2007). Na Figura 2.3, está apresentado um modelo esquemático de sistema CB fechado com ventilação em túnel, associado ao resfriamento evaporativo.

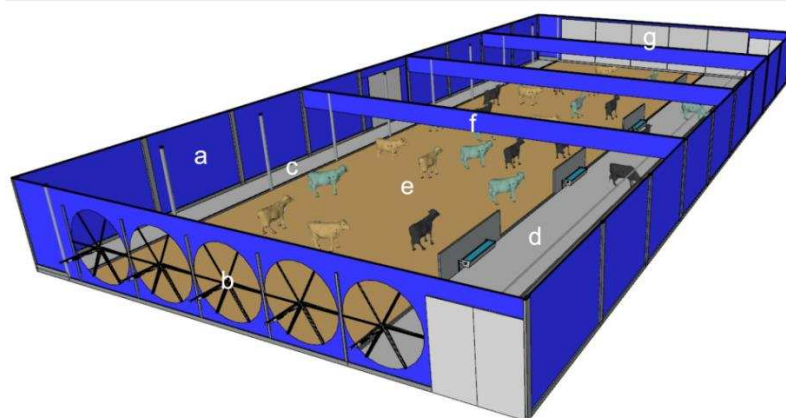


Figura 2.3 - Representação esquemática de uma instalação *Compost Barn* fechada com ventilação por pressão negativa, associado ao resfriamento evaporativo. Destaque para a) fechamento lateral de cortinas; b) exaustores de alto volume; c) corredor de serviço; d) corredor de alimentação; e) área de descanso (área de cama); f) defletores; e g) placas de resfriamento evaporativo. Fonte: Os autores

Cabe ressaltar que, diversos projetos de instalações por pressão negativa são dimensionados de modo equivocado, ao considerar os exaustores trabalhando em vazão nominal e ignoram nos cálculos as perdas de cargas associadas aos animais, defletores e características da placa evaporativa (Damasceno, 2020).

2.8.4 Processo de resfriamento adiabático evaporativo

As placas de resfriamento evaporativo são geralmente feitas de material fibroso e são comumente adicionadas às entradas de ar das instalações ventiladas em túnel (Fournel et al., 2017). Os materiais mais empregados nos enchimentos dos resfriadores evaporativos são a fibra de vidro, celulose, polipropileno e fibra de madeira (Rosa et al., 2011). A celulose tem sido preferencialmente empregada na fabricação de placas de resfriamento evaporativo, sendo predominantemente comum em instalações de produção animal no Brasil.

Para que a eficiência de resfriamento não reduza, deve-se realizar a manutenção do sistema após certo tempo de uso. As placas evaporativas podem apresentar sinais de deterioração e obstrução em decorrência à exposição de muita poeira (Ward, 2013). O entupimento também é comum, podendo ser visto pelas falhas no caminho da água. Os materiais da placa se deterioram com o tempo e devem ser substituídos após determinado período de uso (Ward, 2013).

O funcionamento desse sistema baseia-se em molhar verticalmente ou horizontalmente, as placas com material poroso, de forma que o ar é forçado, por meio dos exaustores, a passar perpendicularmente por esse material, sendo que, o material poroso pode ser molhado através do gotejando por água na borda superior da placa disposta verticalmente ou pulverizando água na superfície (Liao & Chiu, 2002).

O princípio de funcionamento do resfriamento evaporativo indica que o sistema de resfriamento evaporativo só pode remover o calor sensível do ambiente, portanto, funcionará melhor em climas quentes e secos, onde resultará no resfriamento evaporativo máximo (Liao & Chiu, 2002; Smith et al., 2016). Neste sistema de criação animal climatizado, o prévio resfriamento do ar realizado forçando-se a passagem do ar externo através de placas com material poroso umedecido deve ser realizado com cautela. O fato é que embora possibilite redução substancial da temperatura do ar, ocorre conseqüente aumento da umidade relativa do ar, podendo reduzir a quantidade de calor dissipado pelo animal na forma evaporativa, tornando as condições ambientais internas em condições de estresse térmico moderado (Damasceno, 2020).

O aumento da umidade relativa do ar, também pode umedecer e dificultar a secagem da cama, tornando-se um fator limitante, dificultando o manejo da mesma e podendo influenciar negativamente na higiene dos animais, qualidade do leite, processo de compostagem da cama, aumento da emissão de gases nocivos, como a amônia (NH_3), entre outros. Harner et al. (2007) observaram que os gases emitidos por instalações FS com ventilação por pressão negativa eram predominantemente à base de nitrogênio (NH_3 , NO_2 , NO) durante os períodos de estudos nas estações de primavera e verão. Além disso, o excessivo valor de umidade no interior do sistema CB fechado pode ocasionar no desgaste precoce dos equipamentos (corrosão).

A capacidade de diminuir a temperatura do ar por meio do sistema de resfriamento evaporativo depende da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar a ser resfriado, sendo que, enquanto a umidade relativa aumenta, a capacidade de redução da temperatura do ar diminui (Smith et al., 2007). Os sistemas que resfriam o ar através do resfriamento evaporativo são mais eficazes em climas quentes e com baixa umidade relativa, porém, também podem ser utilizados em regiões de alta umidade nos horários mais quentes do dia, quando a umidade relativa tende a diminuir naturalmente. Contudo, a eficácia desses sistemas de resfriamento evaporativo é questionável em ambientes de climas permanentemente muito úmidos (Renaudeau et al., 2012; Smith et al., 2016).

Como o Brasil é um país de grande extensão territorial, é necessária uma avaliação criteriosa do microclima de cada região para auxiliar na tomada de decisão quanto ao melhor projeto de instalação a ser adotado (Caldato et al., 2020). O sistema CB fechado tem potencial de utilização em algumas regiões do território brasileiro, podendo ser utilizado com melhor eficiência em função das condições climáticas. De acordo com Damasceno (2020), as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste tem potencial na utilização desse tipo de sistema, contudo, para as regiões Norte e Sul, principalmente regiões litorâneas, necessita-se de maior cautela, em decorrência dos altos valores de umidade relativa do ar.

Atualmente, poucas diretrizes existem para a operação adequada do sistema CB fechado. Contudo, tem-se observado o aumento expressivo desse tipo de sistema nos últimos anos. Na Figura 2.4 estão apresentadas algumas instalações CB fechadas em diferentes localidades no Brasil.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.4 - Sistemas *Compost Barn* Fechados com ventilação por pressão negativa, localizadas no Brasil, nos estados do Rio Grande do Sul (a); Santa Catarina (b); e Minas Gerais (c) e (d).

Na Tabela 2.3 encontra-se apresentado um resumo das principais vantagens e desvantagens dos sistemas CB fechados com ventilação em túnel, associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo, implantados no Brasil. Todos esses fatores necessitam, portanto, serem bem analisados para a adequada montagem do sistema.

Tabela 2.3. Vantagens e desvantagens dos sistemas *Compost Barn* fechados com ventilação em túnel, associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo, implantados no Brasil.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Maior controle do ambiente térmico durante todas as estações do ano - Maior controle de eficiência alimentar - Maior controle de moscas e carrapato - Controle de luminosidade - Meio ambiente: menor impacto ambiental - Não precisa apresentar orientação leste-oeste - Facilidade no manejo dos animais - Velocidades do ar praticamente constantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalações muito compridas podem dificultar o manejo da cama - Alto custo inicial - Adoção de maior área de cama por animal - Não existe ventilação direcionada a cama - Elevado custo energético - Baixa eficiência do sistema em regiões com elevada umidade relativa - Necessidade de manutenção da placa evaporativa e exautores - Desgaste rápido da lona utilizada nos fechamentos laterais - Os altos valores de umidade relativa interna podem dificultar o manejo da cama e acelerar a oxidação de partes metálicas - Deterioração precoce das placas de celulose, em decorrência a exposição de muita poeira - Sistema novo no mundo: falta de conhecimento técnico

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como uma das alternativas de acondicionar melhor as vacas em produção e buscar vencer os desafios que ambientes térmicos inadequados de criação possam afligir sobre as vacas em seu período de lactação, observa-se expressiva aderência de produtores de leite do Brasil ao sistema *Compost Barn* (CB).

Quando se trata de instalações CB abertas, adequadamente projetadas, com sistemas de acondicionamento ambiente bem dimensionado e eficiente, com o gerenciamento efetivo da cama e densidade adequada de criação de vacas, fica claro, com base em estudos, que o sistema é potencialmente interessante para as condições climáticas e tipologias construtivas do Brasil.

Neste caso, questões de bem-estar animal, especialmente redução do escore de higiene e claudicação, controle do clima interno da instalação, tipologia da construção, manejo e qualidade do material de compostagem e densidade animal, estão entre os principais fatores para o sucesso do sistema CB aberto.

Adicionalmente ao sistema CB aberto, tem-se que grandes avanços na gestão do microclima interno de sistemas CB fechados, incluindo sistemas de acondicionamento

ambiente, que podem atenuar os efeitos do estresse térmico na saúde, melhorar a produção e reprodução dos bovinos de leite e garantir sua aplicabilidade para o Brasil.

Sabe-se que o manejo adequado da cama é um dos pontos-chave para o sucesso do sistema CB aberto e fechado, devendo ser realizado diariamente, evitando a umidade excessiva, que pode prejudicar o processo de compostagem da cama. Notavelmente, mais espaço por vaca é benéfico para esses sistemas.

Desta forma, relatos contraditórios são recorrentes, sendo que há enorme carência de investigações sobre a aplicabilidade do novo sistema CB fechado, para as condições climáticas brasileiras, sob o prisma da ambiência, envolvendo os aspectos gerais arquitetônicos e construtivos, qualidade de cama, sistemas de ventilação e indicadores de bem-estar de vacas lactantes, que envolvem o sistema CB fechado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, R. R.; Tinôco, I. F. F.; Damasceno, F.A.; Barbari, M. *Compost Barn* com ventilação em túnel. **Balde Branco**, n. 670, p. 50-55, 2020.
- Andrade, R. R.; Tinôco, I. F. F.; Damasceno, F.A.; Barbari, M.; Valente, D. A.; Vilela, M. O.; Souza, C. F.; Conti, L.; Rossi, G. Lighting and noise levels in compost dairy barns with natural and forced ventilation. **Agronomy Research**, v. 18, p. 689–698, 2020.
- Azevedo, M.; Pires, M. de F. Á.; Saturnino, H. M.; Lana, Â.M.Q.; Sampaio, I. B. M.; Monteiro, J. B. N.; Morato, L. E. Estimativa de níveis críticos superiores do índice de temperatura e umidade para vacas leiteiras $1/2$, $3/4$ e $7/8$ Holandês-Zebu em lactação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 6, p. 2000-2008, 2005.
- Baêta, F. C.; Souza, C.F. **Ambiência em edificações rurais: conforto ambiental**. 2. ed. Viçosa, Brasil: Editora UFV, 2010. 269 p.
- Barberg, A. E.; Endres, M. I.; Janni, K. A. Compost dairy barns in Minnesota: A descriptive study. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 2, p. 231-238, 2007a.
- Barberg, A. E.; Endres, M. I.; Salfer, J.A.; Reneau, J. K. Performance and welfare of dairy cows in an alternative housing system in Minnesota. **Journal of dairy science**, v. 90, n. 3, p. 1575-1583, 2007b.
- Balcells, J.; Fuertes, E.; Seradj, A. R.; Maynegre, J.; Villalba, D., de la Fuente, G. Study of nitrogen fluxes across conventional solid floor cubicle and compost-bedded pack housing systems in dairy cattle barns located in the Mediterranean area: Effects of seasonal variation. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 11, p. 10882-10897, 2020.

- Beffa, T. The composting biotechnology: a microbial aerobic solid substrate fermentation complex process. **The composting process and management**, p. 1-30, 2002.
- Bewley, J. M.; Robertson, L. M.; Eckelkamp, E.A. 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 12, p. 10418-10431, 2017.
- Bewley, J. M.; Taraba, J. L. Understanding Bedding materials for Compost Bedded Pack Barn. **Cooperative extension service, University of Kentucky, College of agriculture, Kentucky Dairy Notes, (859)**, p. 257-7543, 2009.
- Bewley, J. M.; Taraba, J. L.; Day, G. B.; Black, R.; Damasceno, F. Compost bedded pack barn design features and management considerations. **Cooperative Extension Publ. ID-206, Cooperative Extension Service, University of Kentucky College of Agriculture**, Lexington KY, 2012.
- Bewley, J. M.; Taraba, J. L.; McFarland, D.; Garrett, P.; Graves, R.; Holmes, B.; Kammel, D.; Porter, J.; Tyson, J.; Weeks, S.; Wright, P. **Guidelines for Managing Compost Bedded-Pack Barns**. The Dairy Practices Council, 2013.
- Biasato, I.; D'Angelo, A.; Bertone, I.; Odore, R.; Bellino, C. Compost bedded-pack barn as an alternative housing system for dairy cattle in Italy: effects on animal health and welfare and milk and milk product quality. **Italian Journal of Animal Science**, v. 18, n. 1, p. 1142-1153, 2019.
- Bjerg, B.; Klaas, I. 2014. Water and ammonia evaporation in a compost bedded pack dairy barn with under floor aeration. In: **2014 Montreal, Quebec Canada July 13–July 16, 2014**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2014. p. 1.
- Black, R. A.; Taraba, J. L.; Day, G. B.; Damasceno, F. A.; Bewley, J. M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 12, p. 8060-8074, 2013.
- Black, R. A.; Taraba, J. L.; Day, G. B., Damasceno, F. A., Newman, M. C.; Akers, K. A.; Wood, C. L.; McQuerry, K. J.; Bewley, J. M. The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of dairy science**, v. 97, n. 5, p. 2669-2679, 2014.
- Blanco-Penedo, I.; Ouweltjes, W.; Ofner-Schröck, E.; Brügemann, K.; Emanuelson, U. Symposium review: Animal welfare in free-walk systems in Europe. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 6, p. 5773-5782, 2020.
- Bran, J. A.; Costa, J. H. C.; von Keyserlingk, M. A. G.; Hötzel, M. J. Factors associated with lameness prevalence in lactating cows housed in freestall and compost-bedded pack dairy farms in southern Brazil. **Preventive veterinary medicine**, v. 172, p. 104773, 2019.

- Brito, E. C. **Produção intensiva de leite em Compost Barn: Uma avaliação técnica e econômica sobre a sua viabilidade**. 2016. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, 2016.
- Bond, G. B.; Almeida, R. D.; Ostrensky, A.; Molento, C. F. M. Métodos de diagnóstico e pontos críticos de bem-estar de bovinos leiteiros. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1286-1293, 2012.
- Bucklin, R. A.; Bray, D. R.; Martin, J. G.; Carlos, L.; Carvalho, V. Environmental Temperatures in Florida Dairy Housing. **Applied engineering in agriculture**, v. 25, n. 5, p. 727–735, 2009.
- Burgstaller, J.; Raith, J.; Kuchling, S.; Mandl, V.; Hund, A.; Kofler, J. Claw health and prevalence of lameness in cows from compost bedded and cubicle freestall dairy barns in Austria. **The Veterinary Journal**, v. 216, p. 81-86, 2016.
- Caldato, E. M. R.; Caldato, A.; Marcondes, M. I.; Rotta, P. P. **Manual técnico de construção e manejo de Compost Barn para vacas leiteiras**. 1.ed. Viçosa: Editora UFV, 2020. 35 p.
- Castro Júnior, S. L.; Silva, I. J. O. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International Journal of Biometeorology**, p. 1-13, 2020.
- Damasceno, F.A. **Compost Barn como alternativa para a pecuária leiteira**. 1. ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396 p.
- Damasceno, F. A. **Compost bedded pack barns system and computational simulation of airflow through naturally ventilated reduced model**. 2012. 404 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.
- Damasceno, F. A.; Oliveira, C. E. A.; Ferraz, G. A. S.; Nascimento, J. A. C.; Barbari, M.; Ferraz, P. F. P. Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, v. 17, n. 2, p. 385-395, 2019.
- Dash, S.; Chakravarty, A. K.; Singh, A.; Upadhyay, A.; Singh, M.; Yousuf, S. Effect of heat stress on reproductive performances of dairy cattle and buffaloes: A review. **Veterinary world**, v. 9, n. 3, p. 235, 2016.
- Eckelkamp, E. A.; Taraba, J. L.; Akers, K. A.; Harmon, R. J.; Bewley, J. M. Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, v. 190, p. 35-42, 2016a.

- Eckelkamp, E. A.; Taraba, J. L.; Akers, K. A.; Harmon, R. J.; Bewley, J. M. Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow hygiene, locomotion, and mastitis indicators. **Livestock Science**, v. 190, p. 48-57, 2016b.
- El Kader, N. A.; Robin, P.; Paillat, J. M.; Leterme, P. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 14, p. 2619-2628, 2007.
- Fagundes, B.; Damasceno, F. A.; Andrade, R. R.; Saraz, J. A. O.; Barbari, M.; Vega, F.A.O.; Nascimento, J. A. C. Comparison of airflow homogeneity in Compost Dairy Barns with different ventilation systems using the CFD model. **Agronomy Research**, v. 18, p. 788-796, 2020.
- Fávero, S.; Portilho, F. V. R.; Oliveira, A. C. R.; Langoni, H.; Pantoja, J. C. F. Factors associated with mastitis epidemiologic indexes, animal hygiene, and bulk milk bacterial concentrations in dairy herds housed on compost bedding. **Livestock Science**, v. 181, p. 220-230, 2015a.
- Fávero, S.; Portilho, F. V. R.; Oliveira, A. C. R.; Langoni, H.; Pantoja, J. C. F. Longitudinal trends and associations between compost bedding characteristics and bedding bacterial concentrations. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 7, n. 10, p. 58-70, 2015b.
- Fernández, A.; Mainau, E.; Manteca, X.; Siurana, A.; Castillejos, L. Impacts of compost bedded pack barns on the welfare and comfort of dairy cows. **Animals**, v. 10, n. 3, p. 431, 2020.
- Fournel, S.; Ouellet, V.; Charbonneau, É. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: a literature review. **Animals**, v. 7, n. 5, p. 37, 2017.
- Fregonesi, M. A. G.; von Keyserlingk, M. A. G.; Weary, D. M. Cow preference and usage of free stalls compared with an open pack area. **Journal of dairy science**, v. 92, n. 11, p. 5497-5502, 2009.
- Galama, P., Bokma, S., van Dooren, H. J., Ouweltjes, W., Smits, M., Driehuis, F. **Prospects for bedded pack barns for dairy cattle**. Lelystad, The Netherlands: Wageningen UR Livestock Research, 2011.
- Galama, P. J.; Ouweltjes, W.; Endres, M. I.; Sprecher, J. R.; Leso, L.; Kuipers, A.; Klopčič, M.. Symposium review: Future of housing for dairy cattle. **Journal of dairy science**. v. 103, n. 6, p. 5759-5772, 2020.
- Guesine. G. D. **Sistema compost barn para bovinos leiteiros e seus reflexos nos parâmetros ambientais, desempenho e produção durante o verão em diferentes**

- fases da lactação.** 2020. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.
- Harner, J. P.; Smith, J. F. Low-profile cross-ventilated freestall facilities—A 2 year summary. In: **Proceeding of the 2008 High Plains Dairy Conference. Albuquerque: High Plains Dairy Conference.** 2008. p. 65-78.
- Harner, J. P.; Smith, J. F.; Smith, F.; Marti, M. D. H.; Sheffield, R. E.; Zulovich, J. M., ... Brouk, M. J. In: **Sixth International Dairy Housing Conference Proceeding, 16-18 June 2007 (Minneapolis, Minnesota)(Electronic Only).** American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. p. 30.
- House, H. K. **Dairy Housing - Ventilation Options for Free Stall Barns. Factsheet. Dairy and Beef Housing and Equipment, Clinton, OMAFRA.** 2016. Disponível em: <https://www.ontario.ca/page/dairy-housing-ventilation-options-free-stall-barns>. Acesso em: 24 março 2020.
- Janni, K. A.; Endres, M. I., Reneau, J. K.; Schoper, W. W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied engineering in agriculture**, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.
- Klaas, I. C.; Bjerg, B.; Friedmann, S.; Bar, D. Cultivated barns for dairy cows-an option to promote cattle welfare and environmental protection in Denmark? **Dansk Veterinærtidsskrift**, v. 93, n. 9, p. 20-29, 2010.
- Leso, L.; Barbari, M.; Lopes, M. A.; Damasceno, F.A.; Galama, P.; Taraba, J.L.; Kuipers, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 2, p. 1072-1099, 2020.
- Leso, L., Conti, L., Rossi, G., Barbari, M. Criteria of design for deconstruction applied to dairy cows housing: a case study in Italy. **Agronomy Research**, v. 16, n. 3, p. 794-805, 2018.
- Leso, L.; Uberti, M.; Morshed, W.; Barbari, M. A survey of Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 44, n. 3, p. e17-e17, 2013.
- Liao, C. M.; Chiu, K. H. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. **Building and environment**, v. 37, n. 2, p. 177-187, 2002.
- Llonch, L.; Castillejos, L.; Mainau, E.; Manteca, X.; Ferret, A. Effect of forest biomass as bedding material on compost-bedded pack performance, microbial content, and behavior of nonlactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 11, p. 10676-10688, 2020.

- Lobeck, K. M.; Endres, M. I.; Shane, E. M.; Godden, S. M.; Fetrow, J. Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 11, p. 5469-5479, 2011.
- Lobeck, K. M.; Endres, M. I.; Janni, K. A.; Godden, S. M.; Fetrow, J. Environmental characteristics and bacterial counts in bedding and milk bulk tank of low profile cross-ventilated, naturally ventilated, and compost bedded pack dairy barns. **Applied engineering in agriculture**, v. 28, n. 1, p. 117-128, 2012.
- Mader, Terry L.; Davis, M. S.; Brown-Brandl, Tami. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 84, n. 3, p. 712-719, 2006.
- Marcondes, M.I.; Mariano, W.H.; De Vries, A. Production, economic viability and risks associated with switching dairy cows from drylots to compost bedded pack systems. **animal**, v. 14, n. 2, p. 399-408, 2019.
- Menconi, M. E.; Grohmann, D. Model integrated of life-cycle costing and dynamic thermal simulation (MILD) to evaluate roof insulation materials for existing livestock buildings. **Energy and buildings**, v. 81, p. 48-58, 2014.
- Mondaca, M. R.; Choi, C. Y.; Cook, N. B. Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: Examination using computational fluid dynamics and experimental validation. **Biosystems engineering**, v. 183, p. 70-84, 2019.
- Morton, J. M.; Tranter, W. P.; Mayer, D. G.; Jonsson, N. N. Effects of environmental heat on conception rates in lactating dairy cows: critical periods of exposure. **Journal of Dairy Science**, v. 90, n. 5, p. 2271-2278, 2007.
- Mota, V. C.; Campos, A. T.; Damasceno, F.A.; Resende, E.A. de M., Rezende, C.P. do A.; Abreu, L.R. de, Vareiro, T. Confinamento para bovinos leiteiros: Histórico e características. **Pubvet**, v. 11, p. 424-537, 2017.
- Nääs, I. A. **Principles of thermal comfort in animal production**. São Paulo: Ícone, Brasil, 1989. 183 p.
- Nääs, I. D. A.; Arcaro Júnior, I. Influência de ventilação e aspersão em sistemas de sombreamento artificial para vacas em lactação em condições de calor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 139-142, 2001.
- NRAES (Northeast Regional Agricultural Engineering Service). **On-Farm Composting Handbook**. NRAES-54. NRAES, Ithaca, NY, 1992.
- Oliveira, C. E. A.; Damasceno, F. A.; Ferraz, P. F. P.; Nascimento, J. A. C., Ferraz, G. A. S.; Barbari, M. Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in

- compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, v. 17, n. 3, p. 783-796, 2019a.
- Oliveira, V. C.; Damasceno, F. A.; Oliveira, C. E. A.; Ferraz, P. F. P.; Ferraz, G. A. S.; Saraz, J. A. O. Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: Architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, v. 17, n. 5, p.2016–2028, 2019b.
- Pereira, M. R. **Avaliação do comportamento e do bem-estar de vacas criadas em sistema *compost barn* em condições tropicais**. 2017. 78 f. Dissertação (Ciências Veterinárias) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2017.
- Pereira Neto, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 81 p.
- Perissinotto, M.; Moura, D. J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados/evaluation of thermal comfort in dairy cattle using data mining. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 1, n. 2, p. 117-126, 2007.
- Petzen, J.; Wolfanger, C.; Bonhotal, J.; Schwarz, M.; Terry, Timothy; Youngers, N. **Case study: Eagleview compost dairy barn. Cornell Cooperative Extension of Wyoming County**, Warsaw, NY. 2009. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1813/44658>>. Acesso em: 15 janeiro 2021.
- Pilatti, J. A.; Vieira, F. M. C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 5, n. 3, p. 97-105, 2017.
- Pilatti, J. A.; Vieira, F. M. C.; Rankrape, F.; Vismara, E. S. Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, v. 13, n. 2, p. 399-406, 2019.
- Radavelli, W. M.; Danieli, B.; Zotti, M. L. A. N.; Gomes, F. J.; Endres, M. I.; Schogor, A.L.B. Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 1): facility, barn management and herd characteristics. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p.e445985198-e445985198, 2020.
- Renaudeau, D.; Collin, A.; Yahav, S.; De Basilio, V.; Gourdine, J. L.; Collier, R. J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. **Animal**, v. 6, n. 5, p. 707-728, 2012.
- Ricci, G. D.; Orsi, A. M.; Domingues, P. F. Estresse calórico e suas interferências no ciclo de produção de vacas de leite: revisão. **Veterinária e zootecnia**, v. 20, n. 3, p. 9-18, 2013.

- Rodrigues, M. S.; Silva, F. D.; Barreira, L. P.; Kovacs, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. **Spadotto, CA; Ribeiro, W. Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, p. 63-94, 2006.
- Rodrigues, V.C.; da Silva, I. J. O.; Vieira, F. M. C.; Nascimento, S.T. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v. 55, n. 3, p. 455-459, 2011.
- Roenfeldt, S. You can't afford to ignore heat stress. **Dairy Herd Management**, v. 35, p. 6-12, 1998.
- Rosa, J. F.; Tinôco, I. D. F.; Fernandes, C. M.; Zolnier, S.; Bueno, M. M. Análise da eficiência de resfriamento de painéis porosos preenchidos com argila expandida em comparação aos de celulose usando túnel de vento. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 6, p. 516-523, 2010.
- Rosen, C.; Halback, T. R.; Mugaas, R. **Composting and mulching: A guide to managing organic yard waste**. University of Minnesota Extension Publication. St. Paul, Minnesota. 2000. Disponível em: <<https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/54827/1/3296.pdf>>. Acesso em: 06 janeiro 2021.
- Rosenberg, N. J.; Blad, B. L.; Verma, S. B. **Microclimate: the biological environment**. John Wiley & Sons, 1983. 495 p.
- Russelle, M. P.; Blanchet, K; Everett, L. **Characteristics and fertilizer value of compost dairy barn manure**. In: **Meeting Proceedings**. 2007. p. 75-81.
- Shane, E. M.; Endres, M. I.; Janni, K. A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied engineering in agriculture**, v. 26, n. 3, p. 465-473, 2010.
- Silva, M. V.; Pandorfi, H.; Almeida, G. L. P.; Jardim, A. M. R. F.; Batista, P. H. D., Silva, R. A. B.; Lopes, I.; Oliveira, M. E. G.; Silva, J. L. B.; Moraes, A. S. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v. 94, p. 102782, 2020.
- Smith, J. F.; Bradford, B. J.; Harner, J. P.; Potts, J. C.; Allen, J. D.; Overton, M.W., Ortiz, X. A.; Collier, R. J. Effect of cross ventilation with or without evaporative pads on core body temperature and resting time of lactating cows. **Journal of dairy science**, v. 99, n. 2, p. 1495-1500, 2016.

- Smith, T. R.; Chapa, A.; Willard, S.; Herndon Jr, C.; Williams, R. J.; Crouch, J.; Riley, T.; Pogue, D. Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the southeast. II: Impact on lactation performance. **Journal of dairy science**, v. 89, n. 10, p. 3915-3923, 2006.
- Smith, J. F.; Harner, J. P.; de Haro Marti, M.; Sheffield, R.; Zulovich, J.; Pohl, S., Fulhage, C.; Nicoli, D.; Hetchler, B.; Jacobson, L., Dhuyvetter, K.; Brouk, M. J. Comprehensive evaluation of a low-profile cross-ventilated freestall barn. In: **Proceedings of the 8th western dairy management conference**, America. 2007. p. 127-147.
- Stentiford, E. I. Composting control: principles and practice, In: **The Science of Composting**, Part 1. M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, and T. Papi, ed. Blackie Academic and Professional, London, UK. 1996. pp. 49 – 59.
- Teles Júnior, C. G. S. **Consumo energético e ambiência de galpões avícolas fechados e potencial de implementação de sistema híbrido de acondicionamento térmico**. 2019. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.
- Tinôco, I. F. F. 2001. Avicultura industrial: novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. **Brazilian Journal of Poultry Science**, v. 3, n. 1, p. 01-26, 2001.
- Tinôco, I. F. F. **Efeito de diferentes sistemas de acondicionamento de ambiente e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, e condições de verão e outono**. 1996. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- Valente, B. S.; Xavier, E. G.; Morselli, T. B. G. A.; Jahnke, D. S.; Brum Jr, B.; Cabrera, B. R.; Moraes, P. O.; Lopes, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de zootecnia**, v. 58, n. 224, p. 59-85, 2009.
- Ward, D. **Tunnel Ventilation in Livestock Barns - With and Without Evaporative Cooling**. 2013. Disponível em: <<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/13-073.htm>>. Acesso em: 8 março 2020.

CAPÍTULO II

ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS EM INSTALAÇÃO *COMPOST BARN* COM SISTEMA DE VENTILAÇÃO NEGATIVA EM MODO TÚNEL

Análise espacial e temporal das variáveis microclimáticas em instalação *Compost Barn* com sistema de ventilação negativa em modo túnel

RESUMO

Objetivou-se, com este estudo, avaliar a distribuição espacial e temporal das condições microclimáticas, no interior de uma instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) equipada com sistema de ventilação negativa em modo túnel, associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE) promovido por placas porosas umedecidas, durante o verão e o inverno. Para isto, utilizou-se a análise geoestatística para verificar o potencial do sistema em reduzir o estresse térmico ambiente. A pesquisa foi desenvolvida em instalação CBF localizada na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. Foram aferidas, para cada uma das diferentes estações analisadas, e para diferentes períodos do dia, as seguintes variáveis ambientais médias observadas no interior de uma instalação CBF: temperatura de bulbo seco, umidade relativa e velocidade do ar, Índice de Temperatura e Umidade e Entalpia. Além disso, também foram aferidos os níveis de ruído. Os resultados mostraram a predominância de forte e moderada dependência espacial e temporal, bem como variabilidade dos atributos no interior da instalação CBF, ocorrendo zonas de estresse por calor. Verificou-se, pelos mapas de krigagem, que condições mais críticas de habitação foram encontradas, principalmente, a partir da parte central da instalação CBF, em direção à face noroeste, próximo aos exaustores. Pode-se observar também que o sistema apresentou gradientes de temperaturas ao longo do comprimento, de até 3 °C. Durante as tardes de verão toda a região da instalação CBF apresentou-se em situação de desconforto. Durante o inverno, contudo, os dados ambientais mensurados permaneceram dentro da zona de conforto ao longo de toda instalação, em todos os períodos do dia analisados. A distribuição da velocidade do ar ao longo de toda a área interior da instalação CBF permaneceu sempre inferior a 2 m s⁻¹, indicando possibilidade de se promover maior intensificação do sistema de ventilação na obtenção de maior conforto térmico animal em condições de calor. O SRAE auxiliou na melhoria das condições térmicas internas da instalação, contudo, provavelmente em razão da falta de isolamento térmico dos fechamentos, não possibilitou uniformidade térmica espacial e nem temporal para as duas estações avaliadas e, também, não foi eficiente em mantê-las dentro da zona de conforto de bovinos em lactação, durante o período crítico de verão. Durante o inverno, as condições térmicas permaneceram dentro da zona de conforto térmico. Os níveis de ruído não excederam as faixas de desconforto sonoro para os animais.

Palavras-chave: acondicionamento ambiente, bem-estar animal, bovinos de leite, distribuição espacial, estresse por calor, geoestatística, resfriamento evaporativo.

**Spatial and temporal analysis of microclimatic variables
in compost-bedded pack barn with tunnel mode negative-pressure ventilation system**

ABSTRACT

This study aims to evaluate the distribution and spatial and temporal of microclimate conditions inside a closed compost-bedded pack barn (CBP) equipped with a negative ventilation system in tunnel mode, associated with the cooling system evaporative adiabatic (AECS) promoted by moistened porous plates during summer and winter. Geostatistical analysis was used to verify the system's potential to reduce the animals' thermal stress inside the facility. The research was carried out in a CBP located in the Zona da Mata region, Minas Gerais, Brazil. For each of the different stations analyzed and for different periods of the day, the following environmental mean variables observed inside a CBP were measured: dry-bulb temperature, relative humidity, and airspeed, temperature-humidity index, and enthalpy. In addition, noise levels were also measured. The results displayed the predominance of strong and moderate spatial and temporal dependence, and the variability of the attributes inside the CBP, with heat stress zones. The kriging maps showed that the most critical housing conditions in the thermal environment were found, mainly, from the central part of the CBP, towards the northwest face, close to the exhaust fans. The analyses also pointed out that the system presented temperature gradients along the length, up to 3 °C. During the summer afternoon, the entire region of the CBP was in a discomfort situation. During the winter, the measured environmental data remained within the comfort zone throughout the facility, at all periods of the day analyzed. The airspeed distribution over the entire interior area of the CBF always remained below 2.0 m s⁻¹. That indicates the possibility to intensify ventilation to obtain higher animal thermal comfort in hot conditions. The AECS improved the premise's internal thermal conditions. However, probably due to the closures' lack of thermal insulation, it did not allow spatial and temporal thermal uniformity during the two evaluated stations. It was also inefficient to keep the animals within the comfort zone for lactating cattle during the critical summer period. During winter, thermal conditions remained within the thermal

comfort zone. During winter, thermal conditions remained within the thermal comfort zone. The noise levels did not exceed the noise discomfort ranges for the animals.

Keywords: environmental conditioning, animal welfare, dairy cattle, spatial distribution, heat stress, geostatistics, evaporative cooling.

3.1 INTRODUÇÃO

A bovinocultura de leite representa uma das principais atividades econômicas no setor agropecuário do Brasil, porém o sucesso da produção de leite depende, entre outros fatores, do adequado controle dos efeitos climáticos sobre os animais. Os bovinos de leite, principalmente os de alta produção, são particularmente sensíveis ao estresse térmico, tornando a indústria de laticínios um dos setores pecuários mais afetados pelo calor (Ouellet et al., 2020). Assim, o ambiente térmico inadequado pode provocar alterações no desempenho produtivo e reprodutivo, na saúde e bem-estar dos bovinos, podendo inviabilizar a atividade (Polsky & von Keyserlingk, 2017; Dikmen et al., 2020).

Como forma de melhorar e controlar o ambiente de criação observa-se o crescente e contínuo interesse dos produtores, na busca por estratégias de manejos mais eficazes para garantir o aumento da produtividade e qualidade do leite, aliado ao uso racional dos recursos. Neste sentido, o sistema *Compost Barn* (CB), indica ser uma interessante alternativa de manejo que sugere possibilitar mitigação de efeitos negativos do estresse térmico sobre os bovinos de leite, via redução da magnitude térmica do ambiente durante as estações mais quentes do ano e horas mais quentes do dia.

O sistema CB já vem sendo usualmente utilizado, com sucesso, em regiões de clima temperado, como na América do Norte e Europa. O emprego do sistema CB é relativamente novo no Brasil, comparativamente aos sistemas convencionais (datando de menos de uma década), entretanto, indica ter potencial de trazer significativos benefícios ao conforto, bem-estar e desempenho produtivo dos bovinos de leite (Radavelli et al., 2020). Contudo, esta comprovação ainda demanda criteriosa investigação em relação aos efeitos de tal sistema sob as condições do clima tropical e subtropical do país.

Nas instalações CB, os animais permanecem em livre circulação no interior de um sistema coberto, que contém uma grande área de cama coletiva onde se distribuem as vacas, cama esta que é geralmente separada do corredor de alimentação por uma mureta de

contenção (Janni et al., 2007; Shane et al., 2010). A cama, usualmente constituída de material orgânico variado (fonte de carbono), deve ser frequentemente revolvida (pelo menos duas vezes ao dia), para incorporar os dejetos dos animais e favorecer a atividade dos microrganismos no processo de compostagem aeróbica (Barbeg et al., 2007; Leso et al., 2020).

No Brasil, basicamente a quase totalidade das instalações CB segue a tipologia construtiva padrão do país, constituindo-se de instalações abertas nas laterais, sem isolamento térmico nos telhados e podendo ser ventilados naturalmente ou via ventilação forçada por pressão positiva. Tal tipologia aberta, entretanto, vulnerabiliza o controle térmico do ambiente. Recentemente, algumas instalações CB fechadas com sistemas de controle ambiental mais rigoroso estão sendo construídas no Brasil, com o fim de sanar ou amenizar tal problema.

O sistema de confinamento totalmente fechado, contudo, requer atenção especial quanto à forma de ventilação, uma vez que a adequada renovação do ar no interior da instalação CB é essencial para melhorar a secagem da cama, a qualidade do ar interno, bem como para manter o conforto térmico ambiente dos animais (Janni et al., 2007; Lobeck et al., 2012). Notadamente, um dos principais desafios das instalações CB é manter a cama com níveis adequados de umidade, enfatizando-se a importância da ventilação neste tipo de sistema.

Dependendo da velocidade do ar, da concepção arquitetônica da instalação, tipologia construtiva e tipos de materiais de construção empregados, os gradientes de temperatura e umidade relativa do ar no interior da instalação podem sofrer muitas alterações e desuniformidade nos diferentes períodos do dia e do ano. Portanto, o conhecimento da variabilidade espacial de atributos do microclima é um fator indispensável por influenciarem no comportamento, bem-estar e produtividade dos animais em confinamento, permitindo uma visualização espacial que é útil para o planejamento e controle de informações do ambiente de produção, indicando possíveis zonas de estresse no interior da instalação e possibilitando tomadas de decisões certas para o correto controle ambiental (Miragliotta et al., 2006; Faria et al., 2008).

Dessa forma, o uso e suporte de ferramentas matemáticas e técnicas computacionais, como a utilização da geoestatística, torna a interpretação da variabilidade de atributos do ambiente mais precisa, auxiliando no manejo correto de animais confinados e no controle mais eficaz do sistema de ventilação utilizado (Carvalho et al., 2012; Abreu et al., 2016; Curi et al., 2017; Lopes et al., 2020).

De acordo com esse pressuposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a distribuição espacial e temporal das condições microclimáticas, no interior de uma instalação *Compost Barn* Fechada (CBF), porém, sem isolamento térmico nos fechamentos, equipada com sistema de ventilação negativa em modo túnel, associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE), durante o verão e o inverno. Para isto, utilizou-se a análise geoestatística para verificar o potencial do sistema em reduzir o estresse térmico ambiente.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização e descrição da instalação *Compost Barn*

Os dados para realização deste estudo foram coletados em instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) para o confinamento de bovinos de leite em fase de lactação, provida de ventilação por pressão negativa em modo túnel, associado ao sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE), com utilização de placas porosas, durante duas estações (dezembro de 2018 - verão e julho de 2019 - inverno) e quatro períodos do dia (madrugada, de 00h00 as 05h00; manhã, de 06h00 as 11h00; tarde, de 12h00 as 17h00; e noite, de 18h00 as 23h00).

A escolha por estudar o inverno e verão se deve ao fato de serem estas as estações climáticas mais críticas para a criação de bovinos de leite de origem europeia. Se por um lado, o calor do verão tropical é gerador de grande estresse aos animais, ocorre que no inverno o maior problema nas instalações CBF passa a ser a elevada umidade da cama, o que pode inviabilizar o sistema.

O estudo ocorreu em uma instalação CBF localizada na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil (670 m de altitude, coordenadas 20° 46' 41" S e 42° 48' 57" W). O clima local, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, com inverno frio e seco e verão quente e úmido (Silva et al., 2004).

A instalação CBF foi construída em maio de 2017, possuía orientação noroeste-sudeste, dimensões totais de 55,0 m de comprimento × 26,4 m de largura, telhado de duas águas, cobertura de telhas metálicas onduladas, altura do pé-direito de 5,0 m e beirais de 0,8 m. A distribuição espacial interna da instalação CBF era composta por: a) área de cama com 880 m²; b) corredor de alimentação com piso de concreto com área de 220 m² (separado da área de cama por uma mureta de 1,2 m de altura), com quatro bebedouros nesta região; c) pista de trato com piso de concreto com área de 220 m² (contendo cocho único de 55 m de

comprimento), sendo a região por onde o trator circula para distribuição do alimento; d) corredor de serviço com piso de concreto e área de 132 m² (Figura 3.1).

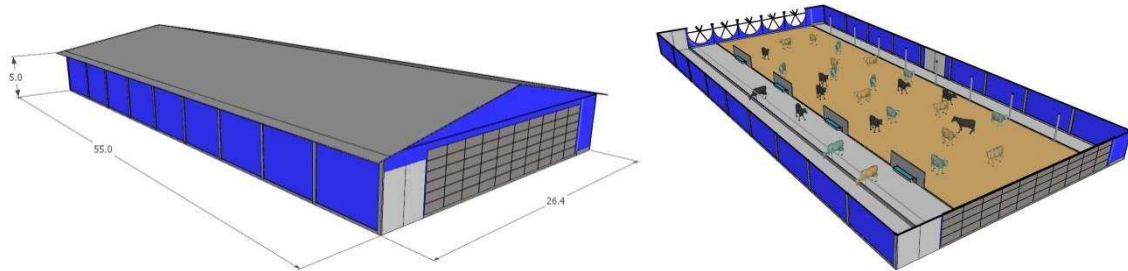


Figura 3.1 - Representação esquemática da instalação experimental. Fonte: Os autores.

O forro da cobertura e o material utilizado para o fechamento lateral da instalação eram constituídos de polipropileno, na cor azul. Cinco defletores foram instalados no sentido transversal da instalação (3 m acima do piso, espaçados a cada 11 m e o primeiro defletor estava a 5,5 m de distância da placa evaporativa) para direcionar e aumentar o fluxo de ar para os animais. Os defletores estendiam-se sobre a área de cama e corredor de alimentação. A instalação possuía sistema de abertura automática das cortinas, acionado em caso de falta de energia. A iluminação da instalação CBF foi realizada por meio de dez lâmpadas de LED (100W).

No lado sudeste da instalação CBF, uma série de cinco placas porosas de celulose (dimensões totais de 18,0 × 3,5 m) foi utilizada na composição de um sistema de resfriamento adiabático evaporativo do ar de ventilação. Um sensor, posicionado no interior da instalação, monitorava as condições ambientais e, foi programado para ser acionado quando a temperatura do ar fosse igual ou superior a 21 °C, assim, as placas eram umedecidas por gotejamento, de maneira a possibilitar o resfriamento adiabático do ar externo que atravessava a mesma via sucção (pressão negativa), promovida pelos exaustores situados na extremidade oposta. O sistema de condicionamento ambiente, assim constituído, operava através de painel com comando automático para acionamento de exaustores e do molhamento das placas porosas do sistema de resfriamento evaporativo.

No lado noroeste da instalação encontravam-se cinco grandes exaustores (3,5 m de diâmetro, seis hélices, volume de ar de 150.000 m³ h⁻¹ e potência de 1491,4 W). Os cinco exaustores permaneceram ligados continuamente (24 horas dia⁻¹).

A instalação apresentava cama constituída de mistura de maravalha e casca de café, com espessura de aproximadamente 0,60 m. O revolvimento da cama era mecanizado e acontecia de forma periódica, duas vezes ao dia, com profundidade de revolvimento de

0,20 m. O revolvimento era realizado através do implemento híbrido (escarificador com rolo destorroador) acoplado a um trator. O material de cama (casca de café, maravalha, e/ou serragem) era adicionado conforme a percepção visual de que a cama estivesse com excesso de umidade.

Seguindo o manejo já praticado na propriedade, as vacas em lactação foram distribuídas em dois lotes no interior da instalação CBF, de acordo com a produção de leite dos animais. Os animais com maiores taxas de produção foram alojados no Lote 1 (área de cama 38,5 m x 16,0 m), localizado próximo as placas evaporativas; e o Lote 2 (área de cama 16,5 m x 16,0 m), localizado próximo aos exaustores. No período experimental de verão, 80 vacas foram abrigadas na instalação CBF, com a mesma área de cama por animal, de 11 m² vaca⁻¹ para o Lote 1 e Lote 2. No período experimental de inverno, 88 vacas foram abrigadas na instalação CBF, com área de cama por animal de 10 m² vaca⁻¹ para o Lote 1 e 7,8 m² vaca⁻¹ para o Lote 2. Todas as vacas eram de raça Holandesa, com peso médio de cerca de 600 kg.

Durante o experimento, manteve-se a rotina padrão da propriedade, sendo que as ordenhas eram realizadas duas vezes ao dia (nos horários de 03h00 e 13h00) em sala de ordenha tipo espinha de peixe 2x5, anexa a instalação CBF. A duração média de cada ordenha era de 01h30. As vacas tinham livre acesso ao comedouro e aos bebedouros, sendo a alimentação fornecida duas vezes ao dia.

3.2.2 Instrumentos e medições ambientais

3.2.2.1 Sistema de coleta das variáveis microclimáticas

A coleta de dados microclimáticos (temperatura e umidade relativa do ar) ocorreu de forma ininterrupta, 24 horas dia⁻¹, em intervalos de 5 minutos, durante quinze dias no verão e inverno. Os registros dos dados de temperatura do bulbo seco (t_{bs} , °C) e umidade relativa do ar (UR, %) foram realizados por meio de sensores de baixo custo (DHT22, modelo AM2302, faixa de medição de umidade relativa de 0 a 100%, precisão de $\pm 2\%$, faixa de medição de temperatura de - 40° a + 80°C, precisão de $\pm 0,5$ °C; Aosong Electronics Co. Ltd, Guangzhou, China) distribuídos ao longo da região da cama e do corredor de alimentação, sendo definida uma área total de medição de 55 m x 20 m. A área interna da instalação CBF foi dividida em uma malha regular de 5,5 x 3,5 m, totalizando 54 pontos sensores⁻¹ espaçados uniformemente ao longo da instalação, conforme representado na Figura 3.2. Os sensores foram instalados a 2,0 m de altura em relação à cama e o piso do corredor de alimentação.

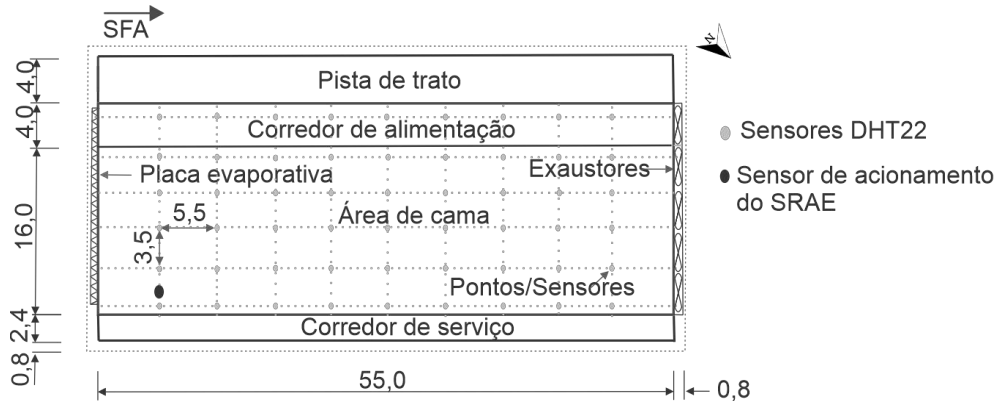


Figura 3.2 - Representação esquemática dos pontos de coleta no interior da instalação CBF. Dimensões em metros (m). SFA – Sentido do fluxo de ar. Legenda: • Sensores DHT22; • Sensor de acionamento do Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo (SRAE).

Os dados coletados pelos sensores eram enviados a cada 5 minutos para uma estação principal para o processamento e armazenamento dos dados em um micro SD. Esta estação consistia na placa Arduino Mega 2560 (<https://www.arduino.cc/>), com capacidade de receber dados de t_{bs} e UR do ar, de vários sensores DHT22.

Em cada placa Arduino Mega 2560 foi acoplado o módulo de relógio RTC (Real Time Clock) para o controle do tempo; Display LCD 16x2 (I2C), visor utilizado para apresentar as medições dos dados, horas e as datas fornecidas pelo RTC; módulo cartão Micro SD, que permite a leitura e gravação dos dados no cartão SD; quatro sensores DHT22; conforme metodologia adaptada de Freitas et al. (2019).

Para avaliação das condições ambientais externas, foi utilizado um abrigo meteorológico, no interior do qual foram dispostos dois registradores de t_{bs} e UR (HOBO[®] UX100-003). Os dados foram coletados a cada 5 minutos, 24 horas dia⁻¹. Esses dados foram utilizados para a caracterização climática da região onde a instalação CBF estava localizada.

Com o intuito de identificar os períodos ambientais mais críticos no interior da instalação CBF, os valores médios diários de t_{bs} e UR obtidos durante cada período experimental (verão e inverno) foram divididos em quatro períodos, sendo estes: período da madrugada (00h00 às 05h00), manhã (06h00 às 11h00), tarde (12h00 às 17h00) e noite (18h00 às 23h00).

A velocidade do ar interna foi medida em duas alturas diferentes, a 1,5 m de altura, com o intuito de verificar a velocidade do ar quando os animais estivessem levantados; e a 0,05 m de altura, com o intuito de verificar a velocidade do ar quando os animais estivessem deitados, bem como verificar a velocidade do ar para a secagem da cama. As medições foram feitas por meio de um anemômetro de fio quente (Instrutherm[®], modelo TAFR-180,

velocidade 0,2 a 20,0 m s⁻¹, precisão de ± 0,1 m s⁻¹). A velocidade média do ar (V_m , m s⁻¹) foi obtida posicionando o aparelho nos mesmos pontos que estavam os sensores DHT22 na região da cama e corredor de alimentação (totalizando 54 pontos), a velocidade do ar na altura de 0,05 m (V_c , m s⁻¹) foi obtida na região da cama (totalizando 45 pontos). As velocidades foram mensuradas no momento em que todos os portões da instalação estavam fechados, os exaustores em funcionamento e a instalação na presença de todas as vacas. Como os cinco exaustores permaneciam sempre ligados, foi realizada apenas uma medição ao dia durante todo o período experimental, sempre as 10h00.

Os níveis de ruído foram medidos na altura de 1,5 m, nos mesmos pontos que estavam os sensores DHT22 e com a presença de todos os animais na instalação CBF. Para as avaliações foi utilizado um medidor de nível de pressão sonora digital (Instrutherm[®], modelo ITDEC 4.000, com precisão de ± 1,5 dB, ponderação: A). Os registros de níveis de ruído foram obtidos em duas condições, com os exaustores ligados (EL) e exaustores desligados (ED), durante o período experimental de inverno.

3.2.2.2 Índices de conforto térmico

Posteriormente, de posse dos dados microclimáticos coletados e com a finalidade de avaliar possíveis condições de estresse por calor e a variabilidade espacial dos atributos, calculou-se o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e a entalpia específica do ar (H), para os quatro períodos do dia investigados, conforme as equações 1 e 2, respectivamente.

1) Índice de Temperatura e Umidade (ITU), corrigida e modificada por Mader et al. (2006).

$$ITU = 0,8 \cdot t_{bs} + UR \cdot \left(\frac{t_{bs} - 14,4}{100} \right) + 46,4 \quad (1)$$

2) Entalpia específica do ar (H), conforme modelo proposto por Rodrigues et al. (2011):

$$H = 1,006 \cdot T_{bs} + \frac{UR}{PB} 10^{\frac{7,5 \cdot T_{bs}}{237,3 + T_{bs}}} (71,28 + 0,052 \cdot T_{bs}) \quad (2)$$

Onde: H é a entalpia (kJ kg de ar seco⁻¹); e PB é a pressão barométrica (mmHg) do local, igual a 706 mmHg.

3.2.3 Análise Estatística

Como forma de melhor avaliar as variáveis estudadas, foram utilizadas as técnicas de estatística descritiva e geoestatística, que fornecem informações importantes sobre cada atributo e a sua influência no ambiente térmico.

3.2.3.1 Análise descritiva

A análise das variáveis foi verificada baseada na estatística descritiva dos dados registrados (t_{bs} , UR, ITU, H, V_m e V_c), obtendo-se valores da média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. A dispersão dos dados foi analisada adotando o critério de classificação para o coeficiente de variação (CV) proposto por Warrick e Nielsen (1980), classificado como baixo quando $< 12\%$; médio quando $12\% < CV < 24\%$ e alto quando $CV > 24\%$. Os dados médios de níveis de ruído foram apresentados na forma de gráfico de barra.

3.2.3.2 Geoestatística

A técnica da geoestatística foi utilizada para verificar a distribuição espacial do microclima dentro da instalação CBF e a dependência entre as variáveis nos pontos de coleta. A dependência espacial das variáveis ambientais (t_{bs} , UR, ITU, H e V_m e V_c) foi analisada usando ajustes de semivariograma e interpolação por krigagem ordinária. Este método foi utilizado para prever os níveis das variáveis em locais não amostrados no interior da instalação CBF.

Para a estimativa do semivariograma, foi utilizado o estimador de Matheron (1962), conforme equação 3, para quantificar a dependência espacial das variáveis dentro da instalação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (3)$$

Onde: $N(h)$ é o número de pares de observação $Z(X_i)$ e $Z(X_i + h)$ separados por uma distância h .

Do ajuste de um modelo matemático $\hat{\gamma}(h)$, foram obtidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma, chamado efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (a).

O Grau de Dependência Espacial (GDE) foi utilizado para analisar a dependência espacial e calculado a partir da razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$). Para

analisar o GDE dos atributos em estudo, utilizou-se da classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados uma forte dependência em semivariogramas com $GDE \leq 0,25$; dependência moderada em semivariogramas com $0,25 < GDE \leq 0,75$ e dependência fraca em semivariogramas com $GDE > 0,75$.

O semivariograma foi ajustado pelo Método de Máxima Verossimilhança Restrita (REML), conforme sugerido por Marchant e Lark (2007). Os modelos testados para o ajuste do semivariograma experimental foram esférico, exponencial e gaussiano (equações 4, 5 e 6, respectivamente), de acordo com Vieira et al. (2010), e através da biblioteca geoR (Ribeiro Junior & Diggle, 2001) do software R DEVELOPMENT CORE TEAM (2015).

Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), h \leq a \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, h > a$$

Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - EXP \left(\frac{-3h}{a} \right) \right) \quad (5)$$

Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - EXP \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right) \quad (6)$$

Posteriormente, conhecido o semivariograma das variáveis e ocorrendo dependência espacial, foram confeccionados os mapas da distribuição espacial dos níveis das variáveis microclimáticas através da técnica de krigagem ordinária dos dados. Método este que possibilita a visualização da espacialização dos dados, através da interpolação de valores, sem tendência e com variância mínima (Vieira, 2000). A partir dos dados interpolados, foram gerados mapas da superfície de resposta, utilizando o software Surfer[®], versão 13.4.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Avaliação do Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo

O perfil dos valores médios horários da temperatura e umidade relativa do ar no interior da instalação CBF e no ambiente externo (abrigo meteorológico) é mostrado na Figura 3.3.

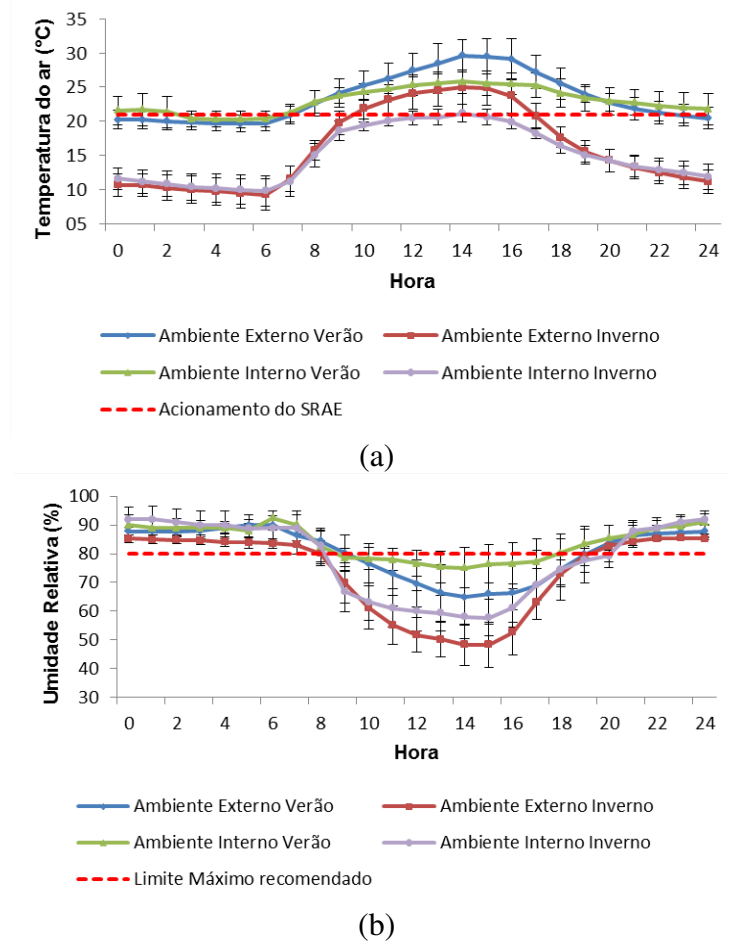


Figura 3.3 - Variação média e desvio padrão dos valores médios horários de (a) temperatura de bulbo seco (t_{bs}), em °C, e (b) umidade relativa (UR), em %, no interior da instalação *Compost Barn* fechada (CBF), equipada com o SRAE – Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo, e no ambiente externo (abrigo meteorológico), ao longo do período experimental do verão e do inverno.

Estes valores foram obtidos a partir das médias horárias destas variáveis, mensuradas em todos os pontos de tomadas de dados distribuídos no interior da instalação CBF e, também, os valores médios horários de t_{bs} e UR coletados no exterior (abrigo meteorológico) durante todo o período experimental de cada uma das estações climáticas estudadas (inverno e verão). Os dados correspondem, portanto, às médias horárias durante cada período de análise, no verão e inverno.

Pode-se observar, com base na Figura 3.3a, que os valores médios horários de t_{bs} no interior da instalação CBF, durante o verão, comportaram-se de maneira similar aos valores observados no ambiente externo, até o momento em que a t_{bs} atingiu 21,0 °C, a partir da qual ocorreu o acionamento automático da aspersão no material poroso, com vistas a promover o resfriamento evaporativo do ar de entrada.

Antes do acionamento do SRAE, ou seja, sob temperaturas do ar inferiores a 21,0 °C, embora seguindo curvas de comportamento paralelas, verificou-se que os valores de

temperatura do ar no interior (20 - 21 °C no verão e 11 - 19 °C no inverno) da instalação CBF foram levemente mais elevados do que os observados para as temperaturas externas (19 - 20 °C no verão e 9 - 20 °C no inverno). O aumento da temperatura no interior da instalação CBF pode ser atribuído à ineficiência do material utilizado nos fechamentos laterais e da cobertura, somado ao calor produzido pelas vacas e pelos equipamentos, pelo calor gerado no processo de compostagem da cama, e devido à energia calorífica oriunda das radiações solares de ondas curtas que atravessaram telhados e paramentos laterais e ficavam retidas temporariamente no interior da instalação CBF.

Contudo, a partir do acionamento do SRAE, verificou-se uma inversão das curvas de t_{bs} , ocorrendo uma redução das temperaturas internas do alojamento, comparativamente as do ambiente externo. Estas variações da t_{bs} médias internas e externas evidenciam, portanto, que o uso do sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE) foi capaz de reduzir a t_{bs} do ar interno ao alojamento, durante os períodos mais críticos do dia, com média de 4,0 e 3,8 °C abaixo do ambiente externo, durante o verão e inverno, respectivamente.

Assim, com base nos resultados apresentados na Figura 3.3a, observa-se que os valores médios horários de temperatura no interior do alojamento, durante o período crítico de verão, estiveram bem uniformes ao longo de todo o dia, entre 20 a 24 °C, o que ilustra que o SRAE manteve as vacas próximas ao conforto térmico ideal para bovinos de leite (Nääs, 1989). Já para o ambiente externo, os valores de temperatura do ar oscilaram de 19 a 29°C.

No que diz respeito a variável UR, pode-se observar, com base na Figura 3.3b, comportamentos similares de valores médios horários de UR do ambiente interno ao longo do tempo, quando comparados aos valores mensurados no ambiente externo. Porém, no caso dos períodos com temperaturas mais elevadas, foi necessário o uso do SRAE nas horas mais quentes do dia (temperaturas acima de 21 °C), demandando o acionamento do gotejamento na placa porosa, gerando o aumento do valor da UR no interior da instalação CBF. Os valores médios de UR observados foram elevados no interior da instalação CBF, durante as duas estações analisadas (predominância de valores médios de UR superiores a 70%).

Ao analisar os valores obtidos de t_{bs} e UR no verão, ressalta-se que, embora estudos tenham demonstrado que a ventilação por pressão negativa em modo túnel, associada ao resfriamento evaporativo, possibilite redução mais acentuada no resfriamento máximo obtido durante os períodos termicamente mais críticos do dia, sabe-se que a eficiência do sistema depende do valor da umidade relativa do ar ambiente na região, sendo que, quanto mais seco o ar, maior o potencial de resfriamento evaporativo (Jacobson et al., 2008).

Na Figura 3.4 encontram-se apresentados os valores médios horários do Índice de Temperatura e Umidade (ITU), referentes ao ambiente exterior e no interior da instalação CBF, durante o período experimental de verão e inverno.

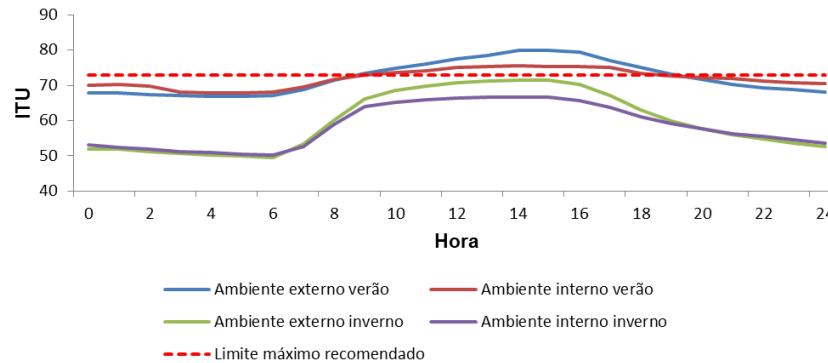


Figura 3.4 - Variação média do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) obtido no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), equipada com o SRAE – Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo, e no ambiente externo (abrigo meteorológico), ao longo do período experimental do verão e do inverno.

Verifica-se que, durante o verão, a variação média horária do ITU para ambos os ambientes (externo e interno) nos horários de maior temperatura do ar foram aqueles que estiveram acima do limite máximo recomendado pela literatura de 74 (Johnson, 1980; Mader et al., 2006) para bovinos de leite. Durante o verão, a média máxima de ITU foi de 76 e 80, no ambiente interno e externo, respectivamente; e durante o inverno, o valor médio máximo de ITU foi de 67 e 71, no ambiente interno e externo, respectivamente. Demonstrando que nos horários mais quentes do dia, as características arquitetônicas da instalação CBF e o sistema de ventilação adotado não foram suficientes para reduzir os valores de ITU. Diante disto, para se reduzir estes altos valores de ITU, seria importante realizar algumas melhorias internas na instalação CBF, como utilizar materiais de cobertura e fechamentos laterais com bom isolamento e, adequando a isso, outros artifícios de construção e de ventilação que possam contribuir para o melhor conforto térmico dos animais. Durante o inverno, os valores médios horários de ITU (externo e interno) permaneceram dentro dos limiares recomendando pela literatura.

Conforme esperado, comparativamente ao inverno, o período de verão foi mais crítico, no que diz respeito ao conforto térmico de vacas leiteiras, por terem sido registrados elevados valores de t_{bs} , UR e ITU, e também, por terem apresentado maior intervalo de tempo de permanência em condições de desconforto térmico por calor.

Nesta instalação CBF estudada, o sensor para acionamento do gotejamento sobre o material poroso com fins de dar início ao SRAE, foi programado de acordo com o fabricante

para ser acionado considerando o valor de temperatura de bulbo seco (21°C), contudo, pelos resultados obtidos, mostrou-se inadequado no controle da magnitude do valor de UR, que não deve ultrapassar 80% (Ward, 2013), o que pode ser um grande problema na obtenção de eficiência máxima ou satisfatória de arrefecimento térmico do ambiente.

3.3.2 Geoestatística

Na Tabela 3.1 encontram-se apresentados a análise descritiva das variáveis t_{bs} (°C) e UR (%), referentes aos valores médios obtidos em diferentes períodos do dia, no interior da instalação CBF, durante o período experimental de verão e inverno.

Tabela 3.1 – Análise descritiva das variáveis temperatura de bulbo seco do ar (t_{bs} , °C) e umidade relativa (UR, %), referentes aos valores médios obtidos no período da madrugada (00h00 - 05h00), manhã (06h00 - 11h00), tarde (12h00 - 17h00) e noite (18h00 - 23h00), no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o verão e inverno.

Variável	Período	Média	Mediana	¹ DP	² CV	³ Curt	⁴ Ass.
t_{bs} Verão	Madrugada	21,0	20,7	0,533	2,35	-1,325	0,546
	Manhã	23,0	22,8	0,591	2,58	-1,313	0,409
	Tarde	26,1	26,2	0,630	2,41	-1,037	0,083
	Noite	23,0	22,8	0,470	2,05	-0,819	0,707
t_{bs} Inverno	Madrugada	11,0	11,1	0,262	2,37	-1,224	0,171
	Manhã	16,2	16,1	0,310	1,92	-1,567	0,143
	Tarde	20,9	21,1	0,538	2,59	-1,077	-0,062
	Noite	14,4	14,3	0,258	1,79	-1,447	0,170
UR Verão	Madrugada	92,9	94,1	2,450	2,63	-1,233	-0,731
	Manhã	86,3	87,0	3,120	3,61	-0,830	-0,303
	Tarde	75,8	76,0	3,216	4,24	-0,746	-0,082
	Noite	86,3	86,8	2,607	3,02	-0,300	-0,791
UR Inverno	Madrugada	98,1	98,0	0,751	0,76	3,330	-1,457
	Manhã	85,2	86,0	2,850	3,34	-1,097	-0,593
	Tarde	76,6	77,0	2,423	3,16	-0,952	-0,286
	Noite	93,6	94,8	1,601	1,71	-1,368	-0,521

¹DP: Desvio Padrão; ²CV: Coeficiente de Variação; ³Curt: Curtose; ⁴Ass.: Assimetria.

Observa-se que os níveis médios de t_{bs} nos diferentes períodos variaram de 21,0 a 26,1 °C no verão, e de 11,0 a 20,9 °C no inverno, já os níveis médios de UR variaram de 75,8 % a 92,9 % no verão, e 76,6 e 98,1 % no inverno.

As variáveis analisadas apresentaram valores próximos da média e mediana, o que permite assumir que os dados não apresentam assimetria acentuada, apesar da ocorrência de algumas distribuições assimétricas. De acordo com Little e Hills (1978), os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal, quando valores da média, mediana e da moda são

semelhantes. Além disso, a dispersão dos dados pode ser analisada pelo coeficiente de variação. Warrick e Nielsen (1980) classificaram como baixa dispersão os dados com $CV < 12\%$, confirmando assim, uma baixa dispersão dos dados de temperatura e umidade relativa obtidos durante todos os períodos analisados no inverno e verão. O baixo CV das variáveis t_{bs} e UR pode ser justificado pelo sistema de ventilação utilizado e pelo estreito comprimento da instalação em estudo, o que proporcionou uma distribuição mais uniforme desses atributos.

Verificou-se que, durante o período da tarde, no verão, as médias de t_{bs} mantiveram-se ligeiramente acima da zona de termoneutralidade, ou seja, acima do intervalo entre 5 a 25°C citado por Yousef (1985) e Roenfeldt (1998) como sendo de conforto. Também esteve acima do limite recomendado por Nääs (1989), que cita a faixa de temperatura do ar caracterizada como situação de conforto para vacas em lactação entre 4,0 e 24,0°C, e pode ser idealmente restrita aos limites de 7,0 a 21,0°C, dependendo da umidade relativa do ar.

No inverno, as temperaturas médias do ar no interior da instalação CBF permaneceram dentro da zona de termoneutralidade em todos os períodos avaliados (Tabela 3.1), com elevados valores de umidade relativa do ar para o mesmo período considerado, comportamento este similar ao ocorrido durante o verão.

O valor de UR foi superior a 68% em todas as situações analisadas. Segundo Nääs e Arcaro Jr. (2001), o valor de UR de 70% é considerado o limite superior para possibilitar o uso do SRAE no resfriamento do ar no interior do ambiente destinado a animais em lactação, através da utilização da água. A condição de temperatura média ambiente (26,1 °C) encontrada durante o horário mais quente da tarde no verão, associada à umidade relativa média (76 %) registrada no mesmo período, constitui situação de leve estresse térmico, contudo ainda não prejudicial à performance produtiva das vacas (Armstrong, 1994).

Na Tabela 3.2 está apresentada a análise geoestatística dos valores médios de cada período de tempo para as variáveis t_{bs} (°C) e UR (%), no interior da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) durante o período experimental de verão e inverno.

Tabela 3.2 - Método, modelo e parâmetros estimados do semivariograma experimental para os valores médios de cada período de tempo para as variáveis temperatura de bulbo seco (t_{bs} , °C) e umidade relativa (UR, %), no interior da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) durante o período de inverno e verão.

Variáveis	Método	Modelo	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GDE	EM	DPm	ER	DPR
Verão											
t_{bsMad}^1	REML	Gaussiano	0,013	0,242	0,256	51,035	0,052	-0,001	0,130	-0,002	1,011
$t_{bsManhã}$	REML	Gaussiano	0,009	0,374	0,383	22,830	0,024	0,007	0,147	0,023	1,032
$t_{bsTarde}$	REML	Gaussiano	0,003	1,025	1,028	34,619	0,003	-0,001	0,073	-0,002	1,014
$t_{bsNoite}$	REML	Gaussiano	0,033	0,434	0,467	49,480	0,072	0,001	0,206	0,001	1,014
Inverno											
t_{bsMad}^1	REML	Esférico	0,016	0,082	0,098	3,823	0,167	0,000	0,319	0,000	1,009
$t_{bsManhã}$	REML	Gaussiano	0,000	0,078	0,078	20,550	0,004	0,001	0,036	0,011	1,003
$t_{bsTarde}$	REML	Gaussiano	0,024	0,591	0,616	34,685	0,039	-0,001	0,194	-0,003	1,028
$t_{bsNoite}$	REML	Esférico	0,016	0,081	0,098	3,890	0,167	0,000	0,318	0,000	1,009
Verão											
UR _{Mad} ¹	REML	Gaussiano	0,017	4,079	4,096	19,158	0,004	0,002	0,251	0,004	0,956
UR _{Manhã}	REML	Gaussiano	0,131	30,866	30,996	36,141	0,004	-0,011	0,517	-0,009	1,044
UR _{Tarde}	REML	Gaussiano	0,221	10,753	10,974	27,857	0,020	0,004	0,562	0,002	0,964
UR _{Noite}	REML	Gaussiano	0,142	2,374	2,516	30,240	0,057	-0,008	0,543	-0,008	1,190
Inverno											
UR _{Mad} ¹	REML	Gaussiano	0,770	0,679	1,449	25,924	0,531	-0,010	0,968	-0,005	1,007
UR _{Manhã}	REML	Gaussiano	0,092	6,249	6,341	19,036	0,015	0,005	0,573	0,006	1,033
UR _{Tarde}	REML	Gaussiano	0,142	2,374	2,516	30,240	0,057	-0,041	0,936	-0,040	1,939
UR _{Noite}	REML	Gaussiano	0,142	2,374	2,516	30,240	0,057	-0,005	0,441	-0,005	0,988

¹Mad: Madrugada; C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; C₀ + C₁ – patamar; a – alcance; e GDE – grau de dependência espacial; EM - erro médio; DPm - Desvio padrão do erro médio; ER - Erro reduzido; DPR - Desvio padrão do erro reduzido. REML - Método de Máxima Verossimilhança Restrita.

De acordo com a análise geoestatística, todas as situações analisadas apresentaram variabilidade espacial das variáveis (t_{bs} e UR) no interior da instalação CBF, expressa pelos semivariogramas. A importância do efeito pepita (C_0) está relacionada à verificação de descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre os pontos coletados, sendo que parte dessa descontinuidade pode ser devida a erros ocorridos, por exemplo, por erros de análise, erros de amostragem, entre outros (Vieira, 2000). Como é impossível quantificar a contribuição individual desses erros, o efeito pepita pode ser expresso como porcentagem do patamar, facilitando, assim, a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Trangmar et al., 1985).

Dessa forma, o GDE mostrou que os atributos microclimáticos apresentaram dependência espacial de acordo com a classificação proposta por Cambardella et al. (1994). Os semivariogramas ajustados demonstraram que a t_{bs} e UR apresentaram grau de dependência forte e moderado, sendo o semivariograma ajustado no modelo gaussiano em praticamente todas as situações, exceto a t_{bs} durante a madrugada e noite no inverno que foram ajustadas ao modelo esférico. Quanto maior a dependência espacial (GDE), menor a contribuição do efeito pepita na variabilidade dos dados e, com isso, a krigagem é melhor (Curi et al., 2017).

Os valores de alcance em relação aos semivariogramas possui relevância na determinação do limite de dependência espacial, ou seja, indicam a distância limite de amostragem em que os pontos coletados estão correlacionados espacialmente (Ferraz et al., 2016). Os maiores valores de alcance de t_{bs} durante o verão referiram-se ao período da madrugada (verão), com alcance de 51,035 m, e no inverno durante o período da tarde, com alcance de 34,685 m. Para a UR, os maiores valores de alcance referiram-se ao período da manhã no verão e durante a tarde e noite no inverno, com alcance de 36,141 m, 30,240 m e 30,240 m, respectivamente.

Na Figura 3.5 está apresentada a distribuição espacial da variável temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), no período da madrugada, manhã, tarde e noite, obtidos no interior da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF), durante o período experimental de verão e inverno.

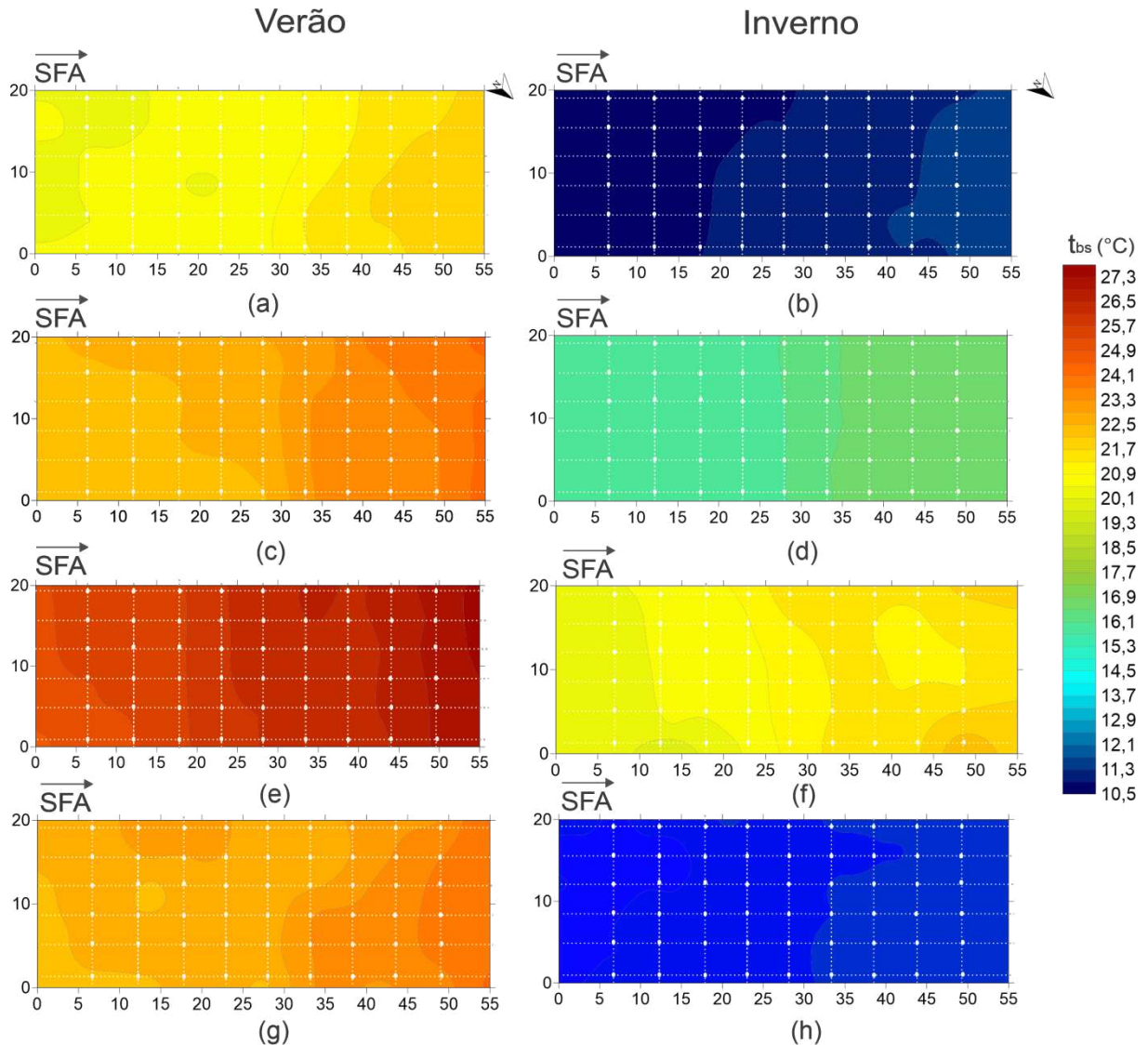


Figura 3.5 - Distribuição espacial da variável temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), durante o período da madrugada (00h00-05h00), no verão (a) e inverno (b); manhã (06h00-11h00), no verão (c) e inverno (d); tarde (12h00-17h00), no verão (e) e inverno (f); e noite (18h00-23h00), no verão (g) e inverno (h), no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período experimental de verão e inverno. SFA – Sentido do fluxo de ar.

Observa-se pela a Figura 3.5 que, em todas as situações analisadas, a t_{bs} aumentou à medida que se afastava das placas de resfriamento evaporativo, consequentemente, as temperaturas mais elevadas são encontradas na extremidade oposta, próximos aos exaustores. Conforme previsto, durante as estações de verão e inverno, as temperaturas registradas nos períodos da madrugada e noite são inferiores às registradas no período da manhã e noite, devido à inversão térmica natural.

Para o período de verão, nas situações avaliadas pelas Figuras 3.5 a, c, g, a área da instalação CBF apresentou t_{bs} dentro da faixa de temperatura recomendada para bovinos em lactação (valores inferiores a 26°C), exceto no período da tarde (Figura 3.5e).

No período da tarde, no verão (Figura 3.5e), observou-se a maior diferença (quase 3,0 °C) entre os valores de mínimo e máximo registrados de t_{bs} , mostrando a não homogeneidade dessa variável no interior da instalação, o que pode ser um indicativo de dependência espacial entre os pontos registrados. Portanto, para este período, observou-se variação do gradiente da t_{bs} ao longo da instalação CBF, no sentido longitudinal. No sentido da saída de ar, a t_{bs} apresentou aumento acentuado a partir de 20 m, atingindo valores médios máximos superiores a 27,0 °C na região próxima dos exaustores, valores que excederam a temperatura crítica superior indicada entre 25 e 26 °C para vacas leiteiras holandesas (Berman et al., 1985; Perissinotto & Moura, 2007), apontando que parte da região da instalação onde estava localizado o Lote 1 e toda a região onde estava localizado o Lote 2, os animais estavam sob estresse por calor. A análise também permitiu inferir que o sistema de controle climático utilizado não foi eficiente em garantir temperaturas dentro da faixa de conforto durante todo o período de temperaturas críticas ambientais.

À medida que o ar entra e se move longitudinalmente na instalação ocorre elevação da temperatura do ar, o que pode ser justificado em função do uso do sistema de ventilação negativa em modo túnel. O acionamento dos exaustores promove o deslocamento do ar de entrada em direção à saída (face em que estão localizados os exaustores). Esse fluxo de ar longitudinal carrega o calor metabólico produzido pelos animais confinados alojados, pela compostagem da cama, pela carga térmica gerada pelos equipamentos utilizados e oriunda da radiação solar emitida através da cobertura e dos fechamentos laterais, bem como promove o caminhamento de poluentes do ar (umidade, amônia, poeira, etc.) (Teles Júnior, 2019; Damasceno, 2020).

Segundo Kadzere et al. (2002), em temperaturas ambientes acima de 26 °C, as vacas leiteiras podem chegar a um ponto em que seu sistema termorregulador não consegue mais garantir perda satisfatória de calor corporal e o animal entra em estresse por calor. Os ajustes fisiológicos e metabólicos resultantes das respostas termorregulatórias ao estresse térmico têm consequências negativas na produtividade e na saúde dos bovinos de leite. O menor desempenho produtivo e reprodutivo se deve, em grande parte, aos efeitos do estresse térmico na diminuição da ingestão de alimento para reduzir a produção de calor metabólico e, assim, buscar manter a homeotermia (Renaudeau et al., 2012).

Entre os fatos da não uniformidade da t_{bs} pode-se também citar o posicionamento do único sensor para acionamento do gotejamento sobre o material poroso com fins de dar início ao SRAE. Coelho (2018) realizou um estudo em instalação com pressão negativa, associado ao SRAE, com o intuito de estabelecer a posição mais representativa das condições médias de

temperatura e umidade relativa do ar interna no interior do alojamento. Os melhores posicionamentos espaciais para alocação dos sensores de temperatura do ar foram definidos sendo nas regiões central e lateral da instalação, afastados das entradas e saídas de ar. Para os sensores de umidade relativa do ar os melhores posicionamentos são na lateral da instalação e próximos das entradas e saídas de ar. Portanto, diferente do posicionamento do sensor adotado no presente estudo.

Para o período de inverno (Figura 3.5b, d, f, h), as temperaturas se mantiveram dentro da faixa de conforto para vacas leiteiras durante todo período experimental, de acordo com o limite proposto por Roenfeldt (1998), com temperatura média máxima obtida na tarde de inverno, de 22,2 °C, no sentido da saída de ar da instalação (face noroeste da instalação CBF) (Figura 3.5f). O sistema de ventilação, o qual permanecia sempre em funcionamento, era utilizado para renovação do ar e auxílio na secagem da cama. Observou-se o acionamento do SRAE durante o inverno somente no período da tarde, quando os valores de temperatura do ar interno estiveram acima de 21°C (Figura 3.5f).

Também foram observados valores notavelmente elevados de t_{bs} na lateral próxima ao corredor de alimentação, em todos os períodos avaliados (Figura 3.5), possivelmente, devido à falta de isolamento dos fechamentos laterais, falhas na vedação das laterais, e devido à abertura de um portão localizado na entrada da pista de trato, causando vazamentos de ar resfriado e a entrada de ar quente.

No verão, o período que proporcionou maior uniformidade de t_{bs} no interior da instalação foi durante a madrugada (Figura 3.5a), com amplitude de 1,6 °C, período este em que o SRAE estava desligado, e somente os exaustores estavam em funcionamento. Isso também foi observado durante o inverno (Figuras 3.5b, d, h), nos quais a variabilidade foi menor para o período da madrugada, manhã e noite, com amplitude de 0,9 °C para os três períodos. Estes períodos citados foram os de menores t_{bs} e estiveram dentro do limite recomendado pela literatura. No inverno, a variabilidade dos valores de t_{bs} mostrou-se mais acentuada do que no verão (amplitude total de 7 e 11,7 °C no verão e inverno, respectivamente).

Também foi verificado que os valores de t_{bs} no interior da instalação CBF foram menores durante o período da manhã, comparativamente ao período da tarde. No período da manhã devido à inclinação dos raios solares, a incidência da radiação solar direta é menor, promovendo menor temperatura do ar, associada a maior umidade relativa do ar, proporcionando melhores condições de conforto para os animais (Silva et al., 2020).

Conforme esperado, comparativamente ao inverno, os maiores valores de t_{bs} foram encontrados durante o verão, visto que a região apresenta as características climáticas definidas entre as duas estações analisadas, com o inverno com temperaturas do ar mais amenas. A menor diferença entre as duas estações foi observada durante o período da tarde, apresentando uma diferença entre a t_{bs} máxima de 5 °C. Já em relação a maior diferença de t_{bs} entre o verão e o inverno foi observada no período da madrugada, apresentando uma diferença entre a t_{bs} máxima de 10,4 °C.

Na Figura 3.6, encontram-se os mapas de distribuição espacial da variável umidade relativa do ar (UR, %), no período da madrugada, manhã, tarde e noite, obtidos no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período experimental de verão e inverno.

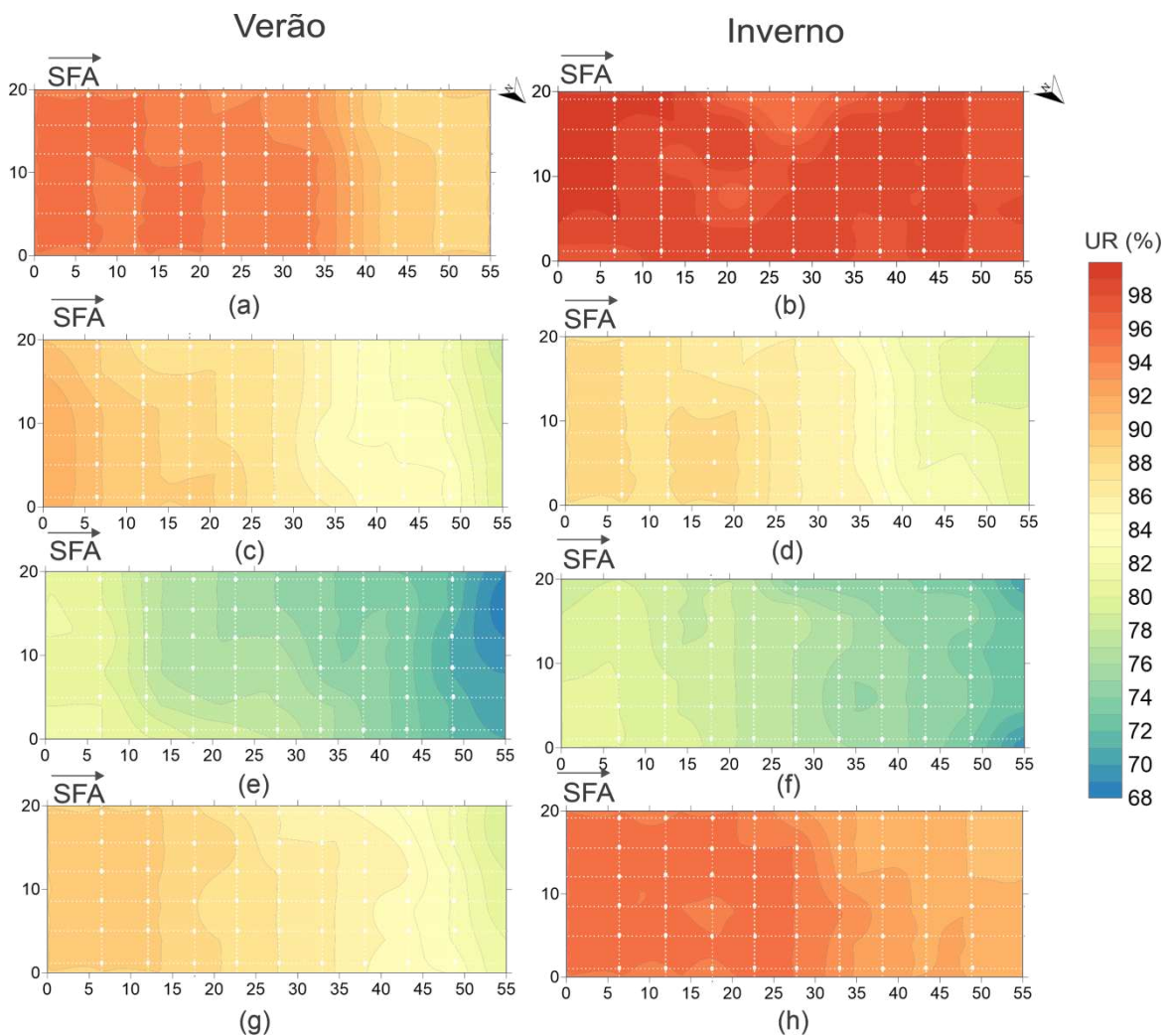


Figura 3.6 - Distribuição espacial da variável umidade relativa do ar (UR, %), durante o período da madrugada (00h00-05h00), no verão (a) e inverno (b); manhã (06h00-11h00), no verão (c) e inverno (d); tarde (12h00-17h00), no verão (e) e inverno (f); e noite (18h00-23h00), no verão (g) e inverno (h), no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período experimental de verão e inverno. SFA – Sentido do fluxo de ar.

Segundo o mencionado mapa de krigagem para UR (Figura 3.6), observa-se um padrão distinto daquele observado para a t_{bs} . A redução da umidade relativa do ar ocorreu gradativamente ao longo do comprimento da instalação CBF. Nas regiões de menores valores de t_{bs} , na face sudeste da instalação CBF, observaram-se os maiores valores de UR do ar; ou seja, os maiores valores estiveram próximos às placas porosas para resfriamento evaporativo, onde os níveis médios de UR foram predominantemente superiores a 75 %. A partir dos resultados, observou-se valores fora dos limites recomendados pela literatura para as condições ideais (Nääs & Arcaro Jr, 2001).

Ward (2013) relata a importância da umidade relativa dentro da instalação não exceder 80% ao usar as placas de resfriamento evaporativo durante o tempo quente, pois pode causar mais sofrimento aos animais, dificultando a dissipação de calor. Esta premissa justifica a relevância de manter um correto manejo do sistema de resfriamento evaporativo.

No verão, o período no qual se observou maior uniformidade dos valores de UR do ar no interior da instalação CBF foi o da madrugada (Figura 3.6a), com baixa amplitude de 6 %. Isto também foi observado durante o período de investigação no inverno (Figuras 3.6b, h), nos quais a variabilidade foi menor para o período da madrugada e noite, com amplitude de 3 % e 5 %, respectivamente. Entre os fatores responsáveis por tais resultados, pode-se mencionar o fato de que, em ambos os períodos, o SRAE esteve desligado e somente os exaustores estavam em funcionamento, assim tornando a UR mais homogênea nesse período. Durante o período da tarde, no verão e inverno, foram observados os maiores valores de amplitude de UR do ar, sendo de 12 % para as duas estações (Figura 3.6e, f).

Na face sudeste da instalação CBF, próximo das placas evaporativas, até próximo à parte central da instalação CBF e nos períodos da madrugada, manhã e noite, durante o verão e inverno (Figura 3.6a, b, c, d, g, h), pode-se observar valores elevados de UR, os quais foram superiores a 85%. Os excessivos valores de UR encontrados para as duas estações podem ser explicados pela alta umidade natural do ambiente interno, ser proveniente da cama, bebedouros, da água liberada pela respiração e dejetos dos animais.

Além disso, os elevados valores de umidade relativa do ar no interior da instalação CBF é justificado pelo SRAE. Este tipo de sistema de resfriamento aumenta ainda mais a umidade relativa diurna no interior de instalações fechadas com ventilação em túnel (Smith et al., 2006). Assim, quando o ar quente e não saturado, externo a instalação, é forçado (pelos exaustores posicionados na extremidade oposta) a atravessar a placa porosa umedecida, ocorre troca simultânea de calor e massa, com mudança de estado de parte da água da fase líquida para vapor, e elevação da umidade relativa do ar de entrada, com conseqüente redução

da temperatura. Ou seja, ocorre redução da temperatura do ar interior, porém com elevação da sua umidade relativa (Tinôco, 1996; Baêta & Souza, 2010). A capacidade de redução da temperatura do ar através do resfriamento evaporativo é tanto maior, quanto maior for a temperatura e menor for a umidade relativa do ar a ser resfriado (Smith et al., 2006). Com isso, à medida que a umidade relativa do ar aumenta a capacidade de se reduzir a sua temperatura via resfriamento evaporativo diminui (Harner & Smith, 2008).

A utilização de SRAE (independentemente da forma como é incorporada a água no processo seja através de placas evaporativas, nebulizadores, aspersores, etc.), não deve ser recomendada em ambientes onde a umidade relativa seja igual ou superior a faixa de 80 %, devido ao aumento da umidade associada a esses sistemas (Fournel et al., 2017).

De acordo com Leso et al. (2020), em instalações CB, principalmente em condições de elevada umidade relativa do ar, é necessário maior atenção ao manejo da cama, necessitando de mais frequente incorporação de novo material seco para reduzir a umidade do substrato e manter a área de descanso seca, mais salubre e confortável para as vacas. O aumento excessivo da umidade relativa do ar em instalações CBF, além de comprometer a saúde e bem-estar dos animais, também pode influenciar na higiene dos mesmos devido ao contato com sujidades através da cama úmida. Adicionalmente, cama muito úmida compromete a qualidade do leite, dificulta o processo de compostagem do substrato, além de aumentar a deterioração de elementos construtivos, causando empenamento e apodrecimento de madeiras e oxidação acelerada de peças de metal presentes na instalação (Damasceno, 2020).

Smith et al. (2006) avaliaram uma instalação *Free Stall* fechada, com ventilação em túnel, associada ao resfriamento evaporativo, localizada no Norte de Mississippi, EUA. Os autores observaram que o aumento da umidade relativa do ar contribuiu significativamente para as condições de estresse por calor nos bovinos de leite durante o estudo. O sistema de resfriamento evaporativo aumentou a umidade relativa diurna dentro da instalação em $23,3 \pm 0,55 \%$ e $22,3 \pm 0,83 \%$ acima da umidade relativa do ar externo, durante os anos de 2001 e 2003, respectivamente.

Na Tabela 3.3 encontram-se apresentados os valores de média, mediana, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), curtose (Curt) e assimetria (Ass.) das variáveis ambientais analisadas ITU, H, V_m e V_c , referentes aos valores médios obtidos durante os períodos estudados ao longo do experimento.

Tabela 3.3 – Estatística descritiva das variáveis Índice de Temperatura e Umidade (ITU), Entalpia específica do ar (H, kJ kg de ar seco⁻¹), velocidade média do ar (V_m , m s⁻¹) e velocidade no nível da cama (V_c , m s⁻¹), referentes aos valores médios obtidos no período da madrugada (00h00-05h00), manhã (06h00-11h00), tarde (12h00-17h00) e noite (18h00-23h00), no interior da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) durante o período experimental de verão e inverno.

	Variável	Média	Mediana	¹ DP	² CV	³ Curt	⁴ Ass.
Verão	ITU						
	Madrugada	69,3	68,9	0,760	1,09	-1,359	0,502
	Manhã	72,2	71,9	0,713	0,98	-1,431	0,358
	Tarde	76,1	76,3	0,624	0,82	-1,226	-0,128
Inverno	ITU						
	Madrugada	51,9	52,0	0,523	1,01	-1,218	0,131
	Manhã	60,9	60,7	0,458	0,75	-1,580	0,081
	Tarde	68,2	68,4	0,693	1,02	-0,996	-0,121
Verão	H						
	Madrugada	59,8	59,6	0,894	1,49	-1,195	0,535
	Manhã	63,8	63,7	0,714	1,11	-1,306	0,088
	Tarde	69,4	69,6	0,731	1,05	-0,358	-0,698
Inverno	H						
	Madrugada	32,6	32,7	0,679	2,08	-1,328	0,189
	Manhã	42,6	42,6	0,293	0,68	0,105	0,542
	Tarde	53,0	53,0	0,748	1,41	-0,179	0,119
Verão	V_m Verão	1,6	1,6	0,188	12,42	1,464	-0,667
	V_c Verão	1,5	1,4	0,131	13,12	0,135	0,596
Inverno	V_m Inverno	1,4	1,4	0,139	10,02	-0,177	0,129
	V_c Inverno	1,2	1,1	0,110	9,44	-0,437	0,089

¹DP: Desvio Padrão; ²CV: Coeficiente de Variação (%); ³Curt: Curtose; ⁴Ass.: Assimetria.

Conforme esperado, em decorrência dos valores de temperatura e umidade relativa do ar encontrados, observou-se que referente às variáveis ITU e H, os maiores valores médios foram verificados no período da tarde no verão, sendo de 76,1 e 69,1, respectivamente; enquanto os menores valores foram encontrados no período da madrugada no inverno, sendo de 51,9 e 32,6, respectivamente (Tabela 3.3).

A V_m foi de 1,6 e 1,4 m s⁻¹ no verão e inverno, respectivamente; e a V_c foi de 1,5 e 1,2 m s⁻¹ no verão e inverno, respectivamente. A média do gradiente de velocidade do ar foi de 0,1 m s⁻¹ no verão e 0,2 m s⁻¹ no inverno, indicando que a velocidade do ar diminuiu ao longo da altura.

As variáveis apresentaram baixa variabilidade (CV < 12%), exceto as variáveis V_m e V_c , obtidas no verão, que apresentaram média variabilidade (12% < CV > 24%) dos dados. A média variabilidade encontrada pode ser um indicativo da existência de heterogeneidade dos

dados. Segundo Faria et al. (2008), a alta variabilidade da velocidade do vento pode ser explicada pelo fato de que essa variável é caracterizada por mudar sua magnitude e direção constantemente em intervalos curtos de tempo.

Na Tabela 3.4 encontram-se apresentados o método, modelo e parâmetros estimados do semivariograma experimental para os valores médios de cada período de tempo para as variáveis Índice de Temperatura e Umidade (ITU), Entalpia específica do ar (H , kJ kg de ar seco⁻¹) e velocidade do ar (V_m e V_c , m s⁻¹), no interior da instalação CBF.

Com base nos resultados da análise geoestatística, verifica-se que as variáveis ITU, H e V_m e V_c apresentaram dependência espacial. Damasceno et al. (2019) ao estudarem a variabilidade espacial de atributos microclimáticos de uma instalação CBF em modo túnel, com o uso da ferramenta geoestatística e confecção de mapas de krigagem, também encontraram dependência espacial para os atributos climáticos t_{bs} , UR, ITU e V_m .

As variáveis ITU, H e V_c apresentaram alta dependência espacial, exceto a entalpia durante o período da noite no inverno que apresentou moderada dependência espacial. A V_m apresentou moderada dependência espacial durante o período de verão e inverno.

Ao analisar o alcance, a que se referem à extensão espacial em que os dados estão correlacionados, para todos os períodos em que os dados foram amostrados, os pontos foram correlacionados com outros pontos a distâncias consideráveis. Os maiores valores de alcance para o ITU referiram-se ao período da tarde (46,371 m) no verão; para a entalpia no período da noite (52,405 m) no inverno; a V_m com valores similares no inverno e verão (22,498 m e 23,362 m, respectivamente); e a V_c também apresentou valores similares durante o inverno e verão (16,118 m e 15,637 m, respectivamente).

Tabela 3.4 -Método, modelo e parâmetros estimados do semivariograma experimental para os valores médios de cada período de tempo para as variáveis Índice de Temperatura e Umidade (ITU), Entalpia (H, kJ kg de ar seco⁻¹) e velocidade do ar (V_m e V_c, m s⁻¹), no interior da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF).

Variável	Método	Modelo	C ₀	C ₁	C ₀ +C ₁	a	GDE	ME	SDm	RE	SDR
Verão											
ITU _{Mad} ¹	REML	Gaussiano	0,010	0,374	0,384	19,488	0,026	-0,001	0,231	-0,003	1,008
ITU _{Manhã}	REML	Gaussiano	0,026	0,480	0,506	20,629	0,051	0,009	0,239	0,018	1,030
ITU _{Tarde}	REML	Esférico	0,012	0,558	0,570	46,371	0,021	0,000	0,174	-0,001	0,547
ITU _{Noite}	REML	Gaussiano	0,090	0,475	0,566	38,744	0,160	0,000	0,340	0,000	1,013
Inverno											
ITU _{Mad} ¹	REML	Gaussiano	0,113	0,761	0,874	16,738	0,129	0,000	0,579	0,000	1,009
ITU _{Manhã}	REML	Gaussiano	0,001	0,123	0,124	17,312	0,005	0,002	0,061	0,010	0,995
ITU _{Tarde}	REML	Gaussiano	0,057	0,756	0,813	28,990	0,070	-0,005	0,304	-0,007	1,033
ITU _{Noite}	REML	Esférico	0,049	0,243	0,292	3,940	0,167	0,000	0,550	0,000	1,009
Verão											
H _{Mad} ¹	REML	Gaussiano	0,112	0,654	0,765	15,636	0,146	-0,009	0,500	-0,009	1,026
H _{Manhã}	REML	Esférico	0,001	0,604	0,605	16,571	0,002	0,011	0,504	0,011	1,024
H _{Tarde}	REML	Esférico	0,000	0,716	0,716	18,709	0,000	0,002	0,474	0,002	0,947
H _{Noite}	REML	Esférico	0,188	0,922	1,110	26,520	0,169	-0,006	0,694	-0,004	1,013
Inverno											
H _{Mad} ¹	REML	Gaussiano	0,028	0,384	0,412	16,377	0,068	-0,008	0,247	-0,016	0,975
H _{Manhã}	REML	Gaussiano	0,004	0,124	0,128	11,566	0,029	0,004	0,159	0,010	0,979
H _{Tarde}	REML	Esférico	0,103	1,347	1,451	40,083	0,071	-0,011	0,629	-0,009	1,033
H _{Noite}	REML	Esférico	0,090	0,184	0,273	52,405	0,328	0,001	0,363	0,002	1,011
Verão											
V _m	REML	Esférico	0,031	0,059	0,091	23,362	0,345	-0,006	0,239	-0,013	1,015
V _c	REML	Esférico	0,000	0,033	0,033	15,637	0,000	-0,003	0,111	-0,014	0,954
Inverno											
V _m	REML	Gaussiano	0,018	0,024	0,042	22,498	0,432	-0,003	0,154	-0,011	1,009
V _c	REML	Exponencial	0,000	0,023	0,023	16,118	0,000	0,000	0,119	-0,001	0,968

¹Mad: Madrugada; C₀ – efeito pepita; C₁ – contribuição; C₀ + C₁ – patamar; a – alcance; e GDE – grau de dependência espacial; EM - erro médio; DPm - Desvio padrão do erro médio; ER - Erro reduzido; DPR - Desvio padrão do erro reduzido. REML - Método de Máxima Verossimilhança Restrita.

A partir dos ajustes do semivariograma para os índices ITU em estudo, os valores dessas variáveis foram estimados usando krigagem ordinária. Portanto, foi possível construir mapas de distribuição espacial para o ITU durante cada período de estudo, conforme apresentado na Figura 3.7. As condições de estresse térmico foram calculadas usando os efeitos combinados da t_{bs} e UR.

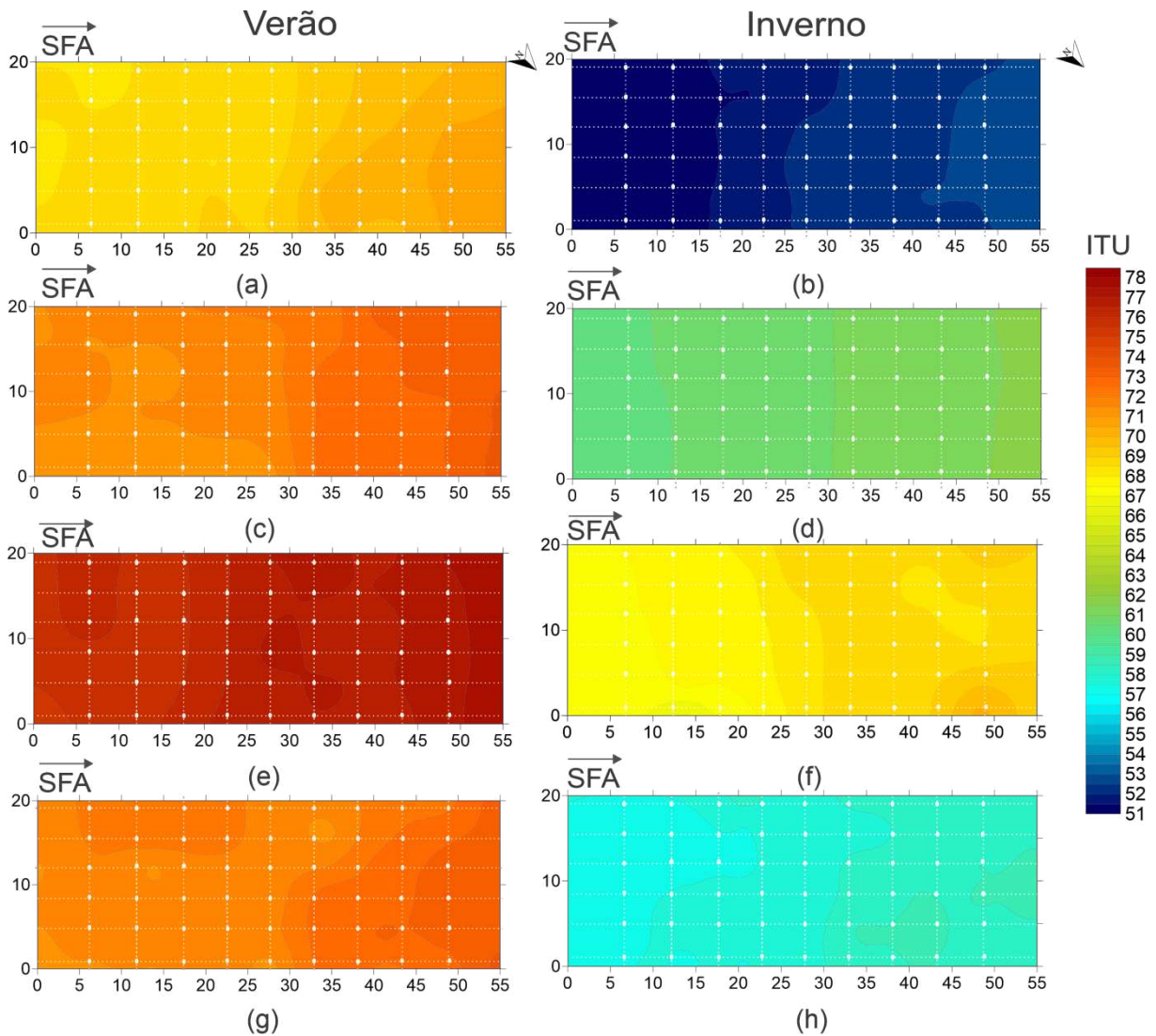


Figura 3.7 - Distribuição espacial do Índice de Temperatura e Umidade (ITU), durante o período da madrugada (00h00-05h00), no verão (a) e inverno (b); manhã (06h00-11h00), no verão (c) e inverno (d); tarde (12h00-17h00), no verão (e) e inverno (f); e noite (18h00-23h00), no verão (g) e inverno (h), no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período experimental de verão e inverno. SFA – Sentido do fluxo de ar.

Foi possível observar através dos mapas de krigagem da Figura 3.7 que, para o verão e inverno, a distribuição espacial do ITU foi semelhante à da temperatura do ar para os períodos analisados, com menores valores de ITU próximos à placa de resfriamento evaporativo.

Conforme esperado, comparativamente ao inverno, os maiores valores de ITU foram encontrados durante o verão, em decorrência dos elevados valores de t_{bs} e UR verificados durante esta estação.

Também se verificou uma tendência semelhante no interior da instalação CBF em relação aos períodos analisados, indicando que a partir da região central da instalação CBF e seguindo em direção aos exaustores (face noroeste), houve aumento acentuado de ITU.

Os limiares de ITU que caracterizam uma situação de conforto ou desconforto divergem entre autores. De forma geral, os limites propostos são: $ITU \leq 74$ condição de conforto térmico; $74 < ITU < 79$ - condição de alerta para os produtores; $79 \leq ITU < 84$ - condição de perigo, medidas de segurança devem ser tomadas para evitar perdas na produção e até mortalidade; e $ITU \geq 84$ - situação de emergência (Thom, 1959; Rosemberg et al., 1983).

A partir dos dados de ITU averiguados no verão (Figura 3.7a, c, e, g), observou-se que, mesmo com a presença de ventilação artificial, os valores de ITU se mantiveram acima dos limites ($ITU \geq 74$) caracterizados como de conforto para os animais, exceto durante o período da madrugada. Porém, não houve condições de estresse térmico intenso ($ITU > 84$) durante os períodos analisados. O maior valor determinado para o ITU, de 78, foi verificado no período da tarde, ou seja, considerado condição de alerta para os produtores, fato que ocorreu devido à combinação de altos valores de t_{bs} e UR constatados para esta região.

Durante o verão, os valores de ITU sofreram aumento acentuado ao longo dos últimos 25 m da instalação CBF, mais próximos dos exaustores, atingindo o valor de 74, durante a manhã e noite (Figura 3.7c, g). Estes resultados indicam que, durante a manhã e noite, os animais do Lote 2 estavam em condição de estresse por calor. Durante a tarde de verão os valores de ITU apresentaram aumento acentuado ao longo dos últimos 35 m mais próximos dos exaustores, atingindo o valor de 78 (Figura 3.7e), próximo aos mesmos (face noroeste). Neste período, os animais que estavam no Lote 1 e Lote 2 apresentaram-se em condição de estresse por calor. Este perfil de comportamento de ITU indica pontos críticos onde a distribuição dessa variável representou certo grau de desconforto para os animais. Cabe ressaltar que, mesmo o comportamento do ITU, durante o verão, nos quatro períodos do dia, ter sido similares à t_{bs} , o período de desconforto ao longo da instalação CBF foi ampliado em relação à t_{bs} .

Conforme esperado para a região climática em estudo, durante a estação de inverno os valores de ITU apresentaram-se dentro da zona de conforto para vacas leiteiras (Figura 3.7b, d, f, h). Nesta estação, o valor mais alto de ITU (71) foi registrado próximo aos exaustores

(face noroeste), durante o período da tarde (Figura 3.7f), contudo valores estes que não são considerados como de uma situação de desconforto para vacas leiteiras em fase de produção.

No verão, o período do dia no qual se observou maior uniformidade de ITU no interior da instalação CBF foi durante a noite (Figura 3.7g), com amplitude de 2. Os demais períodos apresentaram amplitudes similares, sendo de 3 (Figura 3.7a, c, g). Durante o inverno, os períodos que estiveram mais homogêneos apresentaram amplitude de 1,5 e foram encontrados durante a madrugada, manhã e noite (Figura 3.7b, d, h), quando o SRAE não estava em funcionamento.

Com base nos argumentos acima, verifica-se que a falta de isolamento dos fechamentos laterais (cortinas) e da cobertura, a inadequação na alocação do sensor de acionamento do SRAE, falhas na vedação da instalação, sistema de ventilação insuficiente, são possíveis fatores que não garantiram a inércia térmica da instalação CBF, afetando negativamente a uniformidade térmica do alojamento.

Lobeck et al. (2012), avaliando instalações *Free Stall* fechadas com sistema ventilação cruzada (Low-Profile Cross-Ventilated - LPCV), *Free Stall* naturalmente ventilado e instalação CB convencional com ventilação mecânica, em Minnesota, EUA, observaram que todos os sistemas apresentaram, durante os períodos mais críticos, valores de ITU superiores a 72, o que indicou que as vacas estavam passando por algum estresse térmico.

Smith et al. (2006) compararam uma instalação *Free Stall* com ventilação em túnel, associada ao resfriamento evaporativo, com uma instalação *Free Stall* convencional com ventiladores, também associada ao resfriamento evaporativo, localizada no Norte de Mississippi. O objetivo do estudo foi avaliar a eficiência do sistema de resfriamento evaporativo em aliviar o estresse por calor em vacas leiteiras em lactação. Os autores observaram que as vacas resfriadas com ventilação em túnel reduziram as taxas de respiração em $13,1 \pm 0,78$ respirações min^{-1} e as temperaturas retais em $0,4 \pm 0,03$ °C, em comparação com a instalação com ventiladores. Dessa forma, o resfriamento por ventilação em túnel reduziu drasticamente a exposição ao estresse por calor e melhorou o conforto das vacas leiteiras em lactação quando comparado com as tecnologias tradicionais de resfriamento nas condições presentes.

Smith et al. (2016) avaliaram o efeito do resfriamento evaporativo na temperatura corporal e no comportamento de vacas Holandesas em lactação, alojadas em uma instalação LPCV em ambiente úmido, em Minnesota, EUA. Os resultados do estudo mostraram que, mesmo sob leve estresse térmico, o resfriamento evaporativo reduziu a temperatura corporal e tendeu a aumentar o tempo que os animais permaneciam deitados. Os autores enfatizaram a

importância da redução de carga de calor nas instalações de vacas leiteiras, de maneira a melhorar o conforto dos animais e aumentar a sua produtividade.

Pires et al. (2002) observaram que, durante o verão, vacas em lactação da raça holandesa mantidas em sistema de confinamento, quando submetidas a temperatura e umidade relativa do ar elevadas, reduziram a taxa de concepção em consequência das alterações fisiológicas comumente observadas durante o processo de estresse calórico. Os autores observaram que a taxa de gestação foi 45,7 % no verão, em relação a 71,2 % no inverno.

Na Figura 3.8, está ilustrada a tendência estimada do comportamento da variável entalpia específica do ar (H), no período da madrugada, manhã, tarde e noite, obtidos no interior da instalação CBF, durante o período experimental de verão e inverno.

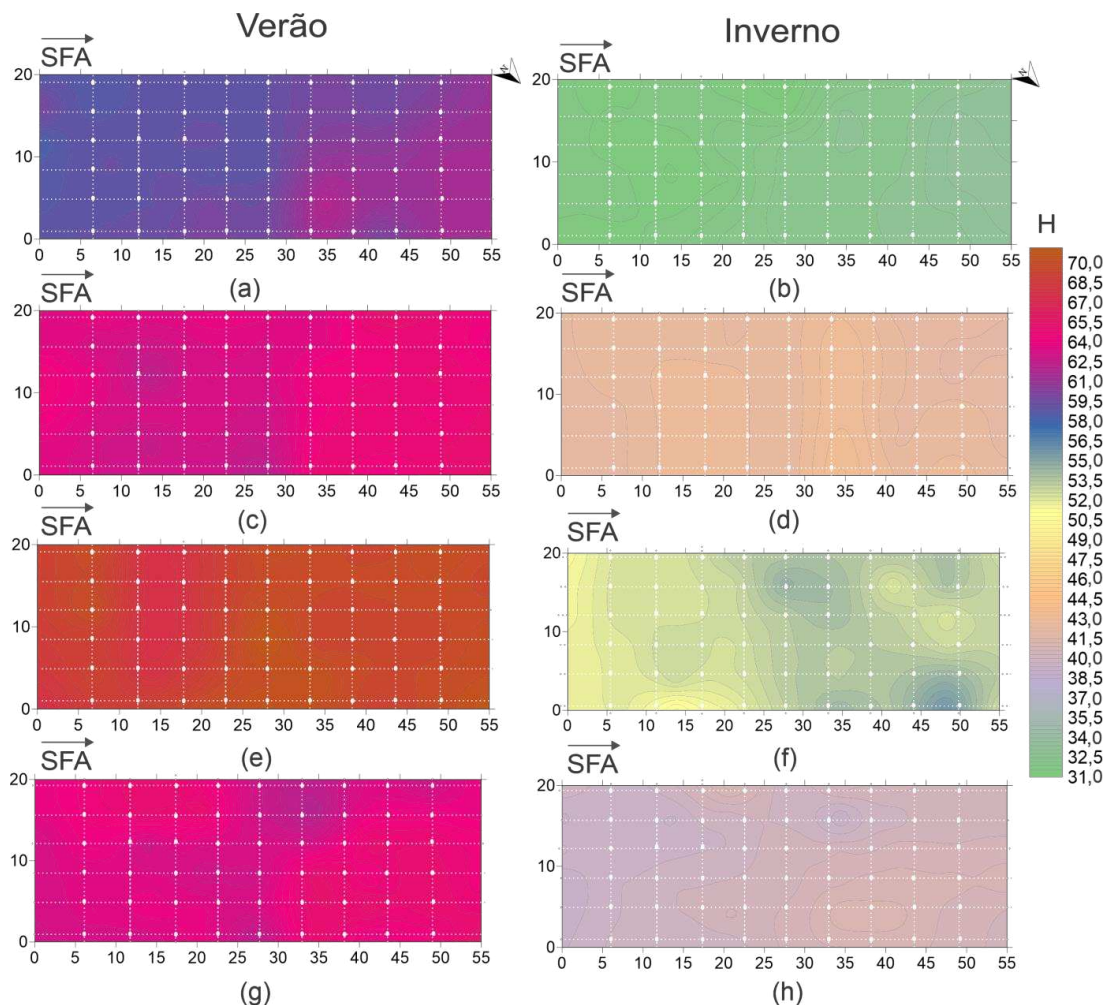


Figura 3.8 - Distribuição espacial da Entalpia (H , $\text{kJ kg de ar seco}^{-1}$), durante o período da madrugada (00h00-05h00), no verão (a) e inverno (b); manhã (06h00-11h00), no verão (c) e inverno (d); tarde (12h00-17h00), no verão (e) e inverno (f); e noite (18h00-23h00), no verão (g) e inverno (h), no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período experimental de verão e inverno. SFA – Sentido do fluxo de ar.

A partir dos mapas de krigagem para a entalpia específica do ar (H) durante diferentes períodos do dia, no verão e inverno, pode-se observar que, conforme esperado, comparativamente ao inverno os maiores valores de H foram encontrados durante o verão. Verificou-se a existência de gradiente ao longo da instalação, sendo que a tendência de menores valores para todos os períodos avaliados ocorre próximo às placas de resfriamento evaporativo (face sudeste).

De acordo com os resultados obtidos, os valores médios da quantidade de energia presente na parcela de ar, apontam valores de H acima do limite de conforto de 65,8 kJ kg de ar seco⁻¹, obtido a partir da t_{bs} de 26 °C e UR de 70%. Observou-se aumento acentuado da H pela tarde, seguido de decréscimo no período da noite. No verão, durante o período da tarde, o sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel não foi eficiente a ponto de promover mudanças suficientes na carga de calor no interior da instalação CBF (Figura 3.8 e).

Durante a tarde de verão a H apresentou aumento acentuado ao longo dos últimos 35 m, atingindo o valor de 70, próximo aos exaustores (face noroeste). Neste período, os animais alojados no Lote 1 e Lote 2 apresentaram-se em condição de estresse por calor. Este perfil de H indica pontos críticos, sendo que a distribuição dessa variável indicou certo grau de desconforto para os animais.

As médias de H observadas neste estudo para o turno da tarde estão próximas das obtidas por Garcia (2017), que obteve valores médios da ordem de 70,5 kJ kg de ar seco⁻¹ no verão em uma instalação *Free Stall* do tipo LPCV localizado em região com clima quente e úmido.

Diante disto, deve-se atentar para as condições do ambiente térmico no interior da instalação nas situações mais críticas, ou seja, quando estão fora da faixa ideal recomendada, a fim de evitar que o desempenho e a produtividade dos bovinos de leite sejam comprometidos. Na estação inverno, a instalação CBF se mostrou adequada para o confinamento de vacas leiteiras, com média máxima de 57 kJ kg de ar seco⁻¹ obtida no turno da tarde, na face noroeste, próximo aos exaustores (Figura 3.8f).

No verão, os períodos do dia nos quais se verificou maior uniformidade nos valores de H no interior da instalação CBF foram durante a manhã e tarde (Figura 3.8 c, e), com amplitude de 3,5 kJ kg de ar seco⁻¹. Nos demais períodos do dia, as amplitudes encontradas foram próximas, com valores de 5 e 4 kJ kg de ar seco⁻¹, durante a madrugada e noite, respectivamente (Figura 3.8 a, g). Durante o inverno, a maior variabilidade foi verificada no período da tarde, com amplitude de 7 kJ kg de ar seco⁻¹ (Figura 3.8 e), sendo que os resultados dos demais períodos quanto aos valores de H, demonstraram que estes estiveram

mais homogêneos apresentando amplitudes de 3, 2 e 2 kJ kg de ar seco⁻¹ durante a madrugada, manhã e noite, respectivamente (Figura 3.8 b, d, h).

Na Figura 3.9 encontra-se apresentada a distribuição espacial das variáveis velocidade média do ar (V_m , m s⁻¹) e velocidade do ar no nível da cama (V_c , m s⁻¹), durante o verão e inverno no interior da instalação CBF.

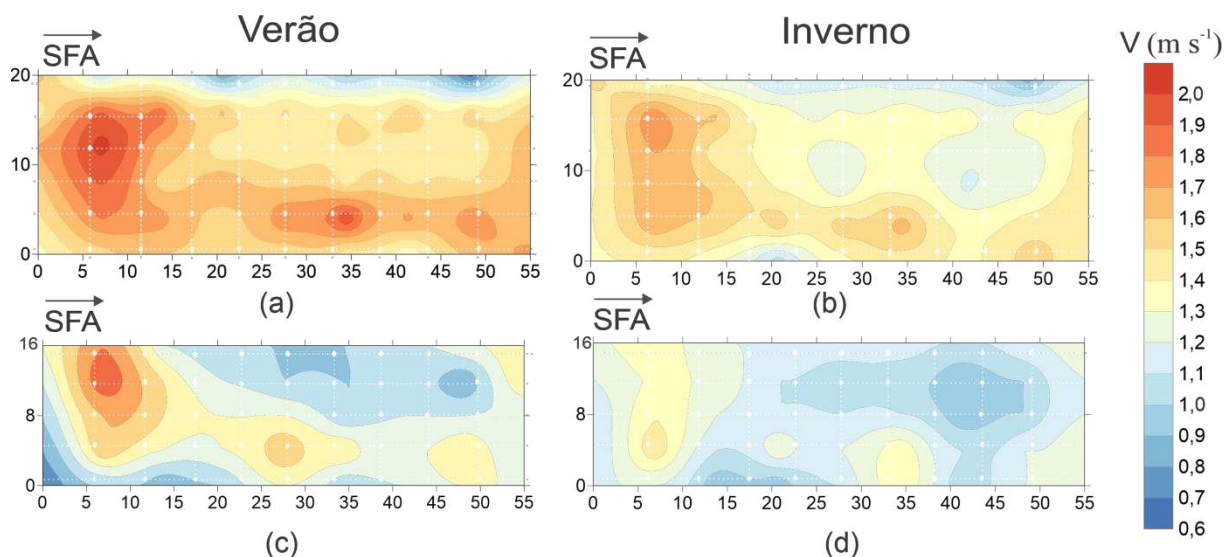


Figura 3.9 - Distribuição espacial das variáveis: a) velocidade média do ar durante o verão (V_m); b) velocidade média do ar durante o inverno (V_m); c) velocidade do ar no nível da cama durante o verão (V_c); d) velocidade do ar no nível da cama durante o inverno (V_c), no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF). SFA – Sentido do fluxo de ar.

Observa-se que a V_m (Figuras 3.9 a, b), apresentou elevada amplitude entre as velocidades mínimas e máximas, com valores variando de 0,6 a 2,0 m s⁻¹ no verão e 0,8 a 1,6 m s⁻¹ no inverno. Notam-se regiões distintas ao longo do comprimento da instalação CBF. Os resultados indicaram que as regiões com os maiores valores de V_m estavam na face sudeste, próximas aos painéis evaporativos, com valores variando de 1,6 m s⁻¹ e 2,0 m s⁻¹, no inverno e verão, respectivamente. Na parte central da instalação CBF houve uma maior predominância de V_m , em torno de 1,2 m s⁻¹ e 1,4 m s⁻¹, no inverno e verão, respectivamente; novamente uma região com maiores valores, na face noroeste, próximos aos exautores. Foram encontrados, na região do corredor de alimentação, valores de V_m menores que 1,0 m s⁻¹.

Os resultados deste estudo foram inferiores aos obtidos por Damasceno et al. (2019), que observaram valores de V_m que atingiram 3,0 m s⁻¹ em instalação CBF em modo túnel, indicando possivelmente falhas no dimensionamento do sistema de ventilação do presente estudo.

A V_c (Figuras 3.9 c, d) apresentou valores que variaram de 1,1 a 1,9 $m s^{-1}$ no verão e de 0,9 a 1,5 $m s^{-1}$ no inverno, apresentando menores valores quando comparados aos valores obtidos de V_m .

Contudo, observa-se pelos mapas de krigagem que a V_m e V_c apresentaram valores superiores durante o verão (Figura 3.9 a, c), quando comparado ao inverno (Figura 3.9 b, d). A V_m durante o verão apresentou maior amplitude quando comparada ao inverno, sendo de 1,4 e 0,8 $m s^{-1}$; no verão e inverno, respectivamente. A variação dos valores de velocidade do ar nas duas alturas pode estar associada ao aumento da perda de carga em decorrência dos animais, das características do painel evaporativo e dos defletores presentes na instalação.

Próximo às cortinas laterais (Figuras 3.9a, b, c, d), houve uma acentuada variação de V_m e V_c , sendo que isso possivelmente ocorreu devido à infiltração de ar pelas cortinas, através de falhas da vedação.

Com todos os exaustores em operação, a velocidade do ar na instalação CBF de ventilação em modo túnel foi abaixo do ideal (valores inferiores a 2 $m s^{-1}$), para as duas alturas e períodos analisados. A velocidade do ar entre 2,5 a 3,5 $m s^{-1}$ é considerada ideal para vacas holandesas em confinamento (Damasceno, 2020). De acordo com o mesmo autor em instalações CBF com ventilação em modo túnel, a capacidade do exaustor deve ser dimensionada para fornecer uma ventilação mínima de 2,0 a 4,0 $m s^{-1}$, durante todo o período. Com esses resultados de velocidade do ar, pôde-se observar a não efetividade do sistema em manter os níveis adequados de ITU e H, principalmente, durante o período mais crítico de verão.

A ventilação adequada nesse tipo de sistema é importante para auxiliar no resfriamento dos animais, reduzir o excesso de umidade proveniente do ar, remover o calor e a umidade que a cama biologicamente ativa gera e estender o tempo entre a adição de mais material de cama (Janni et al., 2007).

Com base no exposto, infere-se que a melhoria do isolamento da instalação, qualidade e dimensionamento adequado do sistema de ventilação, entre outros, são fatores decisivos na melhor prática desta atividade.

3.3.3 Níveis de ruído

Na Figura 3.10 encontram-se apresentados os valores médios dos níveis de ruído (dBA) para diferentes condições, com os exaustores ligados (EL) e exaustores desligados (ED), no interior da instalação CBF, durante o período experimental de inverno.

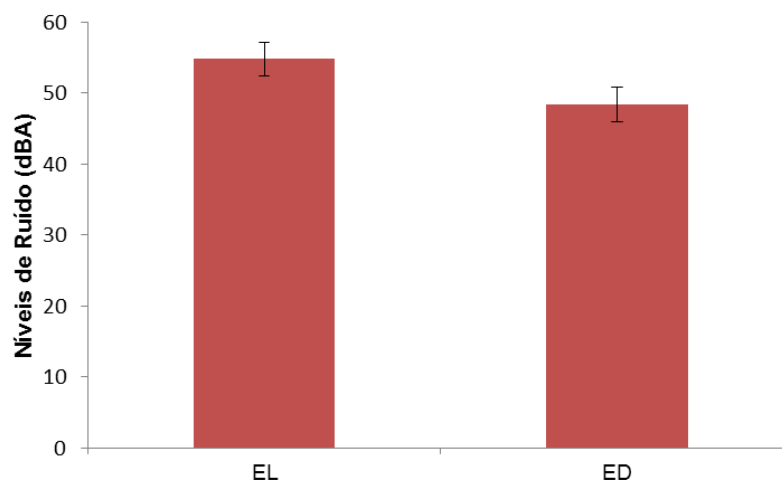


Figura 3.10 - Valores médios e desvio padrão dos níveis de ruído (dBA) para diferentes condições, com os exaustores ligados (EL) e exaustores desligados (ED), no interior da instalação CBF, durante o período experimental de inverno.

Os níveis médios de ruído foram de $54,7 \pm 2,41$ dB para a condição EL e de $48,3 \pm 1,2$ dB para a condição ED. Phillips (2010) classifica a faixa de desconforto auditivo em vacas entre 90 e 100 dB, com o dano físico ocorrendo próximo a 110 dB. Observa-se que os valores médios de nível de ruído encontrados não ultrapassaram as faixas de desconforto sonoro, indicando uma condição sonora adequada para os animais.

Os resultados observados são similares aos apresentados por Damasceno et al. (2019), que registraram valores de níveis de ruído de 45 a 70 dB no interior de uma instalação CBF. Em outro estudo, Smith e Harner (2007) avaliaram uma instalação *Free Stall* Fechada com sistema ventilação cruzada (LPCV) e encontraram níveis médios de ruído abaixo de 65 dB, independentemente do número de ventiladores em operação.

3.4 CONCLUSÕES

De acordo com o experimento e a metodologia empregada, pode-se concluir que:

A análise geoestatística apresentou-se como ferramenta eficiente para a avaliação da distribuição das variáveis do microclima.

Foi verificada variabilidade espacial para todos os atributos (temperatura de bulbo seco, umidade relativa, Índice de Temperatura e Umidade, Entalpia e velocidade do ar) e predominância de forte e moderada dependência espacial. A maior variabilidade espacial dos atributos analisados foi observada no período da tarde.

Os mapas de krigagem mostraram que as condições críticas de habitação do ambiente térmico foram encontradas, principalmente, a partir da parte central da instalação CBF, em direção à face noroeste, próximo aos exaustores.

Foram observados elevados valores de umidade relativa do ar, com predominância de valores superiores a 75 %, próximo às placas evaporativas, durante as estações de verão e inverno.

O índice de temperatura e umidade e entalpia específica do ar estiveram acima dos limiares de conforto térmico durante o verão, principalmente, no período da tarde.

A distribuição da velocidade do ar ao longo de toda a área interior da instalação CBF ficou abaixo do recomendado pela literatura, tendo permanecido sempre inferior a 2 m s^{-1} , indicando possibilidade de se promover maior intensificação do sistema de ventilação na obtenção de maior conforto térmico animal em condições de calor.

Observou-se que o SRAE auxiliou na melhoria das condições térmicas internas da instalação, contudo, provavelmente em razão da falta de isolamento térmico dos fechamentos laterais e da cobertura, não possibilitou uniformidade térmica espacial e nem temporal para as duas estações avaliadas e, também, não foi eficiente em mantê-las dentro da zona de conforto de bovinos em lactação, durante o período crítico de verão. Durante o inverno, permaneceu dentro dos limites recomendados pela literatura.

A técnica da geoestatística foi capaz de auxiliar na tomada de decisão quanto ao acondicionamento térmico ambiente. Portanto, da forma como foi concebido e operado, este não foi eficiente em manter as variáveis microclimáticas da instalação CBF estudada dentro das faixas da zona de conforto de bovinos, principalmente, durante o período mais crítico de verão.

Os níveis médios de ruído não excederam as faixas de desconforto sonoro para os animais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, P. G. D.; Costa, O. A. D.; Feddern, V.; Morés, N.; Coldebella, A.; Ramos, C. Geostatistics applied to swine facilities equipped with evaporative cooling system. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 11, p. 1014-1019, 2016.
- Armstrong, D. Heat stress interaction with shade and cooling. **Journal of dairy science**, v. 77, n. 7, p. 2044-2050, 1994.

- Baêta, F. C.; Souza, C.F. **Ambiência em edificações rurais: conforto ambiental**. 2. ed. Viçosa, Brasil: Editora UFV, 2010. 269 p.
- Barberg, A. E.; Endres, M. I.; Janni, K. A. Compost dairy barns in Minnesota: A descriptive study. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 2, p. 231-238, 2007.
- Berman, A.; Folman, Y.; Kaim, M.; Mamen, M.; Herz, Z.; Wolfenson, D.; Arieli, A.; Graber, Y. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a subtropical climate. **Journal of Dairy Science**, v. 68, n. 6, p. 1488-1495, 1985.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- Carvalho, T. M. R.; Moura, D. J.; Souza, Z. M.; Souza, G. S.; Bueno, L. G. F.; Lima, K. A. O. Use of geostatistics on broiler production for evaluation of different minimum ventilation systems during brooding phase. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 1, p. 194-202, 2012.
- Coelho, D. J. R. **Ambiente térmico e aéreo de aviários sólidos de frangos de corte acondicionados artificialmente para condições climáticas do Brasil e Portugal**. 2018. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- Curi, T. M. R. C.; Conti, D.; Vercellino, R. A.; Massari, J. M.; Moura, D. J.; Souza, Z.M. D.; Montanari, R.. Positioning of sensors for control of ventilation systems in broiler houses: a case study. **Scientia Agricola**, v. 74, n. 2, p. 101-109, 2017.
- Damasceno, F.A. 2020. **Compost Barn como alternativa para a pecuária leiteira**. 1. ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396 p.
- Damasceno, F. A.; Oliveira, C. E. A.; Ferraz, G. A. S.; Nascimento, J. A. C.; Barbari, M.; Ferraz, P. F. P. Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, v. 17, n. 2, p. 385-395, 2019.
- Dikmen, S., Larson, C.C., De Vries, A., Hansen, P.J. Effectiveness of tunnel ventilation as dairy cow housing in hot climates: rectal temperatures during heat stress and seasonal variation in milk yield. **Tropical animal health and production**, v. 52, p. 2687-2693, 2020.
- Faria, F. F.; Moura, D. J.; Souza, Z. M. D., Matarazzo, S.V. Variabilidade espacial do microclima de um galpão utilizado para confinamento de bovinos de leite. **Ciência Rural**, v. 38, n. 9, p. 2498-2505, 2008.

- Ferraz, P.F., Yanagi Junior, T., Schiassi, L., Ferraz, G.A.S., Campos, A.T. Spatial variability of enthalpy in broiler house during the heating phase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 570-575, 2016.
- Freitas, L. C., Tinôco, I. D. F.; Gates, R. S.; Barbari, M.; Cândido, M.G.; Toledo, J. V. Development and validation of a data logger for thermal characterization in laying hen facilities. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 10, p. 787-793, 2019.
- Fournel, S.; Ouellet, V.; Charbonneau, É. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: a literature review. **Animals**, v. 7, n. 5, p. 37, 2017.
- Garcia, P. R. **Galpão freestall com sistema de resfriamento evaporativo e ventilação cruzada: desempenho térmico, zootécnico e o nível de bem-estar animal**. 2017. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017
- Harner, J. P.; Smith, J. F. Low-profile cross-ventilated freestall facilities—A 2 year summary. In: **Proceeding of the 2008 High Plains Dairy Conference. Albuquerque: High Plains Dairy Conference**. 2008. p. 65-78.
- Harner, J. P.; Smith, J. F.; Smith, F.; Marti, M. D. H.; Sheffield, R. E.; Zulovich, J. M., ... Brouk, M. J. In: **Sixth International Dairy Housing Conference Proceeding, 16-18 June 2007,(Minneapolis, Minnesota)(Electronic Only)**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. p. 30.
- Jacobson, L. D.; Hetchler, B. P.; Janni, K. A.; Linn, J.; Heber, A., Cortus, E. Animal and environmental performance of a retrofitted mechanical cross-ventilation system to a naturally ventilated freestall dairy barn in the midwestern US. In: **Livestock Environment VIII, 31 August–4 September 2008, Iguassu Falls, Brazil**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. p. 58.
- Janni, K. A.; Endres, M. I., Reneau, J. K.; Schoper, W. W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied engineering in agriculture**, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.
- Johnson, H. D. Environmental management of cattle to minimize the stress of climatic change. **International Journal of Biometeorology**, v. 24, p. 65-78, 1980.
- Kadzere, C. T.; Murphy, M. R.; Silanikove, N.; Maltz, E. Heat stress in lactating dairy cows: a review. **Livestock production science**, v. 77, n. 1, p. 59-91, 2002.

- Leso, L.; Barbari, M.; Lopes, M. A.; Damasceno, F.A.; Galama, P.; Taraba, J.L.; Kuipers, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 2, p. 1072-1099, 2020.
- Little, T.M, Hills, F. J. 1978. Agricultural experimentation: design and analysis. J. Wiley. New York.
- Lobeck, K. M.; Endres, M. I.; Janni, K. A.; Godden, S. M.; Fetrow, J. Environmental characteristics and bacterial counts in bedding and milk bulk tank of low profile cross-ventilated, naturally ventilated, and compost bedded pack dairy barns. **Applied engineering in agriculture**, v. 28, n. 1, p. 117-128, 2012.
- Lopes, I.; Silva, M.V.; Melo, J. M.; Montenegro, A. A. A.; Pandorfi, H. Geostatistics applied to the environmental mapping of aviaries. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 409-414, 2020.
- Mader, Terry L.; Davis, M. S.; Brown-Brandl, Tami. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 84, n. 3, p. 712-719, 2006.
- Marchant, B.P., Lark, R.M. Robust estimation of the variogram by residual maximum likelihood. **Geoderma**, v. 140, n. 1-2, p. 62-72, 2007.
- Matheron, G. **Treaty of applied geostatistics**. Vol. I: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, n. 14, Editions Technip, Paris, 1962. 333 p.
- Miragliotta, M.Y.; Nääs, I. D. A.; Manzione, R. L.; Nascimento, F. F. Spatial analysis of stress conditions inside broiler house under tunnel ventilation. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 426-432, 2006.
- Nääs, I. A. **Principles of thermal comfort in animal production**. São Paulo: Ícone, Brasil, 1989. 183 p.
- Nääs, I. D. A.; Arcaro Júnior, I. Influência de ventilação e aspersão em sistemas de sombreamento artificial para vacas em lactação em condições de calor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 139-142, 2001.
- Ouellet, V.; Cabrera, V. E.; Fadul-Pacheco, L.; Charbonneau, É. The relationship between the number of consecutive days with heat stress and milk production of Holstein dairy cows raised in a humid continental climate. **Journal of dairy science**, v. 102, n. 9, p. 8537-8545, 2019.
- Perissinotto, M.; Moura, D. J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados/evaluation of thermal comfort in dairy cattle using data mining. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 1, n. 2, p. 117-126, 2007.

- Phillips, C.J.C. **Principles of Cattle Production Systems**. 2. ed. CABI, Wallingford, UK, 2010. 256 p.
- Pires, M.F.A.; Ferreira, A. M.; Saturnino, H. M.; Teodoro, R. L. Taxa de gestação em fêmeas da raça Holandesa confinadas em free stall, no verão e inverno. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 54, n. 1, p. 57-63, 2002.
- Polsky, L.; von Keyserlingk, M. A. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 11, p. 8645-8657, 2017.
- R: a language and environment for statistical computing. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 16 abril 2020.
- Radavelli, W. M.; Danieli, B.; Zotti, M. L. A. N.; Gomes, F. J.; Endres, M. I.; Schogor, A.L.B. Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 1): facility, barn management and herd characteristics. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p.e445985198-e445985198, 2020.
- Renaudeau, D.; Collin, A.; Yahav, S.; De Basilio, V.; Gourdine, J. L.; Collier, R. J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. **Animal**, v. 6, n. 5, p. 707-728, 2012.
- Ribeiro Junior P. J.; Diggle P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, p. 14-18, 2001.
- Rodrigues, V.C.; da Silva, I. J. O.; Vieira, F. M. C.; Nascimento, S.T. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v. 55, n. 3, p. 455-459, 2011.
- Roenfeldt, S. You can't afford to ignore heat stress. **Dairy Herd Management**, v. 35, p. 6-12, 1998.
- Rosenberg, N. J.; Blad, B. L.; Verma, S. B. **Microclimate: the biological environment**. John Wiley & Sons, 1983. 495 p.
- Shane, E. M.; Endres, M. I.; Janni, K.A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied engineering in agriculture**, v. 26, n. 3, p. 465-473, 2010.
- Silva, M. V.; Pandorfi, H.; Almeida, G.L.P.; Jardim, A. M. R. F.; Batista, P. H. D., Silva, R. A. B.; Lopes, I.; Oliveira, M. E. G.; Silva, J. L. B.; Moraes, A. S. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v. 94, p. 102782, 2020.

- Silva, N. R. S.; Martins, S. V.; Meira Neto, J. A. A.; Souza, A. L. D. Composição florística e estrutura de uma floresta estacional semidecidual montana em Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p. 397-405, 2004.
- Smith, J. F.; Bradford, B. J.; Harner, J. P.; Potts, J. C.; Allen, J. D.; Overton, M.W., Ortiz, X. A.; Collier, R. J. Effect of cross ventilation with or without evaporative pads on core body temperature and resting time of lactating cows. **Journal of dairy science**, v. 99, n. 2, p. 1495-1500, 2016.
- Smith, T. R.; Chapa, A.; Willard, S.; Herndon Jr, C.; Williams, R. J.; Crouch, J.; Riley, T.; Pogue, D. Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the southeast. II: Impact on lactation performance. **Journal of dairy science**, v. 89, n. 10, p. 3915-3923, 2006.
- Teles Júnior, C. G. S. **Consumo energético e ambiência de galpões avícolas fechados e potencial de implementação de sistema híbrido de acondicionamento térmico**. 2019. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.
- Thom, E. C. The discomfort index. **Weatherwise**, v. 12, n. 2, p. 57-61, 1959.
- Tinôco, I. F. F. **Efeito de diferentes sistemas de acondicionamento de ambiente e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, e condições de verão e outono**. 1996. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- Trangmar, B. B.; Yost, R. S.; Uehara, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in agronomy**, v. 38, p. 45-94, 1986.
- Vieira, S. R. 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53, 2000.
- Vieira, S. R.; Carvalho, J. R. P. D.; González, A. P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v. 69, p. 97-105, 2010.
- Ward, D. **Tunnel Ventilation in Livestock Barns - With and Without Evaporative Cooling**. 2013. Disponível em: <<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/13-073.htm>>. Acesso em: 8 março 2020.
- Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. **Application of soil physics**, p. 319-344, 1980.
- Yousef, M. K. **Stress physiology in livestock**. Volume I. Basic principles. CRC press, 1985.

CAPÍTULO III

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DA CAMA, INDICADORES DE BEM-
ESTAR ANIMAL E PRODUÇÃO DE LEITE EM INSTALAÇÃO *COMPOST*
BARN FECHADA COM SISTEMA DE VENTILAÇÃO NEGATIVA EM MODO
TÚNEL**

Distribuição espacial de variáveis da cama, indicadores de bem-estar animal e produção de leite em instalação *Compost Barn* fechada com sistema de ventilação negativa em modo túnel

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi caracterizar, avaliar e comparar a distribuição espacial das principais variáveis da cama, indicadores de bem-estar animal e produção de leite em instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) com sistema de ventilação negativa em modo túnel, durante o verão e inverno. O estudo foi realizado em instalação CBF, localizada na região da Zona da Mata, MG, Brasil. Foi utilizada a técnica da modelagem geostatística, por meio de análise de semivariograma e mapas de krigagem para avaliar o comportamento das variáveis temperatura, teor de umidade e pH (aferidos na superfície e profundidade de 0,20 m da cama) em toda a extensão da cama. Além disso, amostras de cama foram caracterizadas para Carbono Total (C), Nitrogênio Total (N), Potássio (K) e relação C:N. As vacas alojadas na instalação CBF foram avaliadas quanto às pontuações de escore de locomoção e de sujidade, e produção média de leite (kg leite dia⁻¹). Para análise dos indicadores de bem-estar animal foi utilizado o teste não-paramétrico de Wilcoxon. Todas as variáveis mencionadas foram aferidas, para as estações de verão e inverno. Pela análise geostatística, verificou-se dependência espacial e a não uniformidade da distribuição espacial das variáveis da cama. Os valores de temperatura superficial da cama foram mais altos no verão, e indicaram certo desconforto térmico para os animais. Contudo, durante o inverno, permaneceu dentro da faixa de conforto esperado. Os piores níveis de temperatura e teor de umidade da cama foram encontrados nas regiões próximas à placa de resfriamento evaporativo, na área circunvizinha ao corredor de alimentação e na região com maior densidade animal. A razão C:N, obtida em ambas as estações climáticas do ano, manteve-se fora da faixa recomendada para a compostagem ideal. Durante o verão e inverno, os valores das variáveis da cama sugeriram que o material estava abaixo dos níveis para a compostagem ideal; no entanto, a camada interna aerada apresentou-se biologicamente ativa. A elevada densidade animal repercutiu expressivamente na piora do teor de umidade e temperatura interna na cama. Em geral, as vacas leiteiras mostraram adequada pontuação para o escore de sujidade (escore 1 e 2) e locomoção (escore 0 e 1), para as duas estações climáticas avaliadas, indicando boas condições de bem-estar. Entre as estações houve diferença significativa ($P < 0,5$) apenas para o escore de locomoção, com escore mais elevado durante o inverno. Durante o inverno, a

produção média de leite foi de $28,1 \pm 7,2$ kg leite dia⁻¹ e durante o verão foi de $26,9 \pm 6,7$ kg leite dia⁻¹.

Palavras-chave: bem-estar animal, compostagem, geoestatística, higiene do úbere, substrato, variabilidade espacial.

Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with tunnel mode negative-pressure ventilation system

ABSTRACT

This research aimed to characterize, evaluate and compare the spatial distribution of the leading bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn (CBP) with a negative ventilation system in tunnel, during summer and winter. The study was carried out in a CBP, located in the Zona da Mata region, MG, Brazil. The geostatistical modeling technique evaluated the variables temperature, moisture content, and pH (on the surface and depth of 0.20 m of the bed) across the length of the bed. Besides, bed samples were characterized for Total Carbon (C), Total Nitrogen (N), Potassium (K) and C:N. Cows housed in the CBP were assessed for locomotion and hygiene score and average milk production (kg milk day⁻¹). Wilcoxon's non-parametric test was used to analyze animal welfare indicators. All the mentioned variables were measured, for the summer and winter seasons. The geostatistical analysis showed spatial dependence and the non-uniformity of the spatial distribution of bed variables. The surface temperature values of the bed were higher in the summer, and indicated some thermal discomfort for the animals. However, during the winter, it remained within the expected comfort range. The worst levels of the bed's temperature and moisture were found in the regions close to the evaporative pad cooling system, surrounding the feeding alley, and in the region with the highest cow stocking. The C:N ratio, obtained in both climatic seasons of the year, remained outside the recommended range for ideal composting. During the summer and winter, the bed variables' values suggest that the material was below levels for optimal composting; however, the aerated inner layer was biologically active. The high animal density significantly impacted the worsening of the bed's moisture content and internal temperature. In general, dairy cows showed adequate hygiene (score 1 and 2) and locomotion (score 0 and 1) scores for the two climatic seasons evaluated, indicating good welfare conditions. There was a significant difference between the

seasons ($P < 0.5$) only for the locomotion score, with a higher score during the winter. During winter, the average milk production was 28.1 ± 7.2 kg milk day⁻¹, and during summer, it was 26.9 ± 6.7 kg milk day⁻¹.

Keywords: animal welfare, composting, geostatistics, udder hygiene, substrate, spatial variability.

4.1 INTRODUÇÃO

A pecuária leiteira tem passado por mudanças importantes nos últimos anos e, com isso, houve a necessidade de intensificar seus processos para o aumento da eficiência produtiva em consonância com as condições de bem-estar animal e de maneira mais sustentável. Os sistemas de alojamento e as práticas de manejo exercem forte influência no bem-estar dos bovinos de leite, assim como na qualidade do leite, tornando a escolha do ambiente de criação extremamente importante (Biasato et al., 2019). Essa preocupação é intensificada em países de clima tropical e subtropical, exemplo do Brasil, em que altas temperaturas por longos períodos do ano são comumente encontradas (Castro Júnior; Silva, 2020).

Tradicionalmente, no sistema intensivo de criação, as opções de alojamento para vacas leiteiras consistem, principalmente, no confinamento em *Loose Housing*, *Tie Stall* e *Free Stall* (Blanco-Penedo et al., 2020). Contudo, mais recentemente, o sistema de confinamento do tipo *Compost Barn* (CB) tem sido amplamente aderido por produtores de leite em diversas regiões do mundo (Bewley et al., 2017). Vários estudos indicam que a saúde e o bem-estar das vacas, têm se mostrado satisfatórios em instalações CB (Black et al., 2013; Burgstaller et al., 2016; Biasato et al., 2019). De acordo com Black et al. (2014), as instalações CB fornecem um ambiente confortável para as vacas, mas deve ser manejado com cuidado para garantir que a saúde do úbere não seja comprometida.

Normalmente, as instalações CB consistem em uma grande área de cama (área de descanso para os animais e armazenamento de dejetos), separada do corredor de alimentação por uma mureta (Janni et al., 2007; Black et al., 2013). Para aumentar a atividade microbiana aeróbica, o material de cama deve ser revolvido de duas a três vezes ao dia para produzir uma superfície seca e incorporar os dejetos dos animais na cama (Barbeg et al., 2007b; Janni et al., 2007; Shane et al., 2010; Leso et al., 2020).

A tipologia da construção adequadamente projetada, o sistema de ventilação utilizado, bem como a gestão adequada da cama, com adição frequente de material seco e de qualidade, associado ao revolvimento diário, auxiliam no processo de compostagem e permitem que os dejetos sejam armazenados de 6 a 12 meses (Black et al., 2013; Fernández et al., 2020; Leso et al., 2020). Notadamente, o ponto-chave para o sucesso deste sistema de confinamento consiste no manejo adequado da cama (Pilatti & Vieira, 2017).

Dessa forma, o conhecimento das características da cama, bem como a variabilidade espacial dos principais atributos são fatores importantes que influenciam no bem-estar e produtividade dos animais em confinamento. Adicionalmente, as medições baseadas em resultados como: escore de locomoção, escore de higiene e produção de leite, são potenciais indicadores para a avaliação do bem-estar de vacas leiteiras em diferentes ambientes de alojamento (Fregonesi & Leaver, 2001; Lobeck et al., 2011).

Portanto, considerando a necessidade de propor técnicas viáveis e eficientes de monitoramento das variáveis da cama em instalações CB, o uso e suporte de ferramentas matemáticas e técnicas computacionais, como a geoestatística, tem mostrado resultados satisfatórios e que torna a interpretação da distribuição espacial dessas variáveis mais precisa (Peixoto et al., 2019; Silva et al., 2020). Contudo, informações sobre a qualidade da cama e bem-estar de bovinos leiteiros neste tipo de sistema de confinamento ainda são escassas na literatura, principalmente quando utilizadas em regiões de clima tropical e subtropical, como é o caso do Brasil e, sobretudo, para instalações *Compost Barn* Fechada (CBF) com ventilação negativa em modo túnel.

De acordo com esse pressuposto, o objetivo deste estudo foi caracterizar, avaliar e comparar a distribuição espacial das principais variáveis da cama, indicadores de bem-estar animal e produção de leite, em instalação CBF com ventilação negativa em modo túnel, associado ao resfriamento evaporativo, para as condições de inverno e verão e para a situação do clima do Brasil, mais especificamente para a bacia leiteira da Zona da Mata, no Estado de Minas Gerais.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização e descrição da instalação *Compost Barn* fechada

Os dados para realização deste estudo foram coletados em instalação para o confinamento de bovinos de leite em fase de lactação, no sistema *Compost Barn* fechado

(CBF), provido de ventilação por pressão negativa em modo túnel, associado a sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE), com utilização de placas porosas.

O estudo foi realizado durante dois períodos, dezembro de 2018 (verão) e em julho de 2019 (inverno). A escolha por estudar esses períodos se deve ao fato de serem estas as estações climáticas mais críticas para a criação de bovinos de leite de origem europeia. Se, por um lado, o calor do verão tropical é gerador de grande estresse aos animais, ocorre que no inverno, o maior problema nas instalações CBF passa a ser o elevado teor de umidade da cama, o que pode inviabilizar o sistema.

A instalação CBF estudada está localizada na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil (670 m de altitude, coordenadas 20° 46' 41" S e 42° 48' 57" W). O clima da região é subtropical úmido, com verões chuvosos e invernos frios e secos - Cwa de acordo com a classificação de Köppen (Silva et al., 2004).

A instalação CBF foi construída em maio de 2017, possui orientação noroeste-sudeste, dimensões totais de 55,0 m de comprimento × 26,4 m de largura, telhado em duas águas, cobertura de telhas metálicas onduladas, altura do pé direito de 5,0 m e beirais de 0,8 m. A distribuição espacial interna da instalação CBF, conforme ilustrado na Figura 4.1, é composta por: a) pista de trato com piso de concreto com área de 220 m² (contendo cocho único de 55 m de comprimento), sendo a região por onde o trator circula para distribuição do alimento; b) corredor de alimentação com piso de concreto com área de 220 m² (separado da área de cama por uma mureta de concreto de 1,2 m de altura), com quatro bebedouros nesta região; c) área de cama com 880 m² (sobre solo compactado); d) corredor de serviço com piso de concreto e área de 132 m².

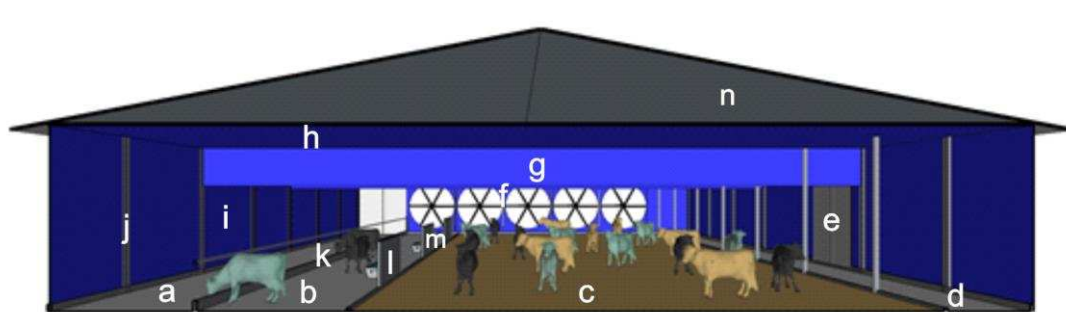


Figura 4.1 - Representação esquemática, em corte transversal ao comprimento da instalação experimental, com destaque para a pista de trato (a); corredor de alimentação (b); área de cama (c); corredor de serviço (d); portão de acesso à área de cama (e); exaustores (f); defletores (g); forro (h); fechamento lateral de cortinas (i); pilares (j); comedouro (k); mureta de 1,2 m de altura (l); bebedouro (m); telhado (n). Fonte: Os autores.

O forro da cobertura e o material utilizado para o fechamento lateral (sem isolamento) da instalação são constituídos de polipropileno, na cor azul. Cinco defletores foram instalados no sentido transversal da instalação (3 m acima da linha do piso, espaçados a cada 11 m, sendo que o primeiro defletor estava a 5,5 m de distância da placa evaporativa), de maneira a direcionar e aumentar o fluxo de ar para os animais. Os defletores estendiam-se sobre a área de cama e corredor de alimentação. A instalação era mantida totalmente fechada nas laterais por cortinas de polipropileno, as quais, por sua vez, eram munidas por sistema de abertura automática, o qual era acionado em caso de falta de energia, garantindo, assim, a renovação de ar. A iluminação da instalação CBF foi realizada por meio de dez lâmpadas de LED (100W).

No lado sudeste da instalação CBF, uma série de cinco placas porosas de celulose (dimensões totais de 18,0 × 3,5 m) foi utilizada na composição de um sistema de resfriamento adiabático evaporativo. Um sensor, posicionado no interior da instalação, monitorava as condições ambientais e foi programado para ser acionado quando a temperatura do ar fosse igual ou superior a 21 °C e umidade relativa abaixo de 75%, assim, as placas eram umedecidas por gotejamento, de maneira a possibilitar o resfriamento adiabático do ar externo que atravessava a mesma via sucção (pressão negativa), promovida pelos exaustores situados na extremidade oposta. O sistema de condicionamento ambiente, assim constituído, operava através de painel com comando automático para acionamento de exaustores e do molhamento das placas porosas do sistema de resfriamento evaporativo.

Na extremidade oposta (face noroeste) da instalação encontravam-se cinco grandes exaustores (3,5 m de diâmetro, seis hélices, volume de ar de 150.000 m³ h⁻¹ e potência de 1491,4 W). Os cinco exaustores permaneceram ligados continuamente (24 horas dia⁻¹).

A lavagem superficial do piso do corredor de alimentação era realizada pelo sistema conhecido *flushing* e acontecia diariamente, uma vez no período da manhã.

A instalação apresentava cama constituída de mistura de maravalha e casca de café, com espessura de aproximadamente 0,60 m. O revolvimento da cama era mecanizado e acontecia de forma periódica, duas vezes ao dia, geralmente nos horários de 06h30 e 12h00, com profundidade de revolvimento de 0,20 m. O revolvimento era realizado através do implemento híbrido (escarificador com rolo destorroador) acoplado a um trator (JOHN DEERE® 5078E, 78cv), com o intuito de incorporar os dejetos dos animais no material de cama, promover maior aeração para o processo de compostagem e descompactar a cama.

Na Figura 4.2, para melhor detalhamento das características e tipologia da instalação CBF, encontram-se apresentadas as imagens da parte interna do sistema de condicionamento térmico ambiente empregado.

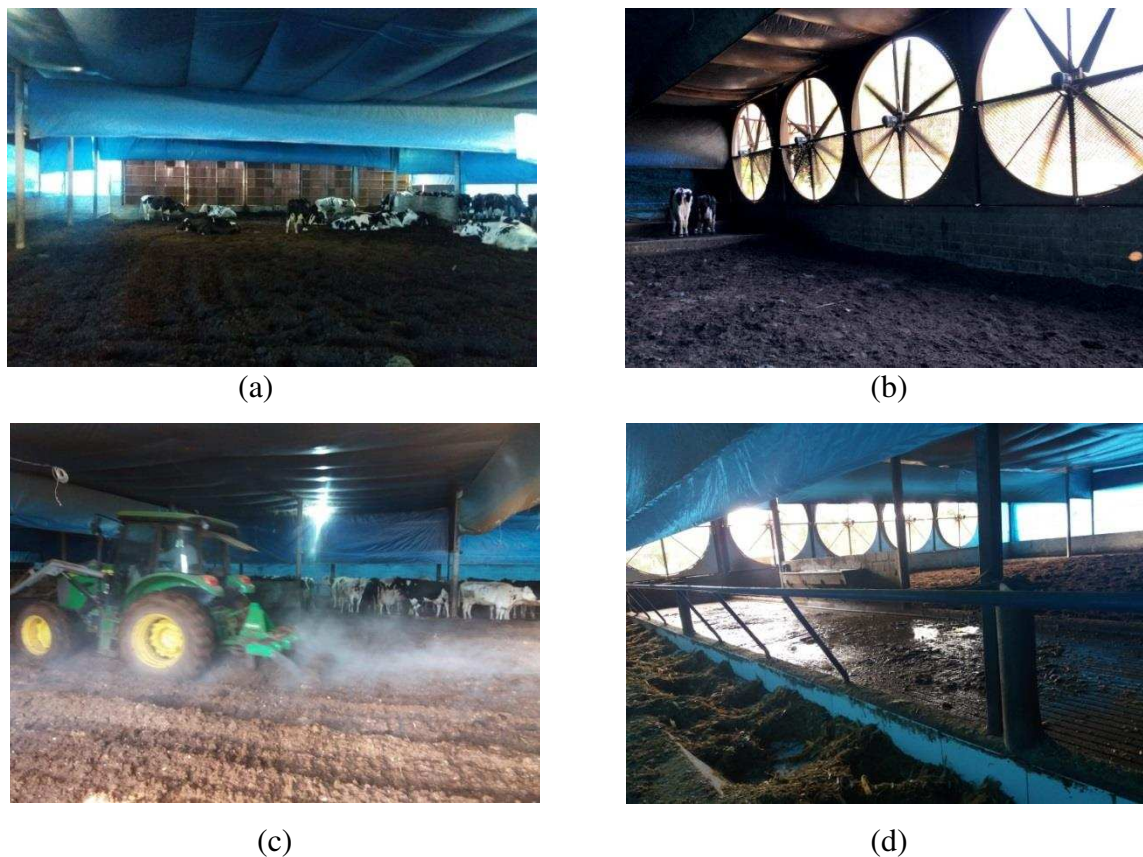


Figura 4.2 - Imagens da parte interna da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF) com ventilação negativa em modo túnel, associada ao resfriamento evaporativo. Destaque para os painéis evaporativos, forro e defletores (a); exautores (b); processo de revolvimento da cama (c); corredor de alimentação (d).

Para composição da cama, inicialmente foi colocada uma camada de 0,30 m de espessura de serragem seca, de maneira a iniciar o composto com as fezes excretadas pelas vacas. Posteriormente, mais materiais (casca de café, maravalha, e/ou serragem) eram adicionados conforme a percepção visual de que a cama estivesse com excesso de umidade, o que ocorria, com maior frequência de reposição, a cada intervalo de 12-15 dias. A primeira retirada e troca de toda a cama da instalação CBF aconteceu após dozes meses de uso do sistema, sendo que nos anos posteriores, isto passou a ocorrer a cada seis meses. Após cada retirada ou troca, o composto final era reaproveitado como fertilizante na própria lavoura de café pertencente à propriedade. Durante o período experimental ocorreram somente reposições de cama, não tendo havido trocas de cama.

Seguindo o manejo já praticado na propriedade, as vacas em lactação foram distribuídas em dois lotes no interior da instalação CBF, de acordo com a produção de leite dos animais. Os animais com maiores taxas de produção foram alojados no Lote 1 (área de cama 38,5 m x 16,0 m), localizado próximo as placas evaporativas; e o Lote 2 (área de cama 16,5 m x 16,0 m), localizado próximo aos exaustores. No período experimental de verão, 80 vacas foram abrigadas na instalação CBF, com a mesma área de cama de 11 m² vaca⁻¹ para o Lote 1 e Lote 2. No período experimental de inverno, 88 vacas foram abrigadas na instalação CBF, com área de cama de 10 m² vaca⁻¹ para o Lote 1 e área de cama de 7,8 m² vaca⁻¹ para o Lote 2. Todas as vacas eram de raça Holandesa, com peso médio de cerca de 600 kg.

Durante o experimento, manteve-se a rotina padrão da propriedade, sendo que as ordenhas eram realizadas duas vezes ao dia (03h00 e 13h00), em sala de ordenha tipo espinha de peixe 2x5, anexa a instalação CBF. A duração média de cada ordenha era por volta de 01h30. Na instalação CBF, as vacas tinham livre acesso ao comedouros e bebedouros, e a alimentação fornecida duas vezes ao dia.

4.2.2 Sistema de coleta das variáveis microclimáticas

A coleta de dados microclimáticos (temperatura e umidade relativa do ar) no interior da instalação e no ambiente externo (abrigo meteorológico) ocorreu de forma ininterrupta, 24 horas dia⁻¹, em intervalos de 5 minutos, durante o período experimental de verão e inverno. Os registros dos dados de temperatura do bulbo seco (t_{bs} , °C) e umidade relativa do ar (UR, %) foram realizados por meio de sensores de baixo custo (DHT22, modelo AM2302, faixa de medição de umidade relativa de 0 a 100%, precisão de $\pm 2\%$, faixa de medição de temperatura de - 40 a + 80°C, precisão de $\pm 0,5$ °C).

4.2.3 Caracterização da cama

As análises das variáveis temperatura, teor de umidade, pH e concentração de nutrientes (na superfície e na profundidade de 0,20 m) da cama foram realizadas durante o período experimental de verão e inverno.

4.2.3.1 Temperatura, umidade e pH da cama

Durante o período de coletas de dados, no verão e inverno, foi realizado um total de 20 visitas na instalação CBF. A área de cama da instalação CBF foi dividida em uma malha regular de 5,5 x 3,5 m, totalizando 45 pontos espaçados uniformemente ao longo da região da cama, conforme representando na Figura 4.3.

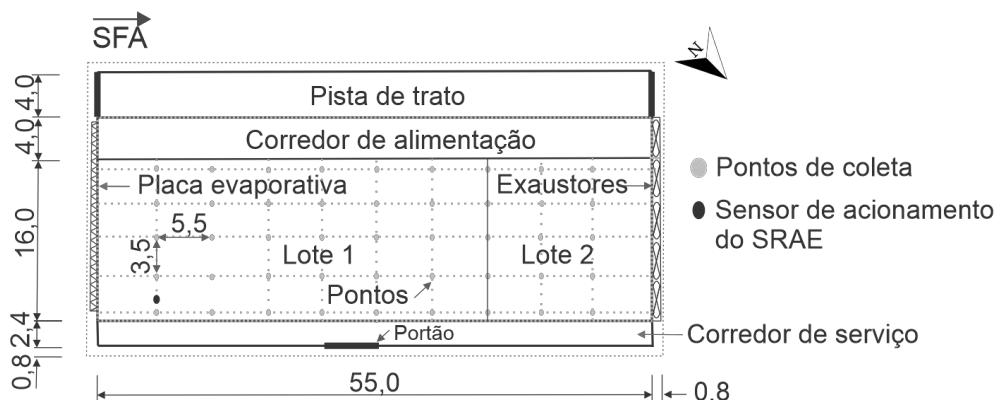


Figura 4.3 - Representação esquemática dos pontos de coleta no interior da instalação *Compost Barn* (CBF), durante o verão e inverno. Dimensões em metros (m). SFA – Sentido do fluxo de ar.

Os valores médios de temperatura da cama superficial e na profundidade de 0,20 m, antes e após o manejo de revolvimento da cama; teor de umidade superficial e na profundidade de 0,20 m da cama (antes do revolvimento da cama); e pH na superfície e na profundidade de 0,20 m da cama (antes do revolvimento da cama); para cada ponto de coleta, foram obtidos entre 06h00 às 09h30, período em que a cama ficou aproximadamente 18 horas sem ser revolvida.

A temperatura superficial (t_{sup} , °C) foi determinada por meio de uma câmera termográfica infravermelha (FLIR® TG165, com faixa de medição de -10 a $+ 45$ °C e $\pm 1,5$ °C de precisão), a distância focal de 1,00 m e a emissividade (ϵ) ajustada para 0,90, conforme Peixoto et al. (2019) e Silva et al. (2020). A temperatura na profundidade de 0,20 m (t_{20}) foi medida com um termômetro de haste (Pyromed® TP101, com faixa de medição de -50 a 300 °C e $\pm 0,1$ °C de precisão), que foi inserido na cama, em cada ponto de medição, por um período de um minuto ou até que a temperatura interna da cama estabilizasse.

Para determinar o teor de umidade e pH da cama, as amostras do substrato foram coletadas na camada superficial e a 0,20 m de profundidade usando uma cavadeira articulada. As coletas ocorreram antes do manejo de revolvimento diário da cama. As amostras eram acondicionadas em embalagens plásticas transparentes e herméticas. Posteriormente, foram colocadas em caixas isotérmicas para o transporte até o Laboratório de Digestão Anaeróbia do AMBIAGRO - DEA, da Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil.

Para a determinação do teor de umidade da cama na superfície (U_{sup} , %) e à profundidade de 0,20 m (U_{20} , %), adotou-se a metodologia adaptada de Melo (2011) e Teixeira et al. (2017), que preconizam o uso de amostra de 10g dispostas em recipientes, e colocadas para secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. Para a pesagem das amostras foi

utilizada uma balança analítica (Shimadzu® AY220, com capacidade de medição de $220 \text{ g} \pm 0,0001 \text{ g}$ de precisão). Após a secagem, as amostras foram colocadas em dessecadores por aproximadamente 30 minutos. Por fim, o recipiente com material seco foi medido. O teor de umidade foi determinado pela razão entre a massa de água evaporada e a amostra úmida da cama, multiplicando por 100.

Para a medição do pH na superfície (pH_{sup}) e profundidade 0,20 m (pH_{20}), foram usadas alíquotas de 10g de composto *in natura*, diluída em 50 mL de água destilada, conforme metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). O pH foi registrado 30 minutos após a diluição e agitação da mistura, por meio de um eletrodo de membrana de vidro (Zhao et al. 2012). Uma bancada de medidor digital de pH calibrado (Quimis® Q-400AS, com faixa de medição de -2,00 pH a 20,00 pH e precisão de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, $\pm 0,02\text{pH}$) foi empregada para as medições de pH.

4.2.3.2 Propriedades químicas do material de compostagem

Para a realização da análise química, com o intuito de verificar a ocorrência de diferença da concentração de nutrientes entre as distintas regiões da cama (próxima ao exaustor, parte central e próximo às placas evaporativas) e em duas profundidades (camada superficial e na profundidade de 0,20 m), a cama foi dividida em quatro áreas de tamanhos iguais (Figura 4.4), conforme metodologia de Shane et al. (2010) adaptada para a tipologia e sistema de climatização da instalação CBF. Com o intuito de melhor retratar o comportamento das mesmas em função da localização ao longo da instalação CBF.

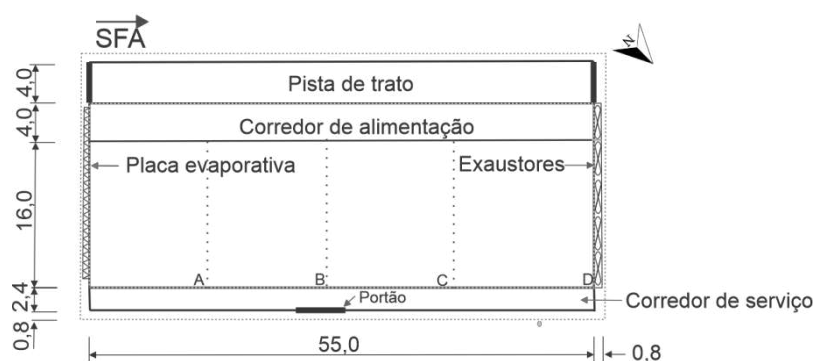


Figura 4.4 - Representação esquemática das quatro regiões (A, B, C e D) de amostragem para determinação da concentração de nutrientes da cama no interior da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF). Dimensões em metros (m). SFA – Sentido do fluxo de ar.

As amostras de cama foram coletadas de forma similar, durante três dias não consecutivos em cada estação climática avaliada (inverno e verão), no período da manhã,

antes do manejo de revolvimento diário da cama. Dentro de cada uma das quatro regiões da cama, cada região foi subdividida em três áreas iguais, das quais foram coletados aproximadamente 0,5 litros de amostras compostas. As amostras foram coletadas na superfície e na profundidade de 0,20 m da cama, totalizando 48 amostras para o período experimental.

Após a coleta, todas as amostras foram imediatamente resfriadas e, em seguida, congeladas até que fossem realizadas as análises. As amostras foram levadas para laboratório especializado, onde foram realizadas análises para determinação e quantificação de Nitrogênio Total (N), Carbono Total (C), Fósforo (P) e Potássio (K). Durante o verão, foi realizada uma análise complementar para determinar cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), enxofre (S), Boro (S), Sódio (Na), apresentada no material suplementar (Tabela S1).

No laboratório, as amostras foram submetidas à secagem em temperatura de aproximadamente 70 °C, durante o período de aproximadamente 72h. Os métodos de análise, empregados pelo laboratório especializado, para Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn foram por digestão nitroperclórica, determinação na absorção atômica; P por digestão nitroperclórica, determinação colorimétrica utilizando método da vitamina C; K por digestão nitroperclórica, determinação por fotometria com emissão de chama; S por digestão nitroperclórica, determinação colorimétrica; B mufla, determinação colorimétrica; C pelo método do Walkley-Black; N pelo Método do Kjeldahl (AOAC, 2010). Posteriormente, a razão C:N foi calculada.

4.2.4 Indicadores de bem-estar animal

Os dados referentes aos indicadores de bem-estar animal foram coletados e compatibilizados por dois observadores experientes e treinados, que registraram a pontuação de escore sujidade (ES) e escore de locomoção (EL). As avaliações foram realizadas no verão, dia 26 de dezembro de 2018, e no inverno, dia 12 de Julho de 2019. Em cada visita, todas as vacas alojadas foram avaliadas quanto ao ES e EL.

O escore de sujidade do úbere e das pernas foi avaliado durante a ordenha, utilizando a metodologia proposta Schreiner e Ruegg (2002). Para tanto, foi utilizada uma escala de 1 a 4, sendo que o escore 1: corresponde à ausência de sujeira nas regiões avaliadas; escore 2: pouco sujo (2 a 10 % de sujidade); escore 3: moderadamente sujo (10 a 30 % de sujidade); escore 4: muito sujo (mais de 30 % de sujidade).

O escore de locomoção foi avaliado utilizando a metodologia de Barker et al. (2010) e observando os animais no interior da instalação CBF enquanto caminhavam sobre uma superfície plana. Foi utilizada uma escala com valores de 0 a 3, sendo que os números 0 e 3 são os extremos da escala, representando locomoção normal e claudicação grave, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Escore de claudicação e critérios de avaliação dos animais

Escore	Critérios de avaliação
0	Locomoção normal: o animal caminha com confiança, com peso uniforme nas quatro patas e passos firmes com distribuição correta dos pesos e apoios. Patas posteriores sobrepõem o mesmo local das patas anteriores. Sem oscilações das patas para dentro ou para fora.
1	Claudicação leve: o animal caminha com cautela, possivelmente, em decorrência de sensibilidade. Pode ocorrer a oscilação das patas para dentro ou para fora. Apresenta a postura normal em estação e ligeiramente arqueada em locomoção, apoios normais.
2	Claudicação moderada: Definitivamente manco (o pé cai irregular, as garras de orvalho no membro afetado não caem tanto) ou coluna arqueada. Um membro favorecido se moverá mais rapidamente do que o coxo. Velocidade de caminhada não afetada de forma perceptível.
3	Claudicação grave: Não consegue andar em um ritmo acelerado, relutância ou recusa para locomover-se. O animal demonstra sinais evidentes de dor nos membros, sendo estes, relutância em suportar peso e mudanças nítidas na postura corporal.

Fonte: Adaptado de Barker et al. (2010) e Pereira (2017).

4.2.5 Produção média de leite

Para a produção média de leite (kg leite dia⁻¹), foram obtidos dados a partir dos controles leiteiros quinzenais disponibilizados pela fazenda, através de medidores eletrônicos de fluxo de leite. Foram utilizadas as médias de produção de leite de dezembro de 2018 e julho de 2019.

4.2.6 Análise Estatística

As análises das variáveis da cama (t_{sup} , t_{20} , U_{sup} , U_{20} , pH_{sup} e pH_{20}), foram verificadas baseadas na estatística descritiva dos dados coletados, obtendo-se valores da média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valores mínimos, valores máximos, curtose e assimetria. A dispersão dos dados foi analisada adotando o critério de classificação para o coeficiente de variação (CV) proposto por Warrick e Nielsen (1980), classificado como baixo quando $CV < 12\%$, médio quando $12\% < CV < 24\%$ e alto quando $CV > 24\%$.

A técnica da modelagem geoestatística foi aplicada para verificar a distribuição e a dependência espacial entre os pontos de coleta para as variáveis temperatura superficial (t_{sup} , °C), antes e depois do revolvimento da cama; teor de umidade na superfície (U_{sup} , %) e profundidade (U_{20} , %) da cama; pH na superfície (pH_{sup}) e profundidade (pH_{20}) da cama, durante o verão e inverno. A dependência espacial das variáveis citadas foi analisada usando ajustes de semivariograma e interpolação por krigagem ordinária. Este método estima dados em pontos não amostrados a partir de pontos que foram amostrados (Yanagi Júnior et al., 2011).

Para a estimativa do semivariograma, foi utilizado o estimador de Matheron (1962), conforme equação 1, para quantificar a dependência espacial das variáveis dentro da instalação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde: $N(h)$ é o número de pares de observação $Z(X_i)$ e $Z(X_i + h)$ separados por uma distância h .

Do ajuste de um modelo matemático $\hat{\gamma}(h)$, foram obtidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma, chamado efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (a).

O Grau de Dependência Espacial (GDE) foi utilizado para analisar a dependência espacial, tendo sido calculado a partir da razão entre o efeito pepita e o patamar (C_0/C_0+C_1). Para analisar o GDE das variáveis em estudo, utilizou-se da classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados uma forte dependência em semivariogramas com $\text{GDE} \leq 0,25$; dependência moderada em semivariogramas com $0,25 < \text{GDE} \leq 0,75$ e dependência fraca em semivariogramas com $\text{GDE} > 0,75$.

O ajuste dos modelos de semivariograma foi escolhido de acordo com os métodos de OLS (Ordinary Least Square) ou de REML (Máxima Verossimilhança Restrita), conforme sugerido por Marchant e Lark (2007). Os modelos testados para o ajuste do semivariograma experimental foram esférico, exponencial e gaussiano (equações 2, 3 e 4, respectivamente), de acordo com Vieira et al. (2010), e utilizando a biblioteca geoR (Ribeiro Junior & Diggle, 2001) do software R DEVELOPMENT CORE TEAM (2015).

Modelo esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), h \leq a \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1, h > a$$

Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \text{EXP} \left(\frac{-3h}{a} \right) \right) \quad (3)$$

Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - \text{EXP} \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right) \quad (4)$$

Posteriormente, conhecido o semivariograma das variáveis e ocorrendo dependência espacial, foram confeccionados os mapas da distribuição espacial através da técnica de krigagem ordinária dos dados. Método este que possibilita a visualização da espacialização dos dados, através da interpolação de valores, sem tendência e com variância mínima (Vieira, 2000). A partir dos dados interpolados, foram gerados mapas da superfície de resposta, utilizando o software Surfer[®], versão 13.4.

As concentrações de nutrientes foram avaliadas por análise descritiva através da média, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo em quatro regiões da cama (A, B, C e D), durante as estações de verão e inverno. Os dados entre as duas profundidades foram comparados pelo teste t-pareado, ao nível de 5 % de significância.

Os escores de sujidade e locomoção foram apresentados na forma de percentagem (%) e comparados entre as duas estações climáticas (inverno e verão). Foi realizada uma análise não paramétrica por meio do teste de Wilcoxon, ao nível de 5% de significância. Os escores equivalem a notas atribuídas, sendo considerados variáveis qualitativas ordinais, ou seja, que não possuem distribuição normal.

Os dados de produção de leite entre as estações de verão e inverno foram comparadas pelo teste t, ao nível de 5 % de significância e, posteriormente, foram apresentados por meio de gráficos de barra.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Análise das variáveis microclimáticas

Na Figura 4.5 estão apresentados o comportamento dos valores médios horários da temperatura do ar (t_{bs} , °C) e umidade relativa (UR, %) no interior da instalação CBF e no ambiente externo (abrigo meteorológico), durante o verão e inverno.

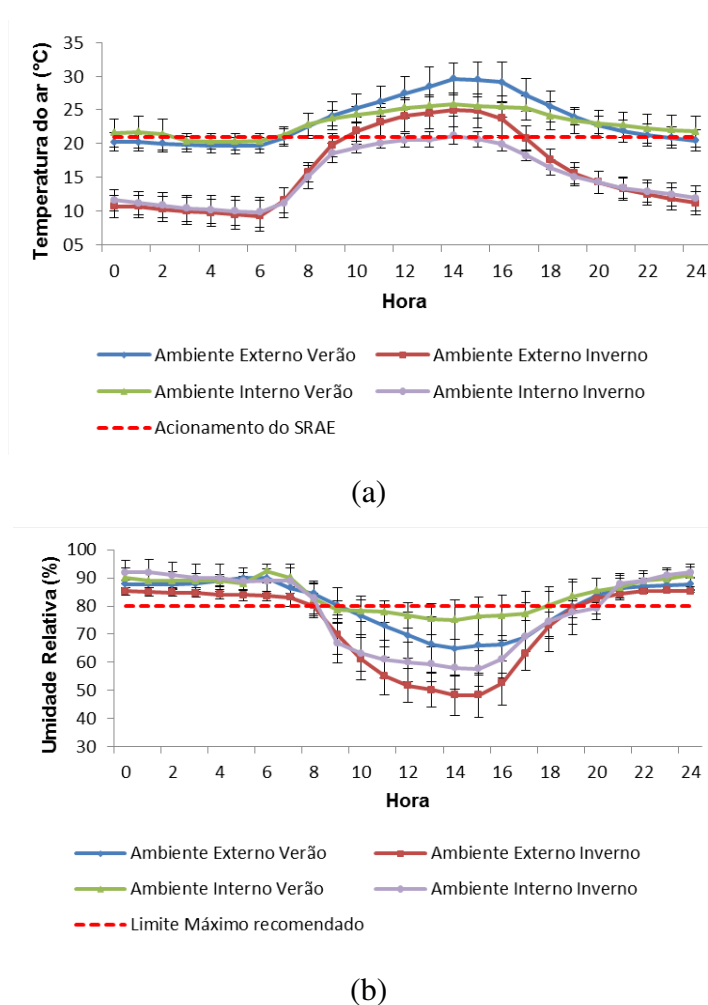


Figura 4.5 - Variação média e desvio padrão dos valores médios horários de (a) temperatura de bulbo seco (t_{bs}), em °C, e (b) umidade relativa (UR), em %, no interior da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), equipada com o SRAE – Sistema de Resfriamento Adiabático Evaporativo, e no ambiente externo, ao longo do período experimental do verão e do inverno.

Observa-se que no verão, os valores médios horários de t_{bs} no interior da instalação CBF estiveram bem uniformes ao longo de todo o dia, com variação de 20 a 24 °C. Já para o ambiente externo, os valores médios de t_{bs} oscilaram de 19 a 29°C. Durante o inverno, os valores médios de t_{bs} no interior da instalação CBF ao longo do dia foram de 11 a 22 °C, e no ambiente externo de 9 a 25°C.

Os valores médios de UR observados foram elevados (superiores a 70%) no interior da instalação CBF, durante as duas estações analisadas.

4.3.2 Análise geoestatística – Temperatura, teor de umidade e pH do material de compostagem da cama

A análise descritiva das variáveis temperatura superficial (t_{sup} , °C) e temperatura na profundidade de 0,20 m (t_{20} , °C) antes e depois do revolvimento; teor de umidade na superfície (U_{sup} , %) e na profundidade de 0,20 m (U_{20} , %); pH na superfície (pH_{sup}) e na profundidade de 0,20 m (pH_{20}) do material de cama, encontra-se apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Estatística descritiva para as variáveis temperatura superficial (t_{sup} , °C) e temperatura na profundidade de 0,20 m da cama (t_{20} , °C), antes e depois do revolvimento; teor de umidade na superfície (U_{sup} , %) e profundidade de 0,20 m (U_{20} , %) da cama; pH na superfície (pH_{sup}) e profundidade de 0,20 m (pH_{20}) da cama, referentes aos valores médios obtidos na região da cama da instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período experimental de verão e inverno.

Período	Variável	Média	Mediana	³ DP	⁴ CV	⁵ Mín.	⁶ Máx.	⁷ Curt	⁸ Ass.
Verão	¹ t_{sup}	25,14	25,09	0,56	2,25	22,20	26,81	3,33	-0,11
	² t_{sup}	27,68	27,65	0,45	1,61	25,63	30,16	5,20	0,28
	¹ t_{20}	40,49	40,76	3,32	8,21	30,30	46,00	2,65	-0,56
	² t_{20}	39,96	40,55	2,71	6,79	29,90	46,30	2,99	-0,75
	U_{sup}	52,67	52,92	2,97	5,64	45,00	59,00	2,56	-0,25
	U_{20}	54,02	54,19	2,82	5,22	46,00	60,37	2,83	-0,22
	pH_{sup}	9,38	9,35	0,23	2,46	8,70	9,98	2,76	0,34
	pH_{20}	9,49	9,47	0,22	2,28	8,78	9,97	2,77	0,02
Inverno	¹ t_{sup}	15,91	15,97	0,77	4,88	13,78	17,68	2,06	-0,32
	² t_{sup}	20,76	20,90	0,70	3,37	17,88	22,16	4,55	-1,13
	¹ t_{20}	34,20	35,12	4,32	12,63	23,74	42,7	2,47	-0,57
	² t_{20}	31,66	32,28	3,66	11,56	39,60	22,60	2,50	-0,34
	U_{sup}	61,26	61,06	2,23	2,88	57,07	64,56	1,98	-0,13
	U_{20}	61,24	61,15	1,76	2,34	58,00	65,35	2,49	0,33
	pH_{sup}	9,02	9,01	0,05	0,64	8,89	9,31	4,81	0,43
	pH_{20}	8,97	8,98	0,04	0,58	8,83	9,06	3,89	-0,89

¹ antes do revolvimento; ² depois do revolvimento; ³DP: Desvio Padrão; ⁴CV: Coeficiente de Variação (%); ⁵Mín.: mínimo; ⁶Máx.: Máximo; ⁷Curt: Curtose; ⁸Ass.: Assimetria.

Para as variáveis mencionadas, a diferença entre os valores médios mínimos e máximos registrados mostra a não homogeneidade dos dados, podendo indicar a dependência espacial entre os pontos registrados. Durante o verão e inverno, antes do revolvimento da cama, os valores de t_{20} ($40,49 \pm 3,32^\circ\text{C}$ no verão e $34,20 \pm 4,32^\circ\text{C}$ no inverno) foram superiores a t_{sup} ($25,14 \pm 0,56^\circ\text{C}$ no verão e $15,91 \pm 0,77^\circ\text{C}$), indicando que a camada aerada era biologicamente ativa. As médias de t_{sup} e t_{20} foram superiores no verão, quando comparadas com as de inverno. O teor de umidade e pH foram similares entre as duas profundidades analisadas.

De acordo com Little e Hills (1978), os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal, quando valores da média, mediana e da moda são semelhantes. As variáveis analisadas apresentaram medidas de tendência central (média e mediana) muito próximas, o que permite inferir que os dados não apresentam assimetria acentuada, apesar da ocorrência de algumas distribuições assimétricas. Tal fato pode ser confirmado ao analisar os valores do coeficiente de assimetria próximos de zero.

Em relação à variabilidade dos dados analisados pelo coeficiente de variação (CV), todos apresentaram baixa variabilidade ($CV < 12\%$), indicando baixa dispersão dos dados, exceto a t_{20} antes do revolvimento no inverno que apresentou média variabilidade ($12\% < CV < 24\%$), de acordo com os critérios estabelecidos por Warrick e Nielsen (1980).

Da mesma forma ocorreu em estudo desenvolvido por Silva et al. (2020), que analisou a variabilidade espacial da temperatura da superfície de uma instalação CB localizada no estado de Pernambuco, Brasil, no qual os autores observaram baixo CV para essa variável. Similarmente, Mota et al. (2019) em estudo em instalação CB durante o verão e inverno no Estado de Minas Gerais, Brasil, também observaram baixo CV para as temperaturas superficiais e à profundidade de 0,15 m da cama, antes e após o revolvimento diário da mesma.

Os modelos e parâmetros dos semivariogramas experimentais ajustados para as variáveis temperatura superficial (t_{sup} , °C) e à profundidade de 0,20 m (t_{20} , °C) da cama, antes e após o revolvimento; teor de umidade na superfície (U_{sup} , %) e profundidade de 0,20 m (U_{20} , %) da cama; e pH na superfície (pH_{sup}) e profundidade 0,20 m (pH_{20}) da cama, estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Método, modelo e parâmetros estimados parâmetros dos semivariogramas experimentais ajustados para as variáveis temperatura superficial (t_{sup}) e na profundidade de 0,20 m (t_{20}) da cama, antes e após o revolvimento; teor de umidade na superfície (U_{sup}) e profundidade de 0,20 m (U_{20}) da cama; e pH na superfície (pH_{sup}) e profundidade 0,20 m (pH_{20}) da cama, obtidos na região da cama da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF), durante o período experimental de verão e inverno.

Variables	Method	Model	C_0	C_1	C_0+C_1	a	GDE	EM	DPm	ER	DPR
Verão											
¹ t_{sup}	REML	Gaussiano	0,648	0,260	0,908	24,217	0,713	-0,009	0,881	-0,005	1,013
² t_{sup}	REML	Exponencial	0,000	0,701	0,701	9,289	0,000	-0,016	0,785	-0,010	0,997
¹ t_{20}	REML	Esférico	0,000	26,280	26,280	19,014	0,000	-0,172	2,386	-0,035	1,010
² t_{20}	REML	Esférico	0,000	20,310	20,310	15,861	0,000	-0,234	2,942	-0,039	1,005
U_{sup}	OLS	Esférico	1,942	16,923	18,865	37,865	0,103	0,051	1,317	0,011	0,547
U_{20}	OLS	Gaussiano	3,678	15,709	19,387	38,026	0,190	0,032	1,497	0,008	0,688
pH_{sup}	REML	Gaussiano	0,000	0,062	0,062	17,308	0,005	0,000	0,032	-0,004	0,873
pH_{20}	REML	Esférico	0,000	0,055	0,055	20,526	0,000	0,006	0,102	0,022	0,744
Inverno											
¹ t_{sup}	REML	Esférico	0,176	1,126	1,302	22,208	0,135	-0,019	0,755	-0,013	1,007
² t_{sup}	REML	Esférico	0,221	1,092	1,314	26,362	0,168	-0,029	0,772	-0,019	1,021
¹ t_{20}	REML	Esférico	0,000	24,950	24,950	23,551	0,000	-0,139	2,506	-0,026	0,919
² t_{20}	REML	Esférico	0,000	18,950	18,950	22,554	0,000	-0,093	2,316	-0,019	0,950
U_{sup}	OLS	Esférico	0,000	5,092	5,092	29,977	0,000	-0,003	0,316	-0,001	0,284
U_{20}	OLS	Gaussiano	0,065	3,903	3,968	20,963	0,016	0,005	0,508	0,002	1,080
pH_{sup}	REML	Esférico	0,000	0,006	0,006	23,077	0,016	0,049	0,000	0,002	1,072
pH_{20}	REML	Esférico	0,000	0,0031	0,003	28,758	0,000	-0,001	0,021	-0,012	0,774

¹ antes do revolvimento; ² depois do revolvimento; C_0 – efeito pepita; C_1 – contribuição; $C_0 + C_1$ – patamar; a – alcance; e GDE – grau de dependência espacial; EM - erro médio; DPm - Desvio padrão do erro médio; ER - Erro reduzido; DPR - Desvio padrão do erro reduzido; REML - Máxima Verossimilhança Restrita; OLS (Ordinary Least Square).

De acordo com a análise geoestatística, todas as variáveis analisadas apresentaram variabilidade espacial no interior da instalação CBF, expressa pelos semivariogramas. Esses resultados permitem inferir que o sistema não funcionou de forma a garantir a homogeneidade da distribuição espacial da t_{sup} , t_{20} , U_{sup} , U_{20} , pH_{sup} e pH_{20} .

Os semivariogramas se ajustaram ao modelo esférico em praticamente todas as situações, exceto a U_{sup} e pH_{sup} durante o verão e U_{20} durante o inverno, que foram ajustados ao modelo gaussiano, e t_{sup} após o revolvimento durante o verão, que foi ajustado ao modelo exponencial. Corroborando com resultados obtidos por Silva et al. (2020), que estudaram as condições da cama em instalação CB para bovinos de leite, e também foi obtido os semivariogramas ajustados ao modelo esférico e gaussiano para a t_{sup} da cama. Peixoto et al., (2019), analisaram a t_{sup} de instalação CB no estado do Ceará, Brasil, durante o período chuvoso e seco, e entre diferentes turnos no dia, o melhor ajuste para todas as situações analisadas foram para o modelo esférico.

A razão de dependência (C_0/C_0+C_1) mostrada na Tabela 4.3 na coluna GDE indica que as variáveis apresentaram dependência espacial forte ($\text{GDE} \leq 0,25$), exceto a t_{sup} antes do revolvimento no verão, que apresentou dependência espacial moderada ($0,25 < \text{GDE} \leq 0,75$). Os erros médios (EM) obtidos estão agrupados em torno do valor ideal de 0 (zero).

Os valores de alcance (a) referentes aos semivariogramas têm considerável relevância na determinação do limite de dependência espacial, ou seja, refere-se ao ponto limite onde as variáveis são dependentes uma das outras (Ferraz et al., 2016). Para todas as variáveis analisadas, o valor de “a” foi maior do que a distância menor entre os pontos de amostragem, permitindo que a técnica da geoestatística fosse utilizada de forma satisfatória, conforme indicado por Damasceno et al. (2019).

No presente estudo, para o alcance de dependência espacial foi observado variação de 9,289 m para t_{sup} após o revolvimento da cama no verão, e de 38,026 m para U_{20} no verão. As médias de alcance da U_{sup} e U_{20} foram superiores às demais médias, indicando que, para estas variáveis, o raio de alcance foi maior, abrangendo maior distância na região da cama da instalação CBF. Os menores valores de alcance foram verificados para as variáveis t_{sup} depois do revolvimento no verão (9,289 m) e a t_{20} depois do revolvimento no verão (15,861 m), e apresentaram valores acima da menor distância entre as amostragens realizadas (3,5 m). Após as distâncias apresentadas por cada variável as amostras não têm dependência espacial, sendo que para distâncias maiores as observações são independentes (Miragliotta et al., 2006).

Na Figura 4.6 estão apresentados os mapas de Krigagem dos valores médios das variáveis: temperatura superficial da cama (t_{sup} , °C) e temperatura na profundidade de 0,20 m da cama (t_{20} , °C), antes e depois do manejo diário de revolvimento da mesma, durante o verão e inverno. Observa-se que ocorreu grande variabilidade de t_{sup} e t_{20} na região da cama da instalação CBF, as regiões com reduzidos valores de t_{sup} e t_{20} são caracterizadas por cores mais azuladas, enquanto regiões com valores mais altos de t_{sup} e t_{20} estão com cores mais avermelhadas.

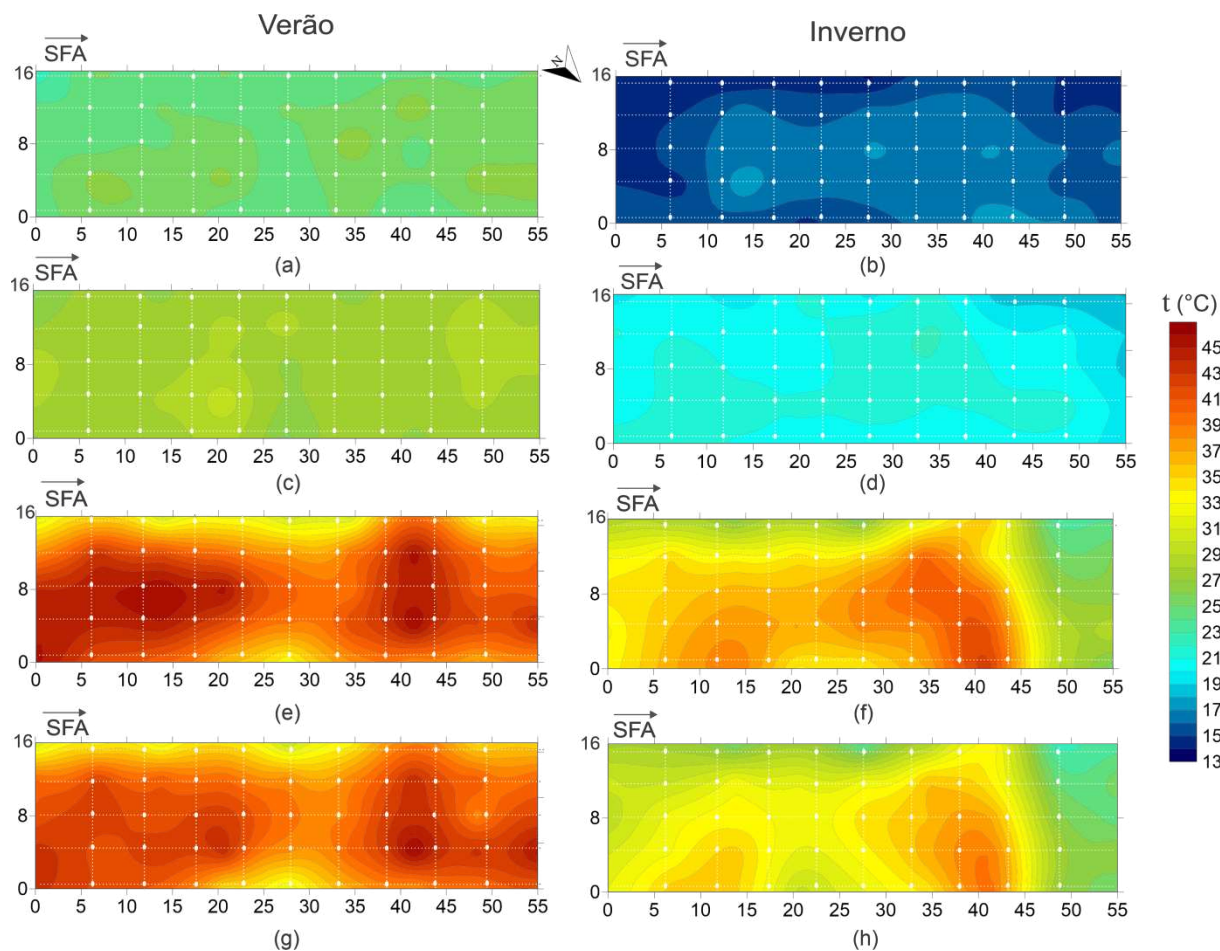


Figura 4.6 - Distribuição espacial das variáveis: temperatura superficial (t_{sup} , °C) da cama antes (a) e depois (c) do revolvimento no verão; temperatura superficial (t_{sup} , °C) da cama antes (b) e depois (d) do revolvimento no inverno; temperatura na profundidade de 0,20 m (t_{20} , °C) da cama antes (e) e depois (g) do revolvimento no verão; temperatura na profundidade de 0,20 m (t_{20} , °C) da cama antes (f) e depois (h) do revolvimento, no inverno. SFA – Sentido do fluxo de ar.

Durante o verão, os valores de t_{sup} , antes do revolvimento da cama, apresentaram amplitude de 5 °C (faixa de 22 - 27,0 °C, Figura 4.6a), sendo que, após o revolvimento da cama, a amplitude passou a ser de 4,6 °C (faixa de 25,6 - 30,2 °C, Figura 4.6c). Já para o inverno foram registradas para a t_{sup} antes do revolvimento, amplitude de 4 °C (faixa de 13,8 -

17,8 °C, Figura 4.6b) e, após o revolvimento, amplitude de 4,4 °C (faixa de 17,8 - 22,4 °C, Figura 4.6 d).

A ocorrência da falta de uniformidade na distribuição da t_{sup} pode ser atribuída em razão aos fatores do ambiente térmico da instalação, como disposição dos exaustores, placas evaporativas e defletores, influência da falta de isolamento dos fechamentos laterais, bem como devido à abertura dos portões laterais, necessária para o manejo da cama e dos animais. De acordo com Mondaca et al. (2019), as propriedades térmicas dos materiais utilizados na edificação e as barreiras físicas, podem afetar significativamente a taxa de ventilação no interior dos alojamentos.

Eckelkamp et al. (2016a) em estudo sobre instalações CB avaliando a influência do ambiente na temperatura da cama, observaram que as variações anuais nas temperaturas da superfície da cama de instalações CB foram semelhantes às temperaturas ambientes. Black et al. (2013) avaliaram instalações CB e observaram temperatura média na superfície da cama de $10,5 \pm 8,0$ °C. Segundo os autores, a evaporação e a ventilação resfriam e secam a superfície da cama da instalação CB, fazendo com que o nível de temperatura da superfície desta fique próximo a temperatura ambiente.

Durante o inverno, observa-se reduzidos valores de t_{sup} , entre 13,8 a 14,8 °C, próximo das placas de resfriamento evaporativo, provavelmente, em decorrência do sistema de controle climático utilizado. No sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel, quando o ar quente e não saturado, externo a instalação, é forçado pelos exaustores a atravessar a placa porosa umedecida, ocorre troca simultânea de calor e massa, com mudança de estado de parte da água da fase líquida para vapor, e elevação da umidade relativa do ar de entrada, com conseqüente redução da temperatura (Tinôco, 1996; Baêta & Souza, 2010). Dessa forma, próximo às placas evaporativas, a maior entrada de ar frio com alta umidade relativa, durante os períodos de necessidade do acionamento da placa de resfriamento, contribuiu para a redução da t_{sup} nessa região, indicando que sua ocorrência se deve a proximidade do ar úmido.

Nota-se que durante o verão, os valores de t_{sup} (entre 22,0 a 24,0 °C) próximo às placas de resfriamento não tiveram os valores reduzidos conforme observado no inverno. Provavelmente, em decorrência da maior reposição do material de cama nessa região, necessária devido o excesso de umidade relativa do ar (média de $80,4 \pm 5,4\%$ e $73,2 \pm 3,7\%$ no verão e inverno).

Observou-se também que, antes do revolvimento, a temperatura superficial da cama se apresentou próxima da temperatura do ar, em ambas as estações, ao se considerar o

levantamento de valores obtidos por meio da média dos pontos coletados (Figura 4.5). O valor da temperatura média ambiental no interior da instalação, no período de coleta dos dados de verão, foi de 23,0 °C e a temperatura média da cama foi de 25,1 °C. O valor da temperatura média ambiental no interior da instalação no período de coleta dos dados de inverno foi de 13,7 °C e a temperatura média da cama foi de 15,9°C. A t_{sup} da cama está associada aos valores da temperatura ambiente, conforme descrito por diversos autores (Black et al., 2013; Llonch et al., 2020).

Para as duas estações avaliadas, considerando as t_{sup} antes do revolvimento, os valores mais elevados foram encontradas na parte central da instalação, sendo que durante o verão a t_{sup} máxima registrada foi de 27 °C (Figura 4.6a), e no inverno a t_{sup} máxima registrada foi de 17,8 °C (Figura 4.6b). Os resultados indicaram valores de t_{sup} mais altos no verão, sugerindo certo desconforto térmico para os animais, considerando o limite de conforto térmico ambiente de 5 a 25°C, proposto por Roenfeldt (1998). Contudo, durante o inverno, a temperatura superficial ficou dentro da faixa de conforto esperada.

Quando em condições de conforto adequado, as vacas permanecem mais tempo deitadas, principalmente quando em ócio e ruminção, porém, quando a temperatura ambiente ou a temperatura superficial da cama está elevada, a troca de calor entre o animal e o meio ambiente é prejudicada, o que pode fazer com que o animal se sinta mais confortável na posição levantado (Damasceno et al., 1999; Almeida et al., 2013; Damasceno, 2020). Por isso, a escolha do material de cama que atenda o conforto dos animais e o revolvimento diário é essencial, pois esses passam várias horas do dia deitados sobre a cama, aumentando assim o contato com a superfície de transferência de calor (Silva et al., 2020).

Nota-se que, após o revolvimento da cama, a t_{sup} aumentou consideravelmente (Figuras 4.6, c, d), este comportamento ocorreu independente da estação do ano, contudo, seguindo o mesmo comportamento da distribuição espacial encontrada antes do revolvimento, com temperaturas mais elevadas na parte central da instalação e durante o verão. As maiores t_{sup} encontradas após o manejo, podem ser justificadas pelo revolvimento que dissipou o calor interno da cama e com isso parte da cama que estava mais quente incrementou o calor superficial.

Esses resultados são similares aos encontrados por Guesine (2020), que através de mapas de Krigagem para análise de cama com material de casca de arroz em instalação CB, no Brasil, durante o verão, e após o revolvimento da cama, obteve resultados de valores de temperatura superficial da cama superiores, quando comparados àqueles obtidos antes do revolvimento, com amplitude de 14,8 °C e temperaturas máximas próximas a 25 °C.

Os mapas de krigagem (Figuras 4.6e, f, g, h), para a variação na distribuição espacial da temperatura na profundidade de 0,20 m (t_{20} , °C), indicaram alta variabilidade ao longo da região da cama da área da instalação CBF. Durante as duas estações climáticas avaliadas (inverno e verão), em expressiva área do material de cama foram verificados valores de temperatura a 0,20 m de profundidade, inferiores ao recomendado para uma compostagem ideal; foram obtidos, antes do revolvimento, no verão, valores na faixa de 30,0 - 47,0 °C e, no inverno na faixa de 23,0 - 44,0 °C, sendo o recomendado pela literatura: 43,3 a 65,0 °C, segundo NRAES-54, 1992; Bewley et al., 2013; Black et al., 2013.

Esta variabilidade da temperatura ao longo do comprimento da região da cama sugere que a atividade microbiológica variou dentro do sistema de compostagem, possivelmente em razão dos fatores do ambiente térmico da instalação como um todo, os quais também variaram por efeito da disposição dos exaustores, distanciamento dos painéis evaporativos, influência dos paramentos verticais do fechamento da instalação (cortinas e paredes em materiais não isolantes), maior influência do ambiente externo nas laterais da instalação, entre outros. Também foi possível observar que a t_{20} apresentou valores mais elevados que a t_{sup} , conforme esperado, sendo um potencial indicativo de que o material de cama se encontrava em franca decomposição, já que a atividade microbiológica resulta em produção de calor.

A temperatura da cama é considerada um dos principais parâmetros para avaliação do processo de compostagem. Para uma compostagem eficaz, a temperatura e umidade interna da cama devem ser mantidas em níveis adequados, sendo que a manutenção de valores de temperatura na faixa de 54 a 65 °C por 3 a 4 dias pode até mesmo inativar alguns patógenos e vírus, destruir sementes de ervas daninhas e larvas de moscas, o que é muito benéfico para o processo (Eckelkamp et al., 2016b). A manutenção de temperaturas controladas, na fase de degradação ativa, é importante para se atingir a melhor eficiência do processo, propiciando o aumento da velocidade de degradação e eliminação de microrganismo patogênicos (Pereira Neto, 2007).

Valores de temperaturas no interior da cama, quando abaixo de 45 °C, tornam o processo de degradação do material da cama mais lento, e ocasiona em um meio para proliferação microbiana mais diversa, podendo não ocorrer à eliminação de alguns ovos de moscas e microrganismos patógenos presentes no material de compostagem (Damasceno, 2020). Por outro lado, temperaturas muito elevadas (acima de 65 °C) causam a eliminação dos microrganismos mineralizadores, responsáveis pela degradação dos resíduos orgânicos e, por isso, devem ser evitadas (Pereira Neto, 2007).

Seguindo o mesmo comportamento da t_{sup} , os níveis mais baixos de t_{20} , conforme esperado, foram encontrados nas regiões periféricas da instalação, tendo essas ocorrido, durante o inverno, próximo da placa de resfriamento evaporativo (face sudeste) e, durante o verão e inverno, próximo do corredor de alimentação. Próximo das placas de resfriamento evaporativo, os valores mais baixos de t_{20} , provavelmente, ocorreram devido à maior entrada de ar frio nesta região, o que provocou a redução da temperatura ao longo da profundidade da cama. A maior umidade oriunda do corredor de alimentação pode ser tanto proveniente dos bebedouros quanto do sistema de limpeza do piso do corredor com água (*flushing*), causando o molhamento nessa região. Além disso, nas regiões periféricas, provavelmente devido a menor possibilidade de revolver a cama nesta região, ocasionou na diminuição dos níveis de oxigênio (O_2), com conseqüente redução da t_{20} . Outro ponto a ser destacado foi que durante o inverno na região que estava o Lote 2 (com área de cama por animal de $7,8 \text{ m}^2 \text{ vaca}^{-1}$), foram encontrados valores reduzidos de t_{20} . Nestas regiões citadas da cama, pode-se observar uma lenta decomposição do material de cama com valores de t_{20} inferiores a $28 \text{ }^\circ\text{C}$, bem abaixo do recomendado pela literatura. Devido ao excesso de compactação da cama pelos animais e aumento da contribuição de dejetos.

É importante que a área de cama seja dimensionada de acordo com a densidade de alojamento das vacas, o que definirá, da quantidade de fezes e urina depositada no substrato da instalação CB. Quanto maior a quantidade de vacas e, conseqüentemente, de dejeções, maior a necessidade de se ampliar a área de cama, para que a atividade microbiana e a secagem da superfície desta estejam equilibradas de acordo com a quantidade de dejetos depositados diariamente (Janni et al., 2007). Os resultados obtidos na pesquisa de Leso et al. (2013) em instalações CB, confirmam que a densidade animal é um fator-chave neste tipo de instalação.

Em instalação CB com laterais abertas e ventilação mecânica positiva, a literatura relatou resultados de temperatura interna da cama de $35,9 \pm 3,9 \text{ }^\circ\text{C}$ no estado de Minas Gerais, Brasil (Oliveira et al., 2019); de $53,9 \pm 2,7 \text{ }^\circ\text{C}$ no estado de São Paulo, Brasil (Fávero et al. 2015b); de $42,5 \pm 7,6 \text{ }^\circ\text{C}$, no estado de Minnesota, EUA (Barberg et al., 2007a); na faixa de $31,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a $48,1 \text{ }^\circ\text{C}$ no verão e $13,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a $40,6 \text{ }^\circ\text{C}$ no inverno, também em Minnesota, EUA (Shane et al., 2010a); de $43,2 \pm 8,9 \text{ }^\circ\text{C}$ a $47,2 \pm 6,1 \text{ }^\circ\text{C}$ no estado de Kentucky, EUA (Eckelkamp et al., 2016b); de $32,2 \text{ }^\circ\text{C}$ em Barcelona, Espanha (Llonch et al., 2020). Alguns dos resultados destes estudos também estavam fora da faixa recomendada para que a compostagem ocorresse de forma eficaz.

Durante o verão, os maiores valores de t_{20} localizam-se na parte central da cama, com t_{20} máximas registradas de 47 °C, enquanto no inverno os valores máximos registrados foram de 44 °C (valores referentes antes do revolvimento da cama para as duas estações). Foi observado que a t_{20} apresentou valores superiores no verão quando comparado ao inverno. Provavelmente, em decorrência dos maiores valores de temperatura do ar registrados no ambiente nessa estação, justificado por estudos que demonstraram a influência do ambiente também na temperatura interna da cama (Eckelkamp et al., 2016b). Black et al. (2013) observaram que em instalações CB, à medida que o ar esfria, o gradiente de temperatura entre a t_{20} e o ar aumenta, levando à perda de calor da cama.

Shane et al. (2010) estudaram seis instalações CB localizadas em Minnesota, EUA, com diferentes materiais alternativos de cama. Os mesmos autores ainda relataram que, para todos os sistemas de compostagem avaliados, a camada aerobicamente ativa (0,15 a 0,20 m) da cama apresentava temperatura mais alta do que a do ambiente externo, em diferentes estações, o que indicou que as camas aqueciam e ocorria a atividade microbiana. Mais recentemente, Leso et al. (2018) em estudo realizado em instalação CB localizada na região de Piemonte (norte da Itália), observaram que a t_{20} foi significativamente maior do que a temperatura do ar, indicando que a cama estava biologicamente ativa. De acordo com Leso et al. (2020), as condições ambientais são os principais fatores de influência na taxa de secagem e que o calor produzido pelo processo de compostagem pode melhorar consideravelmente a evaporação da umidade da cama.

No estudo em questão, diferentemente do que ocorreu para a t_{sup} , observou-se que após o revolvimento, a t_{20} diminuiu consideravelmente, independentemente da estação climática do ano. Contudo, foram observados valores superiores durante o verão (faixa de 30 a 47 °C), quando comparado ao inverno (faixa de 22 a 41 °C), conforme esperado, já que a temperatura do ar ambiente, no verão, também era superior. Os menores valores de t_{20} encontrados após o manejo de revolvimento da cama, para as duas estações, podem ser justificados pelos menores valores de t_{sup} , na qual a parte superior da cama é revolvida para a profundidade.

A variabilidade espacial da t_{sup} e t_{20} apresentada nos mapas de krigagem indica que a cama necessita do acréscimo de um novo revolvimento entre os turnos, uma vez que a aeração das camadas mais profundas do composto promove maior homogeneização, bem como promove o resfriamento da camada superficial da cama (Silva et al., 2020).

Na Figura 4.7 são apresentados os mapas de distribuição espacial dos valores médios das variáveis: teor de umidade na superfície (U_{sup} , %) e profundidade de 0,20 m (U_{20} , %), pH na superfície (pH_{sup}) e profundidade de 0,20 m (pH_{20}), coletadas antes do manejo de

revolvimento diário da cama, nas estações de verão e inverno, na região da cama, da instalação *Compost Barn* Fechada (CBF). Observa-se que não ocorreram uniformidades destas variáveis ao longo da área da instalação, sendo que as regiões com valores mais reduzidos de U_{sup} , U_{20} , e pH_{sup} e pH_{20} estão representadas por cores mais azuladas, enquanto as regiões com valores mais altos de U_{sup} , U_{20} , e pH_{sup} e pH_{20} estão representadas com cores mais avermelhadas.

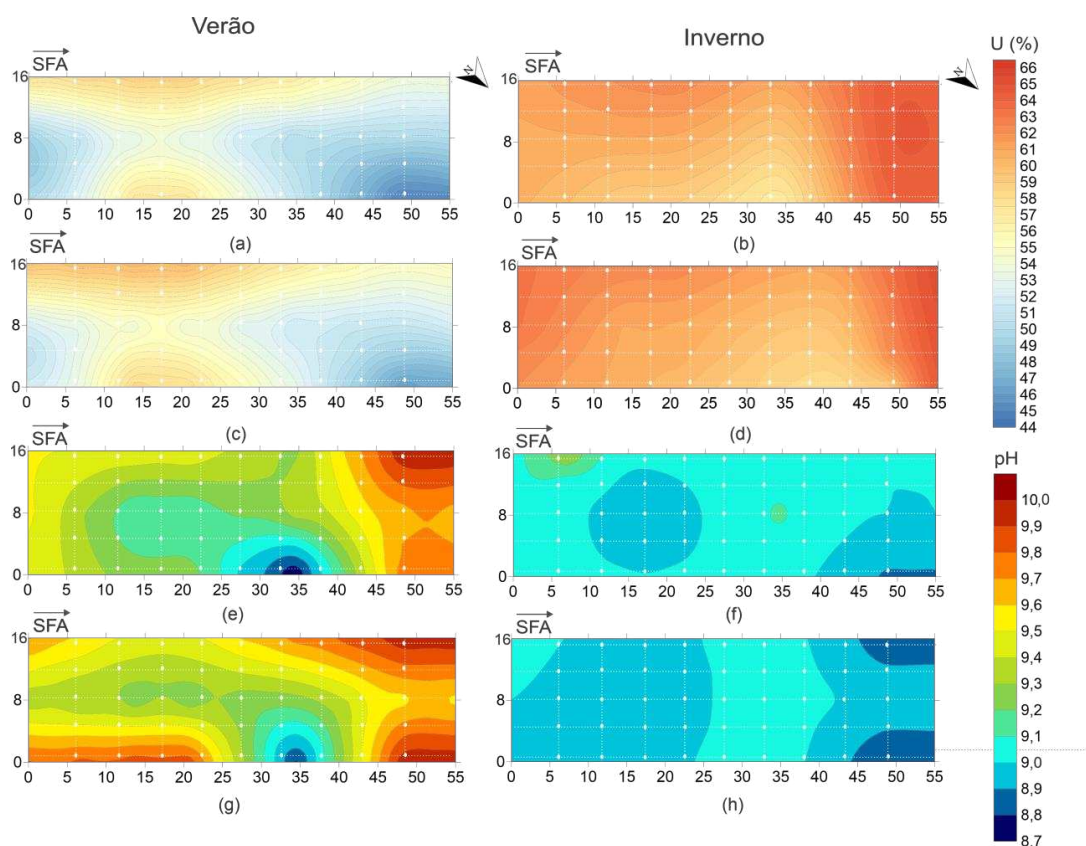


Figura 4.7 - Distribuição espacial dos valores médios das variáveis teor de umidade na superfície da cama (U_{sup} , %), no verão (a) e inverno (b); teor de umidade na profundidade de 0,20 m da cama (U_{20} , %) no verão (c) e inverno (d); pH na superfície da cama (pH_{sup}) no verão (e) e inverno (f); e pH na profundidade de 0,20 m da cama (pH_{20}), no verão (g) e inverno (h), no interior da instalação (CBF). SFA – Sentido do fluxo de ar.

Nos mapas de krigagem para a variação do teor de umidade na superfície (U_{sup}), observou-se baixa variabilidade dos dados, sendo que no verão a U_{sup} teve amplitude de 14% (faixa de 44 – 58 %, Figura 4.7 a) e no inverno amplitude de 8% (faixa de 57-65%, Figura 4.7 b). A partir dos resultados obtidos, verifica-se uma tendência de altos valores de U_{sup} nas regiões periféricas da cama, com valores superiores a 60%.

Conforme verificado para a t_{sup} e t_{20} , nota-se, durante o inverno, níveis elevados de U_{sup} na região próxima da placa de resfriamento evaporativo (face sudeste). Durante o verão,

a maior reposição de cama pode ter contribuído para a diminuição dos níveis de umidade nessa região. Neste sistema climatizado, ocorre o prévio resfriamento do ar forçando-se a passagem do ar externo através de placas com material poroso umedecido e, com isso, tem-se a elevação da umidade relativa do ar (UR) (Smith et al., 2006). Este aumento da UR do ar a partir de determinado limite, promove o aumento da densidade do mesmo, o que ocasiona a movimentação ou precipitação do ar umedecido para as camadas da cama e, conseqüentemente, umedecendo e dificultando a secagem da mesma. Este constitui um fator limitante, dificultando o manejo da cama, podendo influenciar negativamente no processo de compostagem, aumento da emissão de gases nocivos, como a amônia (NH_3) e na higiene dos animais e qualidade do leite (Damasceno, 2020).

Conforme pode ser observado pelas Figuras 4.7a, b, c, d, para as duas estações analisadas (verão e inverno), ocorreu níveis elevados de U_{sup} na região próxima do corredor de alimentação, provavelmente devido ao derramamento de água pelos animais após a ingestão, bem como pelo molhamento ocasionado pelo sistema de limpeza do piso do corredor (*flushing*). Além disso, foram observados valores elevados de U_{sup} na região próxima do único portão de entrada para o acesso a cama, por onde passa o trator para o revolvimento e por onde os animais saem para a ordenha. Nesta região, os altos valores de U_{sup} ocorreram, provavelmente, em decorrência da maior compactação oriunda pelas rodas do trator, pelo implemento e pelas patas dos animais. O material de cama mais úmido (acima de 60%) é mais vulnerável a compactação e, com isso, tem-se a redução do fluxo de ar na cama, podendo torna-la anaeróbia mais rapidamente (Damasceno, 2020).

Durante o inverno, observou-se altos valores de U_{sup} , concomitantemente com baixos valores de t_{sup} e t_{20} na região que estava o Lote 2. A maior densidade animal ocasiona em um maior depósito de fezes e urina, e ainda em maior compactação da cama, fatores que possivelmente contribuíram para o expressivo aumento da U_{sup} nessa região. Neste tipo de sistema, manter a camada superior da cama seca é a parte mais importante do gerenciamento de uma instalação CB, uma vez que tem relação direta com a higiene dos animais e, assim, evita-se piora no escore de higiene das vacas e aumento de contagem de células somáticas (CCS) (Bewley et al., 2012; Black et al., 2014).

O teor de umidade da cama na profundidade de 0,20 m (U_{20}) apresentou variabilidade espacial no verão, com amplitude de 15% (Figura 4.7 c) e, no inverno, com amplitude de 8 % (Figura 4.7 d). O teor médio máximo de U_{20} no inverno estava acima do limiar superior dos padrões recomendados para compostagem ideal (sendo que durante o verão teve variação de 46 - 61 %, e durante o inverno variação de 58-66 %; valores recomendados pela literatura:

40 - 60 %; NRAES-54, 1992). Segundo Bewley e Taraba (2009), se os níveis de umidade forem muito altos, a cama se tornará anaeróbia, a taxa de decomposição microbiana diminuirá e a compostagem será lenta.

Observa-se que a distribuição espacial da U_{20} seguiu a mesma tendência observada na superfície U_{sup} . Durante o inverno, os níveis mais altos de U_{20} ocorreram próximo das placas de resfriamento evaporativo e na região que estava o Lote 2. Durante as duas estações (verão e inverno), os níveis mais altos de U_{20} ocorreram nas regiões próximas ao corredor de alimentação e na região próxima do portão de acesso a cama. Os maiores níveis de U_{20} nestas regiões ocorreram, provavelmente, em decorrência da maior infiltração de água oriunda da superfície da cama e que, conseqüentemente, está relacionada com: elevada densidade animal, excessiva umidade relativa do ar, ineficiência do sistema ventilação e necessidade de mais um revolvimento diário da cama.

Oliveira et al. (2019) avaliaram diferentes instalações CB com laterais abertas, distribuídas no Estado de Minas Gerais, Brasil, sendo que os autores relataram que o teor de umidade da cama encontrado em dois níveis (U_{sup} e U_{20}) foram de $37,5 \pm 5,2$ % e $36,3 \pm 5,3$ %, respectivamente, bem abaixo dos encontrados no presente estudo. Black et al. (2014) observaram teor médio de umidade na cama de instalações CB, no estado de Kentucky, EUA, de $56,1 \pm 12,4$ %. Essas variações do teor de umidade, provavelmente ocorreram devido às diferenças de clima entre os países, tipologia da construção, sistema de ventilação, práticas de manejo e/ou materiais de cama.

Segundo Leso et al. (2020), os produtores devem prestar atenção especial à manutenção da umidade adequada da cama, pois, indica ser este um dos fatores mais importantes no gerenciamento da instalação CB. De acordo com Bewley et al. (2012) e Albino et al. (2017), um dos fatores que interfere na qualidade da cama e manutenção do sistema CB é a taxa de lotação animal pois, quando é distribuída uma alta carga de dejetos em uma estreita área de cama, pode ser criada uma condição de excessiva umidade, expondo os animais a possíveis contaminações, que podem resultar no aumento da incidência de mastite e comprometendo a saúde dos animais.

Por outro lado, durante o verão, os menores teores de U_{20} concentraram-se a partir da região central da região da cama em direção a região do exaustor (face noroeste), com valores próximos de 46 %. Já durante o inverno, os menores teores de U_{20} foram observados na parte central da instalação, com valores próximos a 58 %; ou seja, valores elevados e superiores aos encontrados no verão.

Cabe ressaltar que, mesmo com a reposição constante de cama no sistema, esta operação não foi suficiente para garantir teores adequados de umidade.

Em pesquisa realizada por Yameogo (2020), no mesmo período e na mesma instalação CBF relativa a este estudo, o autor analisou o comportamento dos bovinos de leite e observou que o número de animais em repouso permaneceu constantemente mais alto entre as 16h00 e 06h00. Durante este período descrito, não ocorreu o revolvimento da cama e, devido a maior quantidade de animais sobre a cama, com maior compactação e elevada deposição de fezes e urina, pode ter contribuído para a elevação do teor de umidade. Mais informações sobre o comportamento das vacas nesta instalação CBF pode ser obtida em Yameogo (2020).

Na instalação estudada, o manejo de revolvimento da cama era realizado duas vezes ao dia, com extenso intervalo de tempo entre o segundo revolvimento até o próximo revolvimento da cama do dia seguinte. Portanto, é pertinente considerar o revolvimento da cama mais uma vez ao dia, no período da tarde, para promover maior incorporação de O_2 e possível redução dos altos valores de U_{20} . O revolvimento, quando realizado de forma adequada, favorece a atividade microbiológica, homogeneiza o material e exerce ações físicas de quebra das partículas (Pereira Neto, 2007). A adição de material de cama de qualidade e o revolvimento frequente, para incorporação de fezes e urina, são fatores importantes para fornecer uma superfície seca para manter a limpeza adequada das vacas e reduzir o risco de mastite (Janni et al., 2007; Leso et al., 2020).

Os mapas de krigagem para a variação do pH na superfície (pH_{sup}) ilustraram baixa variabilidade dos dados, sendo que no verão o pH_{sup} teve amplitude de 1,4 (8,7-10,1, Figura 4.7 e), e no inverno amplitude de 0,5 (8,8-9,3, Figura 4.7 f). A distribuição espacial do pH na profundidade de 0,20 m (pH_{20}) indicaram baixa variabilidade, sendo que, no verão, apresentou amplitude de 1,3 (faixa de 8,7 - 10,0, Figura 4.7g), e no inverno amplitude de 0,21 (faixa de 8,8 - 9,1, Figura 4.7h). O comportamento espacial do pH_{20} foi semelhante ao pH_{sup} , o que permite inferir que a distribuição dessa variável tende a seguir a mesma forma de distribuição entre as duas camadas analisadas.

De acordo com a NRAES-54 (1992), durante o processo de compostagem o pH ideal deve estar entre 6,5 a 8,0. No entanto, Rodrigues et al. (2006) enfatizam a faixa de pH considerada ótima para crescimento microbiano como sendo de 5,5 a 8,5.

No presente experimento, foi observado que, em toda região da cama, os valores encontrados estão acima do nível recomendado pela literatura para compostagem ideal, sendo que, durante o verão, foram verificadas regiões com valores superiores a 10, semelhante aos resultados obtidos por Piovesan e Oliveira (2020), em instalação CB com laterais abertas.

Fato que pode ser atribuído ao maior tempo de utilização da cama, proporcionando maior incorporação de nitrogênio ao material, causando a elevação do pH a níveis alcalinos.

Fávero et al. (2015a) comentaram sobre a possibilidade dos níveis de pH alcalino encontrados (média geral > 8,8 para todas às instalações CB) levarem a inibição do crescimento de patógenos de mastite ambientais, o que é benéfico.

Alguns trabalhos desenvolvidos em instalações CB tiveram como resultados pH médio na camada interna da cama entre 8,4 a 8,6, no estado de Minnesota, EUA (Barbeg et al., 2007a) e 8,0 a 9,5 no estado de MG, Brasil (Oliveira et a., 2019). Para ambos os estudos, os valores de pH também estiveram ligeiramente acima do recomendado, sugerindo a dificuldade no controle do pH da cama, neste sistema de produção de bovinos de leite.

4.3.3 Análise química do material de compostagem

Na Tabela 4.4 encontram-se apresentados a média, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo do teor de nutrientes em quatro regiões da cama (A, B, C e D), obtidas da instalação CBF, durante as estações de verão e inverno.

Tabela 4.4 - Média, desvio padrão (DP), valores mínimos e máximos para o teor de nutrientes em 4 diferentes regiões da cama em instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), localizada em região tropical e subtropical do Brasil, durante as estações de verão e inverno.

Variável	Região	Média	DP	Mínimo	Máximo
Inverno					
Nitrogênio Total (N) (%)	A	1,62	0,13	1,47	1,71
	B	1,58	0,14	1,47	1,65
	C	1,57	0,22	1,43	1,81
	D	1,57	0,20	1,35	1,74
	Média de toda a cama	1,58	0,17	1,43	1,74
Fósforo (P) (%)	A	0,21	0,06	0,14	0,25
	B	0,21	0,06	0,13	0,25
	C	0,22	0,07	0,15	0,27
	D	0,26	0,08	0,17	0,31
	Média de toda a cama	0,23	0,07	0,15	0,27
Potássio (K) (%)	A	2,32	0,59	1,64	2,72
	B	2,25	0,64	1,52	2,68
	C	2,05	0,58	1,4	2,48
	D	1,94	0,58	1,28	2,36
	Média de toda a cama	2,14	0,60	1,46	2,56

Continua...

Tabela 4.4 - Média, desvio padrão (DP), valores mínimos e máximos para o teor de nutrientes em 4 diferentes regiões da cama em instalação *Compost Barn* Fechada (CBF), localizada em região tropical e subtropical do Brasil, durante as estações de verão e inverno.

Variável	Região	Média	DP	Mínimo	Máximo
Inverno					
Carbono Total (C) (%)	A	24,75	8,39	15,76	32,37
	B	26,36	8,81	16,92	32,06
	C	24,77	7,06	16,92	30,42
	D	24,69	7,13	16,92	30,89
	Média de toda a cama	25,14	7,85	16,63	31,44
C:N	A	15,13	4,12	10,75	18,92
	B	16,61	5,37	11,51	19,77
	C	15,79	3,70	11,68	18,86
	D	15,58	3,29	12,58	19,01
	Média de toda a cama	15,78	4,12	11,63	19,14
Verão					
Nitrogênio Total (N) (%)	A	1,18	0,04	1,1	1,32
	B	1,08	0,02	1,02	1,16
	C	1,18	0,08	1,12	1,28
	D	1,35	0,23	1,22	1,52
	Média de toda a cama	1,20	0,09	1,12	1,32
Fósforo (P) (%)	A	0,26	0,02	0,19	0,36
	B	0,23	0,01	0,18	0,29
	C	0,27	0,00	0,2	0,32
	D	0,31	0,08	0,24	0,4
	Média de toda a cama	0,27	0,03	0,20	0,34
Potássio (K) (%)	A	1,88	0,17	1,74	2,04
	B	1,80	0,17	1,62	1,98
	C	1,64	0,17	1,48	1,82
	D	2,36	0,17	2,18	2,56
	Média de toda a cama	1,92	0,17	1,76	2,10
Carbono Total (C) (%)	A	18,25	0,44	17,54	18,92
	B	18,88	0,88	18,24	19,62
	C	18,24	0,46	17,82	18,6
	D	16,77	0,55	16,34	17,2
	Média de toda a cama	18,04	0,58	17,49	18,59
C:N	A	15,53	0,60	15,30	15,71
	B	17,57	1,17	16,72	18,44
	C	15,54	0,64	15,02	16,00
	D	12,69	2,62	10,82	14,54
	Média de toda a cama	15,33	1,13	14,46	16,17

Os dados não variaram significativamente (teste t-pareado, $P > 0,5$) nas duas profundidades (superfície e 0,20 m de profundidade) de cada região analisada, então as profundidades foram combinadas.

De forma geral observa-se que o teor de nutrientes foi similares entre as quatro regiões da instalação CBF analisada. A média do C total do material de compostagem cama, durante o inverno, foi de 25,14%, com variação de 16,63 % a 31,44 %. Durante o verão, teve média de 18,04 % com variação de 17,49 % a 18,59 %. A média do C total do material de compostagem cama, durante o inverno foi mais abundante, quando comparado ao verão. Shane et al. (2010) relataram um intervalo de C de 12,7 % a 20,1 % durante o inverno e 15,3 % a 17,4 % durante verão, em seis instalações CB em Minnesota, EUA, coletados em duas profundidades diferentes.

A média do N total do material de compostagem cama, durante o inverno foi de 1,58 % com variação de 1,43 % a 1,74 %; e durante o verão teve média de 1,20 % com variação de 1,12 % a 1,32 %. Barbeg et al. (2007a) observaram que o N total médio do material de cama em 12 instalações CB em Minnesota, EUA, era de 2,54 % com uma variação de 0,57 % a 4,22 %.

O P médio durante o inverno foi de 0,23 % com variação de 0,15 % a 0,27 %, e durante o verão o P médio foi 0,27 com variação de 0,20 % a 0,34 %. O K médio durante o inverno foi de 2,14 % com variação de um intervalo de 1,46 % a 2,56 %; e durante o verão o K médio foi de 1,92 % com variação de 1,76 % a 2,10 %.

Durante o inverno, a relação C:N variou de 11,63 a 19,14, com média de $15,78 \pm 4,12$, e durante o verão a relação C:N variou de 14,46 a 16,17, com média de $15,33 \pm 1,33$. De forma geral, observa-se para as duas estações, que a região B da cama apresentou média de C:N levemente superior as demais regiões. A relação C:N quando se encontra na faixa de 25-30:1, representa o momento de máxima compostagem dos nutrientes pelos microrganismos (NRAES-54, 1992). A razão C:N média no estudo atual manteve-se fora da faixa recomendada para a compostagem ideal, durante as duas estações. Observou-se no presente estudo pouca variação de C:N entre as duas estações. Como o N é constantemente adicionado na cama pelos dejetos animais, e a principal fonte de C é a nova cama, a disponibilidade de C para os microrganismos torna-se mais limitada e a relação C:N diminui à medida que a cama fica mais velha (Fávero et al., 2015a). Uma relação C:N abaixo de 25:1 na cama pode influenciar a concentração de amônia no interior das instalações CB, além de facilitar a emissão dos odores característicos desse gás no ambiente (Rosen et al., 2000).

Uma razão aproximada de C:N de 30:1 normalmente garante que outros nutrientes necessários para a sobrevivência dos microrganismos estejam presentes em quantidades adequadas (Damasceno, 2020). Durante o processo de compostagem, a relação C:N diminui à medida que a compostagem progride, devido à conversão de C em CO₂, ao mesmo tempo, parte do N pode ser perdida na forma de amônia NH₃ (Beffa, 2002).

Danieli (2019) verificou que a relação C:N variou entre 20,0 e 35,4 no inverno e 10,8 e 15,9 no verão, em instalação CB localizada na região subtropical do Brasil. Barberg et al. (2007a) encontraram a relação de C:N com média de $19,5 \pm 7,8$, em instalação CB localizada em Minnesota, EUA. Black et al. (2014) observaram a relação média de C:N de $26,7 \pm 7,8$ foi, com variação de 11,3 a 43,2, em instalações CB em Kentucky (EUA). Shane et al. (2010) relataram que a relação C:N variou de 16 a 26 durante o inverno e de 13 a 18 durante o verão. Para grande parte dos estudos, os valores da relação C:N também estiveram abaixo do recomendado, sugerindo a dificuldade no controle da cama, neste tipo de instalação.

4.3.4 Indicadores de bem-estar

4.3.4.1 Escore de Sujidade

Na Figura 4.8 são apresentados os escores de sujidade de vacas em lactação alojadas em instalação CBF, para as estações de verão e inverno. Não houve diferença estatística ($P = 0,092$) entre os escores observados no verão e inverno.

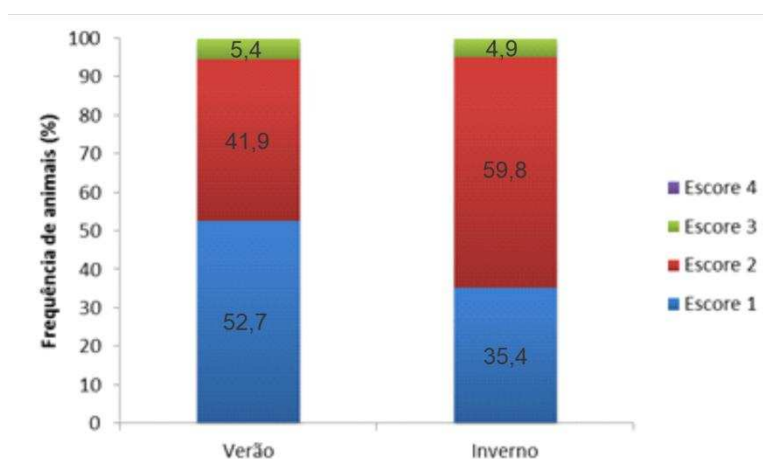


Figura 4.8 - Frequência de escore de sujidade de vacas em lactação (%) alojadas em instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período de verão e inverno. Não foram significativamente diferentes entre as estações (teste de Wilcoxon, $P=0,092$). Escore 1=limpo, Escore 2 = pouco sujo, Escore 3 =moderadamente sujo, Escore 4 = muito sujo.

Durante o verão, a frequência de animais (%) foi mais elevada no escore 1 (sem sujeira) e escore 2 (2 a 10% de sujidade), e representou que 52,7% das vacas permaneceram limpas e 41,9% com escore pouco sujo, respectivamente. Durante o inverno, a frequência de animais no escore 2 (pouco sujo) foi mais elevada, com 59,8% dos animais, e seguido do escore 1, com 35,4% dos animais. Durante as estações avaliadas, não houve incidência de animais com escore 4 (mais de 30% de sujidade), sendo este o escore mais grave para essa variável.

Durante o inverno, a predominância de vacas no escore 2 foi levemente superior ao escore 1 encontrado durante o verão, possivelmente devido o maior teor de umidade da cama encontrado nesta estação. Porém, cabe ressaltar que a reposição de cama era constante para atenuar os valores de umidade e a troca de toda a cama tem sido realizada a cada seis meses, o que pode ter contribuído para os baixos escores encontrados.

Os escores de sujidade encontrados estão de acordo com os observados por Biasato et al. (2019) e Eckelkamp et al. (2016a) em instalações CB, que relataram pontuações gerais de escore de sujidade com média $1,95 \pm 0,09$ e $2,19 \pm 0,05$, respectivamente. Contudo, quando comparado com alguns estudos anteriores realizados em instalações CB, as pontuações de escore de sujidade registradas deste estudo foram melhores. Shane et al. (2010) relataram o escore médio de sujidade do rebanho de 3,1 (variação de 2,2-3,8), utilizando diferentes materiais de cama. Fávero et al. (2015a), em estudo realizado em instalações CB, no estado de São Paulo, Brasil, observaram que as médias gerais dos escores de higiene foram menores que 2,1 (pontuação de 1 = limpa a 4 = muito suja). De acordo com os autores, devido às condições climáticas brasileiras, entre as estações, não serem tão extremas como na América do Norte, as vacas permaneceram em excelentes condições higiênicas durante todo o ano estudado.

De acordo com Albino et al. (2017), deve-se atenção a umidade da cama presente nesse sistema, pois é a principal fonte de exposição para os patógenos ambientais de mastite, o escore de sujidade fornece evidências visíveis de exposição a essas potenciais fontes. Black et al. (2013) observaram que em instalação CB a interação entre temperatura ambiente e umidade da cama afetaram significativamente a higiene média do rebanho ($P < 0,01$), quando a umidade era alta e a temperatura ambiente era alta ou baixa, as pontuações médias de higiene do rebanho aumentaram.

4.3.4.2 Escore de Claudicação

Na Figura 4.9 são apresentados os escores de locomoção para as vacas em lactação alojadas em instalação CBF, para as estações de verão e inverno. Houve diferença estatística ($P < 0,05$) entre os escores observados no verão e inverno.

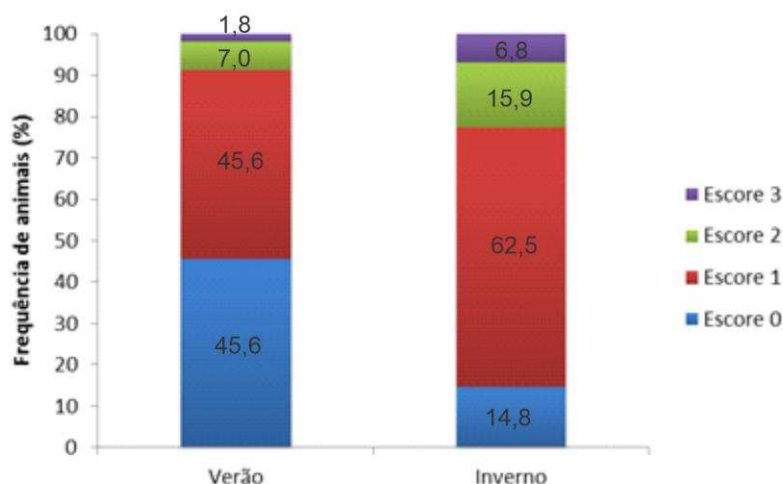


Figura 4.9 - Frequência de escore de locomoção de vacas em lactação (%) alojadas em instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), durante o período de verão e inverno. Foram significativamente diferentes entre as estações (teste de Wilcoxon, $P < 0,05$). Escore 0 = Locomoção normal; Escore 1 = Claudicação leve; Escore 2 = Claudicação moderada; Escore 3 = Claudicação grave.

Durante o verão, as vacas apresentaram maior frequência de pontuação nos escores 0 (locomoção normal) e 1 (claudicação leve), e representaram a mesma frequência de 45,6%. No inverno, a frequência de animais no escore 1 foi mais elevada, com 62,5 % dos animais, e seguido do escore 2, com 15,9 %. Durante as estações avaliadas, a incidência de animais com escore 3 (claudicação grave) teve frequência mais baixa, e representou 1,8 % dos animais para o verão, e 6,8 % dos animais para o inverno. Nota-se que os escores foram levemente mais elevados durante o inverno. Na região da cama, a superfície de caminhada macia, com alta tração e facilidade de mobilidade podem ter reduzido à prevalência de claudicação grave neste estudo.

Pesquisadores de Nova York (Petzen et al., 2009) averiguaram o conforto de vacas em lactação e a condição de pernas e casco alojadas em instalação CB em agosto de 2007, e então novamente no ano seguinte, em agosto de 2008. Os autores observaram que em 2007, a média da pontuação de escore de locomoção era de 1,8, após um ano com a utilização da instalação CB a pontuação média de locomoção diminuiu significativamente para 1,3 ($P < 0,0001$).

Portanto, o uso da cama do sistema CB ajudou a melhorar a mobilidade dos animais, e apresentou valores semelhantes ao do presente estudo.

Bran et al. (2019) conduziram um estudo em diferentes instalações CB e FS localizadas no sul do Brasil, com o intuito de investigar os fatores associados à claudicação em vacas leiteiras. Os autores observaram que fazendas que utilizavam baias com base de colchões apresentaram maior prevalência de claudicação do que fazendas que utilizam cama de compostagem, e ainda, que as vacas severamente coxas apresentaram menor produção de leite (em média $1,3 \text{ kg dia}^{-1}$) do que as vacas não coxas.

Contudo, Lobeck et al. (2011), enfatiza que embora as vacas alojadas em instalações CB tenham melhor saúde de pernas e casco, conforme indicado pela redução da prevalência de claudicação e lesão nos jarretes, adquirir quantidade suficiente de material para cama e o seu manejo adequado pode ser limitante para esse tipo de edificação.

A ampla utilização desse método de caracterização de saúde dos animais representa uma das muitas maneiras úteis de monitorar a saúde animal e fornece evidências necessárias de ser uma avaliação confiável. Diversas pesquisas utilizando essas avaliações têm sido desenvolvidas em instalações CB como um dos métodos de avaliação de bem-estar (Shane et al., 2010; Eckelkamp et al., 2016a; Bran et al., 2019).

4.3.5 Produção de leite

Na Figura 4.10 está ilustrada a produção média de leite (kg leite dia^{-1}) e desvio padrão no mês de dezembro de 2018 e julho de 2019, considerando os dados médios referentes ao Lote 1 (70% do plantel), de maior produção de leite; e os dados médios de produção total de leite (todo plantel, Lote 1 e Lote 2), de vacas Holandesas, alojadas em instalação CBF. Não houve diferença estatística (teste t, $P > 0,05$) para as médias de produção observadas para todo o plantel, durante o verão e inverno. O mesmo também foi observado para a média de produção de leite referente somente ao Lote 1 de maior produção (70% do plantel), não ocorrendo diferença estatística entre as estações de verão e inverno (teste t, $P > 0,05$).

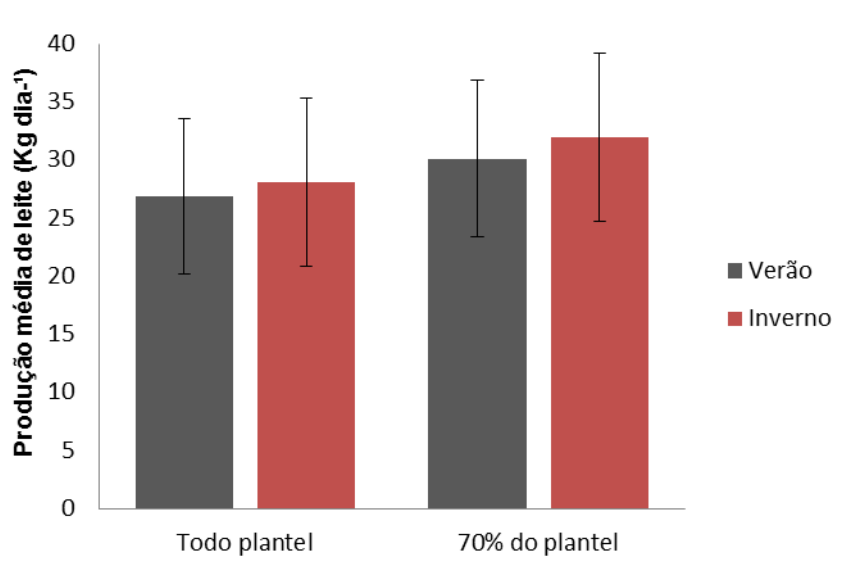


Figura 4.10 - Produção média de leite (kg leite dia⁻¹) e desvio padrão obtidos no mês de dezembro de 2018 e julho de 2019, considerando os dados médios referentes ao Lote 1 de maior produção de leite (70% do plantel) e a produção total do Lote 1 e Lote 2; de vacas Holandesas alojadas em instalação *Compost Barn Fechada* (CBF), na região da Zona da Mata, no estado de Minas Gerais, Brasil. Não foram significativamente diferentes entre as estações (teste t, $P > 0,05$).

Ao considerar todo o plantel de bovinos de leite (Lote 1 e Lote 2), durante o inverno, observou-se que a média de produção de leite foi de $28,1 \pm 7,2$ kg leite dia⁻¹, e durante o verão foi de $26,9 \pm 6,7$ kg leite dia⁻¹. O mesmo ocorreu para a produção de leite referente ao Lote 1 (70% do plantel) com média levemente superior no inverno ($31,9 \pm 5,3$ kg leite dia⁻¹) quando comparada ao verão ($30,1 \pm 5,0$ kg leite dia⁻¹), sendo que para os produtores essa produção ficou abaixo do esperado para o valor investido.

Os resultados indicaram certa estabilidade de produção entre as estações, no interior da instalação CBF. Provavelmente, o sistema de climatização utilizado, que tende a apresentar maior controle do ambiente térmico, pode ser um dos fatores que contribuiu para a estabilidade de produção média de leite. Cabe ressaltar que, a produção de leite é atribuída a diversos fatores, como a alimentação do animal, melhor gestão, genética do rebanho e bem-estar animal das instalações.

Balcells et al. (2020) em estudo desenvolvido em instalações CB e FS no nordeste da Espanha observaram que a estação do ano teve um efeito significativo no desempenho do rebanho, sendo que a maior produção de leite ($34,6$ vs. $31,3$ kg dia⁻¹ de produção de leite; $P < 0,05$) foi observada durante fevereiro a maio, quando comparada aos meses de agosto a novembro. De acordo com os autores seria em decorrência da iluminação mais longa durante

este período e temperaturas ambientes mais baixas, embora a composição do leite e a eficiência alimentar ($P > 0,05$) não tenha sido alterada com a estação.

4.4 CONCLUSÕES

De acordo com o experimento e a metodologia empregada, pode-se concluir que:

A análise geoestatística apresentou-se como ferramenta eficiente para caracterizar a magnitude da variabilidade espacial das variáveis da cama, temperatura superficial (t_{sup}), temperatura na profundidade de 0,20 m (t_{20}), umidade superficial (U_{sup}), umidade a 0,20 m de profundidade (U_{20}), pH na superfície (pH_{sup}) e pH a 0,20 m de profundidade (pH_{20}), em um sistema *Compost Barn* fechado (CBF) e foi verificado a predominância de forte e moderada dependência espacial.

Através dos mapas de krigagem foi possível observar que as áreas da instalação influenciaram na distribuição espacial das variáveis t_{sup} , t_{20} , U_{sup} , U_{20} , e mostraram condições críticas do material de compostagem nas regiões periféricas da cama, sendo estas, próximo das placas de resfriamento evaporativo, próximo do corredor de alimentação e na região com maior densidade animal.

Os resultados também indicaram valores de t_{sup} mais altos no verão, sugerindo certo desconforto térmico para os animais. Contudo, durante o inverno, a t_{sup} ficou dentro da faixa de conforto esperada. Durante o verão e inverno, os valores médios de T_{20} , U_{sup} e U_{20} foram inferiores aos recomendados para a compostagem ideal. Os valores de pH_{sup} e pH_{20} ficaram acima do recomendado para ambas as estações.

Possivelmente, os fatores do ambiente térmico da instalação como um todo, por efeito da disposição dos exaustores, distanciamento dos painéis evaporativos, influência dos paramentos verticais do fechamento da instalação (materiais não isolantes), maior influência do ambiente externo nas laterais da instalação, tiveram influência na distribuição espacial das características da cama.

A elevada densidade animal repercutiu expressivamente na piora do teor de umidade e temperatura interna na cama, representando um dos principais entraves para o sucesso desse tipo de instalação. Como melhor estratégia para o funcionamento desse tipo de sistema com ventilação em túnel, deve-se adotar maior área de cama por animal (superior a $10 \text{ m}^2 \text{ vaca}^{-1}$).

A razão C:N manteve-se fora da faixa recomendada para a compostagem ideal, em ambas as estações (sendo esta entendida pela literatura no intervalo de 25-30:1). Durante o verão e inverno, os valores das características da cama indicaram que o composto não se

encontrava em condições ideais para ocorrência de compostagem plena, no entanto, a camada interna aerada apresentou-se biologicamente ativa.

Verificou-se que o sistema fechado e climatizado requer a reposição constante de material de cama, contudo, ainda assim, a cama se apresentava com elevado teor de umidade em curto prazo de reposição.

Em geral, as vacas leiteiras mostraram uma adequada pontuação para o escore de sujidade e locomoção para as duas estações climáticas avaliadas. Entre as estações, houve diferença significativa ($P < 0,5$) apenas para o escore de locomoção, com valores mais elevados durante o inverno.

Para a produção de leite, não ocorreu diferença estatística entre as estações de verão e inverno ($P > 0,05$). A produção média de leite (considerando todo o plantel de bovinos), durante o inverno foi de $28,1 \pm 7,2$ kg leite dia⁻¹, e no verão de $26,9 \pm 6,7$ kg leite dia⁻¹.

Pode-se, com base nos resultados obtidos, traçar estratégias para o melhoramento na tipologia construtiva da edificação, no sistema de ventilação utilizado, bem como no manejo da cama, com o intuito de minimizar a variabilidade e melhorar as características do material de compostagem.

Pesquisas adicionais são necessárias para abordar o custo de produção e análise da rentabilidade da instalação CBF, abrangendo aspectos de consumo energético e materiais alternativos de cama.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albino, R. L., Taraba, J. L., Marcondes, M. I., Eckelkamp, E. A., Bewley, J. M. Comparison of bacterial populations in bedding material, on teat ends, and in milk of cows housed in compost bedded pack barns. **Animal Production Science**, v. 58, n. 9, p. 1686-1691, 2018.
- Almeida, G. L., Pandorfi, H., Barbosa, S. B., Pereira, D. F., Guiselini, C., Almeida, G. A. Comportamento, produção e qualidade do leite de vacas Holandês-Gir com climatização no curral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, p. 892-899, 2013.
- AOAC International. 2010. Official Methods of Analysis. in 18th ed. AOAC International, Arlington, VA.
- Baêta, F. C.; Souza, C.F. **Ambiência em edificações rurais: conforto ambiental**. 2. ed. Viçosa, Brasil: Editora UFV, 2010. 269 p.

- Barker, Z. E.; Leach, K. A.; Whay, H. R.; Bell, N. J.; Main, D. C. J. Assessment of lameness prevalence and associated risk factors in dairy herds in England and Wales. **Journal of dairy science**, v. 93, n. 3, p. 932-941, 2010.
- Balcells, J.; Fuertes, E.; Seradj, A. R.; Maynegre, J.; Villalba, D., de la Fuente, G. Study of nitrogen fluxes across conventional solid floor cubicle and compost-bedded pack housing systems in dairy cattle barns located in the Mediterranean area: Effects of seasonal variation. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 11, p. 10882-10897, 2020.
- Barberg, A. E.; Endres, M. I.; Janni, K. A. Compost dairy barns in Minnesota: A descriptive study. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 2, p. 231-238, 2007a.
- Barberg, A. E.; Endres, M. I.; Salfer, J.A.; Reneau, J. K. Performance and welfare of dairy cows in an alternative housing system in Minnesota. **Journal of dairy science**, v. 90, n. 3, p. 1575-1583, 2007b.
- Beffa, T. The composting biotechnology: a microbial aerobic solid substrate fermentation complex process. **The composting process and management**, p. 1-30, 2002.
- Blanco-Penedo, I.; Ouweltjes, W.; Ofner-Schröck, E.; Brügemann, K.; Emanuelson, U. Symposium review: Animal welfare in free-walk systems in Europe. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 6, p. 5773-5782, 2020.
- Bran, J.A.; Costa, J. H. C.; von Keyserlingk, M. A. G.; Hötzel, M. J. Factors associated with lameness prevalence in lactating cows housed in freestall and compost-bedded pack dairy farms in southern Brazil. **Preventive veterinary medicine**, v. 172, p. 104773, 2019.
- Bewley, J. M.; Robertson, L. M.; Eckelkamp, E.A. 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of dairy science**, v. 100, n. 12, p. 10418-10431, 2017.
- Bewley, J. M.; Taraba, J. L. Understanding Bedding materials for Compost Bedded Pack Barn. **Cooperative extension service, University of Kentucky, College of agriculture, Kentucky Dairy Notes, (859)**, p. 257-7543, 2009.
- Bewley, J. M.; Taraba, J. L.; Day, G. B.; Black, R.; Damasceno, F. Compost bedded pack barn design features and management considerations. **Cooperative Extension Publ. ID-206, Cooperative Extension Service, University of Kentucky College of Agriculture, Lexington KY**, 2012.
- Bewley, J. M.; Taraba, J. L.; McFarland, D.; Garrett, P.; Graves, R.; Holmes, B.; Kammel, D.; Porter, J.; Tyson, J.; Weeks, S.; Wright, P. **Guidelines for Managing Compost Bedded-Pack Barns**. The Dairy Practices Council, 2013.
- Biasato, I.; D'Angelo, A.; Bertone, I.; Odore, R.; Bellino, C. Compost bedded-pack barn as an alternative housing system for dairy cattle in Italy: effects on animal health and welfare

- and milk and milk product quality. **Italian Journal of Animal Science**, v. 18, n. 1, p. 1142-1153, 2019.
- Black, R. A.; Taraba, J. L.; Day, G. B.; Damasceno, F. A.; Bewley, J. M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 12, p. 8060-8074, 2013.
- Black, R. A.; Taraba, J. L.; Day, G. B., Damasceno, F. A., Newman, M. C.; Akers, K. A.; Wood, C. L.; McQuerry, K. J.; Bewley, J. M. The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of dairy science**, v. 97, n. 5, p. 2669-2679, 2014.
- Burgstaller, J.; Raith, J.; Kuchling, S.; Mandl, V.; Hund, A.; Kofler, J. Claw health and prevalence of lameness in cows from compost bedded and cubicle freestall dairy barns in Austria. **The Veterinary Journal**, v. 216, p. 81-86, 2016.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- Castro Júnior, S. L.; Silva, I. J. O. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International Journal of Biometeorology**, p. 1-13, 2020.
- Damasceno, F.A. **Compost Barn como alternativa para a pecuária leiteira**. 1. ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396 p.
- Damasceno, F. A.; Oliveira, C. E. A.; Ferraz, G. A. S.; Nascimento, J. A. C.; Barbari, M.; Ferraz, P. F. P. Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, v. 17, n. 2, p. 385-395, 2019.
- Damasceno, J. C.; Júnior, F. B.; Targa, L. A., Respostas comportamentais de vacas holandesas, com acesso à sombra constante ou limitada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 709-715, 1999.
- Eckelkamp, E. A.; Taraba, J. L.; Akers, K. A.; Harmon, R. J.; Bewley, J. M. Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, v. 190, p. 35-42, 2016a.
- Eckelkamp, E. A.; Taraba, J. L.; Akers, K. A.; Harmon, R. J.; Bewley, J. M. Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow hygiene, locomotion, and mastitis indicators. **Livestock Science**, v. 190, p. 48-57, 2016b.
- Fávero, S.; Portilho, F. V. R.; Oliveira, A. C. R.; Langoni, H.; Pantoja, J. C. F. Factors associated with mastitis epidemiologic indexes, animal hygiene, and bulk milk bacterial

- concentrations in dairy herds housed on compost bedding. **Livestock Science**, v. 181, p. 220-230, 2015a.
- Favero, S.; Portilho, F. V. R.; Oliveira, A. C. R.; Langoni, H.; Pantoja, J. C. F. Longitudinal trends and associations between compost bedding characteristics and bedding bacterial concentrations. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 7, n. 10, p. 58-70, 2015b.
- Fernández, A.; Mainau, E.; Manteca, X.; Siurana, A.; Castillejos, L. Impacts of compost bedded pack barns on the welfare and comfort of dairy cows. **Animals**, v. 10, n. 3, p. 431, 2020.
- Ferraz, P.F., Yanagi Junior, T., Schiassi, L., Ferraz, G.A.S., Campos, A.T. Spatial variability of enthalpy in broiler house during the heating phase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 570-575, 2016.
- Fregonesi, M. A. G.; von Keyserlingk, M. A. G.; Weary, D. M. Cow preference and usage of free stalls compared with an open pack area. **Journal of dairy science**, v. 92, n. 11, p. 5497-5502, 2009.
- Guesine. G. D. **Sistema compost barn para bovinos leiteiros e seus reflexos nos parâmetros ambientais, desempenho e produção durante o verão em diferentes fases da lactação**. 2020. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.
- Janni, K. A.; Endres, M. I., Reneau, J. K.; Schoper, W. W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied engineering in agriculture**, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.
- Leso, L.; Barbari, M.; Lopes, M. A.; Damasceno, F.A.; Galama, P.; Taraba, J.L.; Kuipers, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of dairy science**, v. 103, n. 2, p. 1072-1099, 2020.
- Leso, L.; Uberti, M.; Morshed, W.; Barbari, M. A survey of Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 44, n. 3, p. e17-e17, 2013.
- Little, T.M, Hills, F. J. 1978. *Agricultural experimentation: design and analysis*. J. Wiley. New York.
- Llonch, L.; Castillejos, L.; Mainau, E.; Manteca, X.; Ferret, A. Effect of forest biomass as bedding material on compost-bedded pack performance, microbial content, and behavior of nonlactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 11, p. 10676-10688, 2020.

- Lobeck, K. M.; Endres, M. I.; Shane, E. M.; Godden, S. M.; Fetrow, J. Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 11, p. 5469-5479, 2011.
- Marchant, B.P., Lark, R.M. Robust estimation of the variogram by residual maximum likelihood. **Geoderma**, v. 140, n. 1-2, p. 62-72, 2007.
- Matheron, G. **Treaty of applied geostatistics**. Vol. I: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, n. 14, Editions Technip, Paris, 1962. 333 p.
- Melo, L. D. **Moisture control methodology for gas phase compost biofilters**. 2011. 182p. Thesis (Doctorate in Biosystems and Agricultural Engineering) - University of Kentucky, Kentucky, United States of America - USA.
- Miragliotta, M.Y.; Nääs, I. D. A.; Manzione, R. L.; Nascimento, F. F. Spatial analysis of stress conditions inside broiler house under tunnel ventilation. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 426-432, 2006.
- Mondaca, M. R.; Choi, C. Y.; Cook, N. B. Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: Examination using computational fluid dynamics and experimental validation. **Biosystems engineering**, v. 183, p. 70-84, 2019.
- Mota, V. C.; Campos, A. T.; Damasceno, F.A.; Resende, E.A. de M., Rezende, C.P. do A.; Abreu, L.R. de, Vareiro, T. Confinamento para bovinos leiteiros: Histórico e características. **Pubvet**, v. 11, p. 424-537, 2017.
- NRAES (Northeast Regional Agricultural Engineering Service). **On-Farm Composting Handbook**. NRAES-54. NRAES, Ithaca, NY, 1992.
- Oliveira, V.C.; Damasceno, F. A.; Oliveira, C. E. A.; Ferraz, P. F. P.; Ferraz, G. A. S.; Saraz, J. A. O. Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: Architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, v. 17, n. 5, p.2016–2028, 2019b.
- Thermoregulatory behavior of dairy cows submitted to bedding temperature variations in Compost barn systems. **Biological Rhythm Research**, p. 1-10, 2019.
- Pereira, M. R. **Avaliação do comportamento e do bem-estar de vacas criadas em sistema *compost barn* em condições tropicais**. 2017. 78 f. Dissertação (Ciências Veterinárias) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2017.
- Pereira Neto, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 81 p.
- Petzen, J.; Wolfanger, C.; Bonhotal, J.; Schwarz, M.; Terry, Timothy; Youngers, N. **Case study: Eagleview compost dairy barn**. **Cornell Cooperative Extension of Wyoming**

- County**, Warsaw, NY. 2009. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1813/44658>>. Acesso em: 15 janeiro 2021.
- Pilatti, J.A.; Vieira, F. M. C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 5, n. 3, p. 97-105, 2017.
- Piovesan, S. M.; Oliveira, D. D. S. Fatores que influenciam a sanidade e conforto térmico de bovinos em sistemas compost barn. **Vivências**, v. 16, n. 30, p. 247-258, 2020.
- R: a language and environment for statistical computing. <http://www.R-project.org/>. (Acesso: 16 abril de 2020).
- Rodrigues, M. S.; Silva, F. D.; Barreira, L. P.; Kovacs, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. **Spadotto, CA; Ribeiro, W. Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, p. 63-94, 2006.
- Roefeldt, S. You can't afford to ignore heat stress. **Dairy Herd Management**, v. 35, p. 6-12, 1998.
- Rosen, C.; Halback, T. R.; Mugaas, R. **Composting and mulching: A guide to managing organic yard waste**. University of Minnesota Extension Publication. St. Paul, Minnesota. 2000. Disponível em: <<https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/54827/1/3296.pdf>>. Acesso em: 06 janeiro 2021.
- Ribeiro Junior P. J.; Diggle P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, p. 14-18, 2001.
- Schreiner, D.A.; Ruegg, P.L. Effects of tail docking on milk quality and cow cleanliness. **Journal of Dairy Science**, v. 85, n. 10, p. 2503-2511, 2002.
- Shane, E. M.; Endres, M. I.; Janni, K.A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied engineering in agriculture**, v. 26, n. 3, p. 465-473, 2010.
- Silva, M. V.; Pandorfi, H.; Almeida, G.L.P.; Jardim, A. M. R. F.; Batista, P. H. D., Silva, R. A. B.; Lopes, I.; Oliveira, M. E. G.; Silva, J. L. B.; Moraes, A. S. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v. 94, p. 102782, 2020.
- Silva, N. R. S.; Martins, S. V.; Meira Neto, J. A. A.; Souza, A. L. D. Composição florística e estrutura de uma floresta estacional semidecidual montana em Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p. 397-405, 2004.

- Smith, T. R.; Chapa, A.; Willard, S.; Herndon Jr, C.; Williams, R. J.; Crouch, J.; Riley, T.; Pogue, D. Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the southeast. II: Impact on lactation performance. **Journal of dairy science**, v. 89, n. 10, p. 3915-3923, 2006.
- Tedesco, J. M.; Gianello, C.; Bissani, C. A. Bohnen, H.; Volkweiss, S. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de solos da faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995. 174 p.
- Teixeira P. C., Donagemma G. K. Fontana A. & Teixeira W. G., 2017. Manual de métodos de análise de solo. Brasília: Embrapa, 743 p
- Tinôco, I. F. F. **Efeito de diferentes sistemas de acondicionamento de ambiente e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, e condições de verão e outono**. 1996. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- Vieira, S. R. 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53, 2000.
- Vieira, S. R.; Carvalho, J. R. P. D.; González, A. P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v. 69, p. 97-105, 2010.
- Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. **Application of soil physics**, p. 319-344, 1980.
- Yameogo, B. 2020. Comparison between two different typologies of compost-bedded pack barns for dairy cows in Brazil. MSc. Dissertation. Agricultural Sciences and Technologies. University of Firenze. 88p.
- Yanagi Júnior, T.; Amaral, A. G. D.; Teixeira, V. H.; Lima, R. R. D. Caracterização espacial do ambiente termoacústico e de iluminância em galpão comercial para criação de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 1-12, 2011.
- Zhao, S.; Liu, X.; Duo, L. Physical and Chemical Characterization of Municipal Solid Waste Compost in Different Particle Size Fractions. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 21, n. 2, 2012.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1. Característica dos materiais de compostagem em quatro diferentes regiões da cama (A, B, C e D), obtidas durante o verão, no interior da instalação *Compost Barn* fechada.

Região	Ca (%)	Mg (%)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)	S (%)	Na (ppm)
A	0,41	0,21	59,20	4971,2	137,60	32,3	45,05	0,40	0,11
B	0,36	0,17	49,20	8583,2	137,20	36,15	42,25	0,42	0,10
C	0,40	0,18	56,80	9635,2	128,40	43,55	45,25	0,50	0,11
D	0,54	0,20	64,80	9839,2	127,20	51,75	43,5	0,53	0,17
Média	0,42	0,19	57,50	8257,2	132,6	40,94	44,01	0,46	0,12
DP	0,08	0,02	6,47	2258,7	5,6	8,59	1,41	0,07	0,03

5. CONCLUSÃO GERAL E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir dos resultados foi possível observar a variabilidade dos dados térmico-ambientais no interior da instalação *Compost Barn* fechada, ocorrendo zonas de estresse por calor. Durante as tardes de verão, toda a região da instalação *Compost Barn* fechada apresentou-se em situação de desconforto. Contudo, durante o inverno, os dados ambientais mensurados permaneceram dentro da zona de conforto ao longo de toda instalação, em todos os períodos dos dias analisados.

A distribuição da velocidade do ar ao longo de toda a área interior da instalação *Compost Barn* fechada permaneceu abaixo dos valores recomendados pela literatura, indicando problemas no dimensionamento do sistema de ventilação, e a possibilidade de se promover maior intensificação do sistema de ventilação na obtenção de maior conforto térmico animal em condições de calor.

O sistema de resfriamento adiabático evaporativo auxiliou na melhoria das condições térmicas internas da instalação, contudo, provavelmente em razão da falta de isolamento térmico dos fechamentos, não possibilitou uniformidade térmica espacial e nem temporal para as estações de verão e inverno e, também, não foi eficiente em mantê-las dentro da zona de conforto de bovinos em lactação, durante o período crítico de verão.

Igualmente importante, foi possível observar que as áreas da instalação *Compost Barn* fechada influenciaram na distribuição espacial das variáveis de cama, e estavam em condições críticas do material de compostagem nas regiões periféricas da cama, sendo estas, próximo das placas de resfriamento evaporativo, próximo do corredor de alimentação e na região com maior densidade animal.

Durante o verão e inverno, os valores obtidos da caracterização da cama indicaram que o composto não se encontrava em condições ideais para ocorrência de compostagem plena, no entanto, a camada interna aerada apresentou-se biologicamente ativa.

Possivelmente, os fatores do ambiente térmico da instalação, por efeito da disposição dos exaustores, distanciamento dos painéis evaporativos, influência dos paramentos verticais do fechamento da instalação (materiais não isolantes), também influenciaram na distribuição espacial das variáveis da cama.

O sistema fechado e climatizado demandou a reposição constante de material de cama, contudo, ainda assim, a cama se apresentava com elevado teor de umidade em curto prazo de reposição.

A elevada densidade animal repercutiu negativamente na piora do teor de umidade e temperatura interna na cama, representando um dos principais entraves para o sucesso desse tipo de instalação. Como melhor estratégia para o funcionamento desse sistema com ventilação em túnel, nas condições especificadas, deve-se adotar maior área de cama por animal, bem como a necessidade de adotar mais um revolvimento diário da cama.

Em geral, as vacas leiteiras mostraram uma adequada pontuação para o escore de sujidade e locomoção para as duas estações climáticas avaliadas. A produção média de leite se manteve com média próxima durante o verão e inverno. Ao considerar todo o plantel de bovinos de leite, durante o inverno, observou-se que a média de produção de leite foi de $28,1 \pm 7,2$ kg leite dia⁻¹, e durante o verão foi de $26,9 \pm 6,7$ kg leite dia⁻¹, sendo que para os produtores, essa produção ficou abaixo do esperado para o valor investido.

Cabe ressaltar, a grande importância de que a elaboração e condução de atividades dos projetos de instalações *Compost Barn* sejam realizadas por profissionais habilitados, que se realize um estudo criterioso sobre o local e clima antes da implantação deste tipo de sistema climatizado. O sucesso do sistema *Compost Barn* fechado depende principalmente do gerenciamento adequado do ambiente térmico e das variáveis da cama. Neste tipo de instalação, o manejo adequado da cama é um dos pontos-chave para o sucesso do sistema, devendo-se evitar a umidade excessiva. Além disso, é essencial que os produtores verifiquem sobre a disponibilidade de material suficiente para a reposição constante de cama. Todos esses fatores necessitam, portanto, serem bem analisados para a adequada montagem do sistema.

A instalação *Compost Barn* fechada tem potencial de uso, um dos principais benefícios é capacidade de maior controle do ambiente térmico durante as estações com elevadas temperaturas. O maior desafio é no gerenciamento da cama e do sistema de acondicionamento térmico, bem como na promoção de maior isolamento dos fechamentos laterais e coberturas. Portanto, da forma que o sistema foi concebido e operado, este não foi eficiente em manter as variáveis microclimáticas e de cama dentro das faixas ideais recomendadas pela literatura.

Muitos estudos e adaptações ainda devem ser realizados para que se chegue a melhor adequação para esse tipo de projeto para as condições climáticas do Brasil. Pode-se, com base nos resultados obtidos, traçar estratégias para o melhoramento na tipologia construtiva da edificação, no sistema de ventilação utilizado, bem como no manejo da cama.

Com o intuito de aprimorar este estudo, pesquisas adicionais são necessárias para abordar o custo de produção de leite em sistemas intensivos *Compost Barn* fechado, incluindo a análise da rentabilidade deste tipo de instalação, abrangendo aspectos de consumo

energético e materiais alternativos de cama, bem como estudos comparativos com instalações *Compost Barn* com laterais abertas e ventilação por pressão positiva.