

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CAMPUS DE JABOTICABAL

**AGROVOLTAICA ANIMAL COMO ALTERNATIVA PARA
MELHORAR A SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE
OVINOS EM AMBIENTE TROPICAL**

Sergio da Silva Fidelis

Zootecnista

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CAMPUS DE JABOTICABAL

**AGROVOLTAICA ANIMAL COMO ALTERNATIVA PARA MELHORAR A
SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE OVINOS EM AMBIENTE TROPICAL**

Sergio da Silva Fidelis

Orientador: Prof. Dr. Alex Santos Campos Maia

Coorientador: Prof. Dr. Vinícius de França Carvalho Fonseca

Dissertação de mestrado apresentada à
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias –
Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre em
Zootecnia.

2023

F451a Fidelis, Sergio da Silva
Agrovoltaica Animal como alternativa para melhorar a sustentabilidade na produção de ovinos em ambiente tropical / Sergio da Silva Fidelis. -- Jaboticabal, 2023
39 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Alex Sandro Campos Maia
Coorientador: Vinícius de França Carvalho Fonseca

1. Conforto térmico. 2. Painéis solares. 3. Sombreamento. 4. Intensificação sustentável. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AGROVOLTAICA ANIMAL COMO ALTERNATIVA PARA MELHORAR A SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE OVINOS EM AMBIENTE TROPICAL

AUTOR: SERGIO DA SILVA FIDELIS

ORIENTADOR: ALEX SANDRO CAMPOS MAIA

COORIENTADOR: VINICIUS DE FRANÇA CARVALHO FONSÊCA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Zootecnia, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br VINICIUS DE FRANÇA CARVALHO FONSECA
Data: 26/04/2023 14:06:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. VINICIUS DE FRANÇA CARVALHO FONSÊCA (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br CAROLINA CARDOSO NAGIB NASCIMENTO
Data: 26/04/2023 14:29:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. CAROLINA CARDOSO NAGIB NASCIMENTO (Participação Virtual)
Empresa: Irta - Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries / Barcelona/Espanha

Profa. Dra. SHEILA TAVARES NASCIMENTO (Participação Virtual) Departamento de Zootecnia / Universidade Estadual de Maringá

Documento assinado digitalmente
gov.br SHEILA TAVARES NASCIMENTO
Data: 27/04/2023 17:25:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 14 de abril de 2023

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Sergio da Silva Fidelis nasceu na cidade de Areia no estado da Paraíba em 04 de novembro de 1996. Em março de 2015 ingressou no curso de Zootecnia da Universidade Federal da Paraíba no Centro de Ciências Agrárias em Areia, recebendo o título de Zootecnista em junho de 2020. Durante a graduação, estagiou no Laboratório de Histologia e Embriologia Animal (LABHIS), Laboratório de Análises de Produtos de Origem Animal (LAPOA) e na Fazenda Tapuio Agropecuária Ltda. Em 2016 ingressou no Grupo de Estudos em Bioclimatologia, Etologia e Bem-estar animal (BioEt), participou como aluno bolsista em projetos de extensão em propriedades leiteiras (PROBEX/UFPB) e bolsista de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/UFPB) de 2017 a 2019 sob orientação do Prof. Dr. Edilson Paes Saraiva. Em setembro de 2020, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, na área de concentração em Fisiologia e Bem-estar animal, com ênfase em Biometeorologia Animal, sob orientação do Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo discernimento e por tudo que provêm em minha vida.

À Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Campus de Jaboticabal, e ao Programa de Pós-graduação em Zootecnia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de mestrado no início do curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de mestrado (proc. nº 2021/02437-3).

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

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia, pela oportunidade e ensinamentos compartilhados.

Ao meu Coorientador, Prof. Dr. Vinícius de França Carvalho Fonseca pela amizade e paciência. Meu maior exemplo profissional!

A Profa. Dra. Sheila Tavares Nascimento e a Dra. Cíntia Carol de Melo Costa por compor minha banca de qualificação.

A Profa. Dra. Sheila Tavares Nascimento e a Dra. Caroline Nagib por compor minha banca de defesa, a vocês meu muito obrigado!

Ao Grupo de Inovação em Conforto Térmico e Bem-estar Animal (INO BIO-MANERA), a todos os integrantes/amigos do grupo que me ajudaram nessa jornada, compartilhando momentos do dia a dia em especial: Ângela, Caio, Gustavo, Valéria, Erika, Natália, Larissa, Patric, Juliete, Ingrid, Gabriela, Paloma, João, Juninho Ferrari, Uanderson, Getúlio, Tião e Vinicius.

À minha amiga Valéria que não mediu esforços diariamente me ajudando no manejo e coleta de dados.

À minha mãe, Maria das Dores e meus irmãos que são a base da minha família, são pessoas excepcionais que me encorajam no dia a dia.

Ao meu pai, Antônio Fidelis que do seu jeitinho me encoraja na minha caminhada.

Ao meu querido avô, José Sinésio (*in memoriam*), que sempre me acompanhou com entusiasmo durante minha caminhada.

Ao “presente” que ganhei em minha estadia em Jaboticabal, o Pedro Duarte que divide diariamente minhas alegrias, tristezas e está sempre comigo.

Aos meus companheiros de moradia, Noelia, Luis, Ivan, Bruna e Nina que formamos uma família. Amo vocês!

A todos que de alguma forma, me ajudaram a realizar essa caminhada.

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	10
INTRODUÇÃO	10
1.1 Ovinocultura no Brasil: Uma ênfase na região sudeste.....	11
1.2 Termorregulação de ovinos em ambiente tropical	12
1.3 Sustentabilidade e sistemas integrados na produção animal: Agrovoltáica Animal	13
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
REFERÊNCIAS.....	16
CAPITULO 2 – Animal agrovoltáica improves thermal comfort and performance of feedlot sheep in tropical areas.....	18
INTRODUCTION.....	20
MATERIAL AND METHODS.....	21
<i>Animals and experimental design</i>	21
<i>Nutritional management</i>	22
<i>Meteorological data</i>	23
<i>Thermal stress indicators</i>	23
<i>Animal performance</i>	24
<i>Economic and environmental outcomes of the two feedlot systems</i>	25
<i>Heat load experienced by feedlot sheep In_comfort Index (InCI)</i>	25
<i>Confirmatory analyses</i>	26
RESULTS AND DISCUSSION	27
CONCLUSIONS	36
ACKNOWLEDGEMENTS.....	36
AUTHOR CONTRIBUTIONS.....	36
REFERENCES.....	36

CEUA – COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS

CERTIFICADO

Certificamos que o projeto de pesquisa intitulado “**Agrivoltaica animal na produção de ovinos de corte**” protocolo nº 1434/21, sob a responsabilidade do Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia, que envolve a produção, manutenção e/ou utilização de animais pertencentes ao Filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto o homem), para fins de pesquisa científica (ou ensino) - encontra-se de acordo com os preceitos da lei nº 11.794, de 08 de outubro de 2008, no decreto 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), e foi aprovado pela COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS (CEUA), da FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS, UNESP - CÂMPUS DE JABOTICABAL-SP, em reunião ordinária de 24 de junho de 2021.

Vigência do Projeto	15/12/2020 a 30/04/2021
Espécie / Linhagem	Ovinos (<i>Ovis aries</i>)
Nº de animais	60
Peso / Idade	18 Kg / 65 dias
Sexo	Macho
Origem	Laboratório de Bioclimatologia FCAV/UNESP

Jaboticabal, 24 de junho de 2021.


Profa. Dra. Paola Castro Moraes
Vice-Coordenadora – CEUA

AGROVOLTAICA ANIMAL COMO ALTERNATIVA PARA MELHORAR A SUSTENTABILIDADE DA PRODUÇÃO DE OVINOS EM AMBIENTE TROPICAL

RESUMO – Agrovoltáica animal integra produção de proteína animal, melhor conforto térmico e sustentabilidade em uma mesma área, tecnologia que pode fomentar a intensificação sustentável da ovinocultura em áreas tropicais. Este estudo teve como objetivo investigar o impacto da Agrovoltáica Animal na termorregulação e desempenho produtivo de ovinos confinados. Cinquenta e dois cordeiros mestiços (F1, Santa Inês x Dorper) não castrados e com 35 kg (DP = 0,2) de peso corporal inicial, foram distribuídos aleatoriamente em dois sistemas de confinamento, 1) Agrovoltáica Animal e 2) confinamento convencional, no período de maio a junho de 2022. O sistema Agrovoltáica animal tinha sombra fornecida aos animais por vinte módulos de painéis solares (área de sombra de 1,53 m² animal⁻¹). No sistema de confinamento convencional não havia disponibilidade de sombra. As temperaturas corporais (pele, subcutânea e intraperitoneal), frequência respiratória, comportamento de uso de sombra e alimentar dos cordeiros foram avaliados ao longo dos dias de confinamento nos dois sistemas. O consumo de matéria seca (CMS, kg animal⁻¹ dia⁻¹), a taxa de ganho de peso (kg animal⁻¹ dia⁻¹), conversão e eficiência alimentar dos cordeiros foram monitorados individualmente por meio de alimentadores eletrônicos do tipo RFID. As condições meteorológicas experimentadas pelos cordeiros foram resumidas em uma única variável, o Índice de Conforto Térmico para ovinos (In_Comfort Index, InCI). De acordo com as classes do InCI, os cordeiros foram expostos a 41 dias quentes durante o período de confinamento. Nestes dias, das 10:00 às 14:00h, 80% dos cordeiros do sistema Agrovoltáico estavam na projeção de sombra dos painéis (P = 0,0001). Consequentemente, cordeiros mantidos no sistema Agrovoltáico tiveram a temperatura subcutânea reduzida em 0,70 °C (P = 0,0001), frequência respiratória em 40 respirações min⁻¹ (P = 0,0001), assim como também, despenderam maior proporção de tempo (P = 0,0001) deitados e ruminando, quando comparado com cordeiros confinados no sistema convencional. Embora o ganho de peso médio diário tenha sido semelhante entre os sistemas (P = 0,0605), cordeiros no piquete com Agrovoltáica animal consumiram menos ração (P = 0,0001), resultando em incremento médio de 5% (P = 0,0002) para eficiência alimentar. Estima-se que compense até 65% das emissões de metano entérico liberadas no meio ambiente. Com base nos resultados deste estudo, pode-se concluir que a Agrovoltáica Animal melhora o conforto térmico, o desempenho produtivo e a sustentabilidade de ovinos confinados em áreas tropicais.

Palavras-chave: conforto térmico, painéis solares, sombreamento, intensificação sustentável

ANIMAL AGROVOLTAICS AS AN ALTERNATIVE FOR SUSTAINABLE OF SHEEP PRODUCTION IN A TROPICAL ENVIRONMENT

ABSTRACT: Animal Agrivoltaic integrates production of animal protein, better thermal comfort and sustainability in the same area, a technology that can foster sustainable intensification of sheep farming in tropical areas. This study aimed at investigating impact of Animal Agrivoltaic on thermoregulation and productive performance of feedlot sheep. Fifty-two crossbred (F₁, Santa Ines × Dorper) non-castrated lambs with 35 kg (SD = 0.2) of initial body weight, were randomly assigned in two feedlot systems, the Animal Agrivoltaic and a conventional feedlot, from May to June 2022. The Animal Agrivoltaic system had shade provided to animals by twenty modules of solar panels (shade area of 1.53 m²animal⁻¹), while at the conventional feedlot system shade was not available. Body temperatures (skin, subcutaneous, and intraperitoneal), respiratory rate, shade-use and feeding behavior of lambs were assessed along the days on feeding. The dry matter intake (DMI, kg animal⁻¹ day⁻¹), rate of weight gain (kg animal⁻¹ day⁻¹), and the feed/gain ratio of lambs were individually and continuously monitored by electronic RFID feeders. The meteorological conditions experienced by lambs were summarized into one single variable, the In_Comfort Index for feedlot sheep (InCI). According to the classes of the InCI, lambs were exposed to 41 hot days along the days on feeding. Over these days, from 10:00 to 14:00h, 80% of lambs in the Animal Agrivoltaic system were likely (P = 0.0001) to be in shade. Lambs kept in the Animal Agrivoltaic system had subcutaneous temperature reduced by 0.70 °C (P = 0.0001), respiratory rate by 40 breath min⁻¹ (P = 0.0001), as well, they spent greater time (P = 0.0001) lying and ruminating, when compared with lambs from the conventional feedlot system. Although the body weight gain was similar between the systems (P = 0.0605), lambs in Animal Agrivoltaic consumed less feed (P = 0.0001), which resulted in a gain/feed ratio incremented by 5% (P = 0.0002) than those in conventional feedlot. Estimated to offset up to 65% of enteric methane emissions released into the environment. Based on the results of this study, it can be concluded that the Animal Agrivoltaics improves thermal comfort, productive performance and sustentability of feedlot sheep in tropical areas.

Key words: photovoltaic panels, shading, thermal comfort, sustainable intensification

CAPITULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

INTRODUÇÃO

O consumidor busca produtos oriundos de sistemas de produção sustentáveis e que colaborem com melhoria do bem-estar animal, como os sistemas integrados de produção animal. Os sistemas integrados otimizam o uso da terra, promovem aporte de biomassa e possibilitam a produção de proteína animal sequestro de carbono e recentemente energia renovável, como é o caso do sistema agrovoltaico. Ao integrar painéis fotovoltaicos o sistema agrovoltaico gera energia limpa, renda, compensar as emissões de metano entérico e melhorar conforto dos animais pelo bloqueio irradiância solar direta que atenua efeito da radiação térmica à campo (Maia et al. 2020, Faria et al. 2023).

Estudos anteriores de Maia et al. 2020, Faria et al. 2023 e Fonseca et al.2023 trouxeram o potencial do sistema agrovoltaico animal na melhora do conforto e sustentabilidade para a pecuária tropical. Conforme Faria et al. (2023) um modulo de vinte painéis solares (potência 335 Wp) em um período de um ano (agosto de 2018 a agosto de 2019) foi capaz de gerar até 4.869,4 kWh, que impactou em uma economia de até US\$ 970.00. Estima-se que essa geração foi capaz de compensar até 67% de emissão de metano entérico que seria emitido por novilhas holandesas. Além disso os painéis fornecem um recurso de sombra que diminuiu em até 40% a carga térmica experimentada Maia et al. (2020). A Agrovoltaica Animal pode ser um caminho para melhorar eficiência produtiva e sustentabilidade sobretudo nos sistemas criação em confinamento, pois em função da pressão dos criadores para adotar práticas intensivas com intuito de acelerar etapas de produção (Rojas-Moreno et al.,2021) para atender um dos principais mercados consumidores como por exemplo o de cordeiros do estado de São Paulo (Rojas-Moreno et al.,2021, Paula et al., 2021) o que resulta em uma maior demanda de insumos não renováveis (Maia et al., 2020).Portanto o objetivo desta revisão foi trazer os principais pontos abordados na literatura sobre os seguintes pontos 1) aspectos da produção de ovinos na região sudeste do país; 2) Caracterização do ambiente térmico e termorregulação de ovinos em regiões tropicais e 3) como sistemas integrados em regiões tropicais beneficiam aspectos de conforto térmico e sustentabilidade na produção animal.

1.1 Ovinocultura no Brasil: Uma ênfase na região sudeste

Segundo dados do IBGE, (2021) o efetivo de ovinos no Brasil gira em torno de 20,5 milhões de cabeças, com ampla maioria concentrada nas regiões Nordeste e Sul que juntas somam cerca de 90% do rebanho nacional. Na região Nordeste os estados da Bahia, Pernambuco e Ceará possuem os maiores rebanhos. Já na região Sul, o maior fica no estado do Rio Grande do Sul. Na região Sudeste, somente o estado de São Paulo abriga cerca de 54% das mais de 610 mil cabeças (IBGE, 2021) atraindo investidores devido o fortalecimento da indústria da carne ovina, sobretudo em torno das cidades de São José do Rio Preto, Botucatu, Bauru, Araçatuba e Piracicaba (Rainere, et al 2015; Rojas-Moreno et al. 2022).

No Sudeste os sistemas de criação variam do semiextensivo ao intensivo com prevalência do semiextensivo, com média produtividade, animais com idade avançada e com grande dependência das pastagens como principal suporte forrageiro para alimentação, e em alguns casos, a atividade é tida como secundária, seja em relação a cultura da cana de açúcar ou da pecuária de corte (Rainere, et al. 2015). As propriedades apresentam perfis semelhantes, em que quase 90% dos produtores têm suas criações em propriedades próprias com mão-de-obra quase que exclusivamente familiar, onde o direito de posse desta terra diminui as incertezas, possibilitando a entrada de crédito para melhoria da propriedade (Porto et al., 2013).

Em relação ao padrão racial há preferência das raças Dorper, Santa Inês e seus mestiços (MCManus, et al. 2017). A média de indicadores regionais de desempenho como taxa de prenhez e de proficiência varia de 80 e 120%, respectivamente. Os cordeiros apresentam uma média de peso ao nascimento de 3,5 kg /PV com potencial de ganho 250 g/dia para desmame aos 90 dias com cerca de 19 kg/PV e abate 140 dias com rendimento de carcaça em torno de 45% (Rainere, et al. 2015).

A perspectiva para o setor é de crescimento, em parte influenciado por mudanças no hábito de consumo que passa ser mais frequente, contudo, ainda prevalece aderido às reuniões sociais e eventos festivos. O consumidor ainda considera esse tipo de carne como “*gourmet*” e tem preferência por outras carnes, sobretudo a de bovinos (Paula et al. 2021) essa mudança é bem evidente no aumento da quantidade de carne consumida nos últimos anos, saindo da média das 0,7 kg para um 1,5 kg por habitante/ano (Leite, 2015) em função da cultura regional, pelo fato de

que ao longo dos anos o consumo de proteína animal de bovinos, aves, suínos e peixes foi popularizado. Em resumo, a atividade ainda repousa em um ambiente oscilante pela dependência de fatores como: organização do sistema agroindustrial, políticas públicas de incentivo a atividade e combate a informalidade. Esses elos consolidam alianças e estratégicas entre produtor, indústria e comércio (Raineri et al., 2015; Ramos et al., 2014). Além disso, algumas regiões onde a atividade não recebe incentivos os animais ainda padecem sobre as condições ambientais, muitas vezes mantidos em pastagem abertas e sem sombra, com impacto direto em seu conforto, bem-estar e produtividade (Rainere et al., 2015).

1.2 Termorregulação de ovinos em ambiente tropical

As condições térmicas em áreas tropicais permitem que os animais experimentem níveis de radiação de ondas curtas que ultrapassam 800 Wm^{-2} e temperatura do ar acima de 30°C (Silva, 2000). Neste contexto a carga térmica radiante média (T_{RM}) geralmente fica próxima ou superior a temperatura do ar e corporal, promovendo ganho e estoque de calor via radiação (Silva, 2000; Maia et al. 2005).

A energia térmica radiante na superfície terrestre provém do sol, que emite radiação em vários comprimentos e interage nas diversas camadas da atmosfera, tornando o fator de maior influência no equilíbrio térmico dos animais (Santos et al., 2023). Resultados anteriores de Maia et al. (2015) apontaram que caprinos “Sem padrão racial definido” chegam a absorver 420 Wm^{-2} de energia térmica, sobretudo quando níveis de radiação solar atingem 1000 Wm^{-2} . Em vacas à campo Silva et al. (2010) estimaram que o percentual de energia radiante de ondas curtas absorvida foi de $46,6\% = 297,9 \text{ W m}^{-2}$ e outros $53,4\% = 342 \text{ W m}^{-2}$ por radiação de ondas longas. Em resumo podemos considerar que o ganho de calor por radiação (q''_{TOTAL}) é resultado do total radiação de ondas curtas (q''_{RC}) e longas (q''_{RL}), sobretudo em pastagens ou confinamentos com ausência de sombra. Nestas condições o custo biológico para termólise varia de acordo com a condição térmica experimentada. Nessas condições, quais estratégias adotar para garantir melhores condições térmicas destes animais à campo? Sem dúvidas a sombra é recurso primordial para minimizar os efeitos negativos da radiação solar (Fonseca et al., 2023).

Do ponto de vista de melhoria no conforto térmico pela diminuição dos efeitos negativos da radiação solar nos diferentes aspectos de termorregulação e impactos econômicos, os autores Maia et al., 2020; Teixeira et al., 2022; Fonseca et al. 2023 e Maia et al. 2023 trouxeram avanços na compreensão dos benefícios da sombra. Em síntese a sombra natural de árvores atenua efeitos de níveis de irradiância solar acima de 1000 Wm^{-2} e reduz a carga térmica experimentada em até 19,5%. Dentre os benefícios da sombra artificial há diminuição da carga de calor, com impacto na redução de até 5°C na temperatura da superfície corporal, 1°C na subcutânea e cerca de 10 resp. min^{-1} em bovinos. Manter uma variação desses indicadores numa faixa estreita reflete em ganhos econômicos e o sistema mais sustentável, com resultados de ingestão de água inferior e maior um incremento de peso de carcaça quente (+8 kg) em relação bovinos, sem sombra além da expressão em maior proporção de comportamentos indicadores de conforto como ruminar e busca por sombra. E ainda a inclusão de painéis solares como alternativa de sombra artificial cuja eficiência diminui a carga térmica experimentada, diminui temperaturas corporais e aumenta a frequência de comportamentos benéficos em ovelhas e novilhas.

Essa temática da melhoria do conforto, bem-estar e sustentabilidade é sumarizada pela demanda crescente dos consumidores por produtos oriundos de sistemas social e ambientalmente sustentáveis. E sem dúvidas os sistemas integrados, cujas características permitem consorciar produção agrícola, pecuária e florestal atendem essas demandas (Vieira et al. 2021). Em outras palavras, eles permitem produzir biomassa, proteína animal, sequestrar carbono e ao mesmo tempo os animais se beneficiam com sombra. Além disso, é possível alinhar geração de energia por painéis solares, passando agora a integrar produção de proteína animal, fornecimento de sombra e potencial de zerar as emissões líquidas de carbono (Maia et al. 2020; Fonseca et al. 2023).

1.3 Sustentabilidade e sistemas integrados na produção animal: Agrovoltaica Animal

Sistemas integrados consorciam em uma mesma área produção agrícola, pecuária e florestal. Os mais difundidos são os sistemas silvipastoris e agrosilvipastoris. Essas estratégias melhoram produção à pasto, porque reduz a carga

térmica experimentada e aumenta o conforto térmico, promovendo aporte de biomassa e sequestro de CO₂ (Oliveira et al. 2017; Pezzopane, et al. 2019).

Sistemas silvipastoris podem reduzir a carga térmica radiante experimentada em até 100 Wm² em horário de maior irradiância solar (Pezzopane, et al. 2019). Então essa sinergia é bastante benéfica para o setor pecuário. O simples fato de disponibilização de sombra beneficiou cordeiros (F₁, Dorper x Santa Inês) na diminuição da taxa respiratória de até 20 movmin⁻¹ e 0,3°C de temperatura corporal (Vieira et al. 2021). Esses pontos influenciam na eficiência produtiva porque os animais irão mobilizar menos energia para manutenção da temperatura corporal. Além desse modelo produtivo otimizar o uso da terra, produzir alimento e reduzir a emissão de gases de efeito estufa, tal como sequestrou carbono (Vogeler et al., 2013). Portanto, atende a demanda por sistemas eficientes e sustentáveis.

Segundo seus precursores, o sistema agroltaico animal propõe incluir painéis fotovoltaicos e suprir não somente o fornecimento de sombra, mas também a geração de energia, mitigação de gases do efeito estufa e performance econômica do sistema de produção (Maia et al. 2020; Faria et al. 2023, Fonseca et al. 2023). Outros sistemas fotovoltaicos também integram a produção de hortaliças e forrageiras, mas ao integrar no contexto da pecuária se houver competição entre culturas menos tolerantes à sombra, por outro, a sombra dos painéis protegerá animais à pasto contra radiação solar direta.

Resultados Faria et al. (2023) demonstraram que no período de um ano (agosto de 2018 a agosto de 2019) um conjunto de dez painéis solares gerou 4869,4 kWh de eletricidade. Dentro do contexto social essa energia gerada representa economia de US\$ 970,00. Em ganhos ambientais cerca de 2,32 ton de CO₂ deixaram de ser emitidos para atmosfera, se essa quantidade de energia fosse gerada a partir de combustíveis fósseis. Frente as preocupações com as emissões de gases oriundos da fermentação ruminal, sobretudo o metano entérico (eCH₄) a agroltaica animal tem o potencial de atingir emissões líquidas de metano (Fonseca et al. 2023). Segundo resultados de Faria et al. (2023) se considerarmos a taxa diária de emissão de CH₄ foi de 63,5 g animal⁻¹ ou 1,7 kg de CO_{2-eq} são necessários 4,1 m² (potência nominal = 335 W) de painéis por novilha para atingir emissões líquidas zero de CH₄ entérico. Esta área (que varia entre 5 e 9 m²) de painéis solares representa o

requisito ideal de espaço de sombra para vacas leiteiras. Neste estudo, ao qual os módulos solares projetaram 2,7 m² de sombra por animal a compensação estava próxima de 67% do total de emissões de CH₄. Para atingir emissões líquidas zero de e CH₄, portanto, é necessário determinar o requisito ideal de área de sombra. Além disso é que o sistema agrovoltaico tem potencial para alcançar emissões líquidas zero, de metano (CH₄). foram a diminuição em 40% da carga térmica radiante em ovelhas e novilhas quando comparado a telas de bloqueio de 80%.

Apesar de estar em expansão o preço alto das células fotovoltaicas, mas há perspectiva de crescimento do modelo agrovoltaico (Dinesh & Pearce, 2016). Em 2006 seu valor era US\$3,90 e caiu para menos de US\$ 0,39 em 2016, enquanto a eficiência dos painéis aumentou significativamente (Pereira et al., 2017). Para o futuro, os preços dos sistemas fotovoltaicos tendem a cair em média 5,9% ao ano, como previsto no relatório elaborado pela International Renewable Energy Agency (IRENA, 2017).

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

Objetivou-se avaliar impacto do sistema agrovoltaico animal em aspectos do conforto térmico e desempenho de ovinos em sistema de confinamento.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Avaliar indicadores de estresse térmico (frequência respiratória, temperatura da epiderme, subcutânea e intraperitonal) de cordeiros (F1, Santa Inês x Dorper) manejados em sistema agrovoltaico e convencional;

2.2.2 Avaliar o comportamento de uso de sombra (postura, atividade e localização) de cordeiros (F1, Santa Inês x Dorper) manejados em sistema agrovoltaico e convencional;

2.2.3 Avaliar parâmetros de desempenho (ingestão diária de matéria seca, ganho de peso diário, conversão alimentar, eficiência alimentar, rendimento de carcaça e peso quente de carcaça) de cordeiros (F1, Santa Inês x Dorper) manejados em sistema agrovoltaico e convencional;

2.2.4 Avaliar a produção de energia e a quantidade de CO₂ não emitida para atmosfera em função da energia elétrica gerada.

REFERÊNCIAS

Cezar MF, Souza BB, Souza WH, Pimenta Filho EC, Tavares GP, Medeiros GX. Avaliação de parâmetros fisiológicos de ovinos Dorper, Santa Inês e seus mestiços perante condições climáticas do trópico semiárido nordestino. **Ciência e Agrotecnologia**, (2004). v.28, n.3, p.614-620.

Faria AFPA, Maia ASC, Moura GAB, Fonseca VFC, Nascimento ST, Milan HFM, Gebremedhin KG. **Use of solar panels for shade for holstein heifers**. *Animals*, (2023). 13:3.329.

Fonseca VFC, Culhari E, Moura GAB, Nascimento ST, Milan HFM, Maia ASC. **Shade of solar panels relieves heat load of sheep managed in tropical áreas**. Available at SSRN, (2023).

IRENA (2017), Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Solar PV, IRENA and Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Abu Dhabi.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2021. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/>>

Maia ASC, daSilva RG, Battiston LCM. Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. *International Journal of Biometeorology*, (2005). 13;50:17–22.

Maia ASC, Milan HFM. RR Respiratory Rate-Frequência respiratória de animais de grande porte em condições de campo. Patente registrada. BR512016000418-5, depositada em 2015.

Maia ASC, Culhari EA, Fonsêca VDFC; Milan HFM, Gebremedhin KG. **Photovoltaic panels as shading resources for livestock**. *Journal of Cleaner Production*, (2020).258, 120551.

Maia ASC, Moura GAB, Fonseca VFC, Gebremedhin KG, Milan HFM, Chiquitelli-Neto M, Simão BR, Campanelli VPC, Pacheco RDL. Economically sustainable shade design for feedlot cattle. **Frontiers in Veterinary**. (2023).18.3389.

McManus C, Hermuche P, Paiva SR, Silva FCP, Moraes JCF, Melo CB, Mendes C (2014) Distribuição geográfica de raças de ovinos no Brasil e sua relação com fatores ambientais e climáticos, como a classificação de risco para a conservação. Disponível em: <[http://www.arcoovinos.com.br/images/artigosTecnicos/Distribuicao Geografica de racas de Ovinos no Brasil.pdf](http://www.arcoovinos.com.br/images/artigosTecnicos/Distribuicao_Geografica_de_racas_de_Ovinos_no_Brasil.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2023

Oliveira SEO, de Melo Costa CC, de Souza Jr JBF, de Queiroz JPAF, Maia ASC, de Macedo Costa LL. Short-wave solar radiation level willingly tolerated by lactating Holstein cows in an equatorial semi-arid environment. **Tropical animal health and production**, (2014). 46(8): 1413-1417.

Pereira EB, Martins FR, Gonçalves AR, Costa RS, Lima FJL, Ruther R, Abreu SL, Tiepolo GM, Pereira SV, Souza JG (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ed. São José dos Campos: INPE.

Pezzopane JRM, Nicodemo MLF, Bosi C, Garcia AR, Lulu J. **Animal thermal Comfort indexes in silvipastoral systems with different tree arrangements**. Journal of Thermal Biology, (2019). 79:103-111.

Raineri C, Nunes BCP, Gameiro AH. **Technological characterization of sheep production systems in Brazil**. Animal Science Journal, (2015). v. 86, p. 476–485.

Ramos MJ. et al. Sistema agroindustrial da carne ovina no Oeste paranaense. Revista de Política Agrícola,(2014). p. 18–32.

Rojas-Moreno DA, Nascimento RA, Pena-Bermudez YA, Resende AT, Sartorello GL, Filho AS, Agostinho F, Bueno ICS, Gameiro AH. **Can we obtain high productivity**

allied to environmental gains? Na energy-economic study af sheep meat production systems. Journal of Cleaner Production, (2022). 132722.

Santos SGCG, Saraiva EP, Gonzaga Neto S, Maia MIL, Lees AM, Sejian V, Maia ASC, Medeiros GR, Fonsêca VFC. **Heat tolerance, thermal equilibrium and environmental management strategies for dairy cows living in intertropical regions.** Frontiers in Veterinary Science, (2023).1772.

Silanikove, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. **Livestok Production Science**, (2000). 67, 1-18.

Silva RG (2000) Um modelo para a determinação do equilíbrio térmico de bovinos em ambientes tropicais. Revista Brasileira de Zootecnia 29(4): 1244-1252.

Teixeira BE, Nascimento ST, Mós JVN, Oliveira EM, Santos VM, Maia ASC, Fonseca VFC, Passos BM, Murata LS. The potential of natural shade provided by Brazilian savanna trees for thermal comfort and carbon sink. **Science of The Total Environment.** (2022). 845:157324.

Vogeler, I., Beukes, P., & Burggraaf, V. **Evaluation of nitrate leaching mitigation strategies in pasture dairy systems.** Agricultural systems, (2013).115,21-28.

Vieira FMC, Pilatti JÁ, Czekoski ZMW, Fonsêca VFC, Herbut P, Angrecka S , de Souza Vismara E de Paulo Macedo V, dos Santos MCR, Paśmionka I. **Effect of the Silvopastoral System on the Thermal Comfort of Lambs in a Subtropical Climate: A Preliminary Study.** Agriculture 2021, 11, 790

CAPITULO 2 – Animal agrivoltaic improves thermal comfort and performance of feedlot sheep in tropical areas

Sergio da Silva Fidelis¹, Alex Sandro Campos Maia¹, Gustavo André Bernado Moura¹, Vinicius de França Carvalho Fonsêca¹

¹ *Laboratory of Animal Biometeorology, São Paulo State University, Jaboticabal, Brazil*

Abstract: Animal Agrivoltaic uses solar panels to integrate production of animal protein, better thermal comfort, and sustainability in the same area. This technology can foster sustainable intensification of feedlot sheep in tropical areas. This study aimed at investigating impact of Animal Agrivoltaic on heat stress indicators and performance of feedlot sheep. A total of 52 crossbred (F1, Santa Ines × Dorper) non-castrated lambs, with 35 kg (SD = 0.2) of initial body weight (BW_i), were fed in two feedlot systems for a period of 60 days, from May to June, 2022. Twenty-six ($BW_i = 35$ kg, SD = 0.4) were assigned to the Animal Agrivoltaic, where animals had shade provided by twenty modules of solar panels (Shade area = $1.53 \text{ m}^2 \text{ animal}^{-1}$). Another 26 lambs ($BW_i = 34.79$ kg, SD = 0.4) were assigned to a conventional feedlot system, where shade was not available. Body temperatures (e.g., skin, subcutaneous, and intraperitoneal), respiratory rate, shade-use and feeding behavior of lambs were assessed during the study period. The dry matter intake (DMI), daily weight gain (kg), and gain/feed ratio of lambs were individually assessed using electronic RFID feeders. The meteorological conditions experienced by lambs were summarized into one single variable, the *In_Comfort Index* for feedlot sheep (InCI). According to the classes of the InCI, lambs were exposed to 41 hot days ($0.4 < \text{InCI} \leq 0.6$, around noon mean solar irradiance above 600 W m^{-2} , and air temperature of above $33 \text{ }^\circ\text{C}$). During these days, from 10:00 to 14:00h, 80% of lambs in the Animal Agrivoltaic were likely ($P = 0.0001$) to be in shade. Lambs in Animal Agrivoltaic had subcutaneous temperature reduced by $0.70 \text{ }^\circ\text{C}$ ($P = 0.0001$), and respiratory rate by $40 \text{ breath min}^{-1}$ ($P = 0.0001$), as well as they spent greater time ($P = 0.0001$) lying and ruminating, when compared with lambs in the conventional feedlot system. Lambs in Animal Agrivoltaic consumed less feed ($P = 0.0001$), which resulted in a gain/feed ratio incremented by 5% ($P = 0.0002$) than those in conventional feedlot. Estimated to offset up to 65% of enteric methane emissions released into the environment. Based on the results of this study, it can be concluded that the Animal Agrivoltaics improves thermal comfort, productive performance and sustentability of feedlot sheep in tropical areas.

Key words: photovoltaic panels, shading, thermal comfort, sustainable intensification

INTRODUCTION

The livestock sector have been pushed for adopting more sustainable practices to reduce greenhouses effects and the ongoing process of climate change (Sharpe et al., 2021). Additionally, the sector also needs to implement adaptation strategies to mitigate direct effects of climate change on animal welfare, such as exposure to more frequent and intense heat stress events (Maia et al. 2020). This is particularly important in tropical areas where animals are often exposed to high levels of radiant heat load throughout the year (Silva et al. 2010). The use of agrivoltaic systems for power generation not only reduces carbon emission but also provides shade that can help mitigate radiant heat load and improve feed efficiency in livestock (Maia et al., 2023; Faria et al., 2023). By using photovoltaic panels as shading resource, the integration of thermal comfort, animal performance and sustainability is therefore optimized. This practice is named Animal Agrivoltaics.

Sheep farming intensification in the Southeast region of Brazil has been increasing through the implementation of feedlots, mostly driven by the competition for lands with other agricultural activities and the need to avoid deforestation for pasture expansion (Rainere et al. 2015; Rojas-Moreno et al., 2022). However, more intensive production systems often rely on external and non-renewable resources (Rojas-Moreno et al., 2022). Furthermore, sheep in feedlots are often kept without protection against solar radiation. Animal Agrivoltaics can offer a sustainable alternative to reduce carbon inputs in the system while improving the thermal comfort and productive performance of sheep. In this study, we evaluated the impact of Animal Agrivoltaic on heat stress indicators and productive performance of feedlot sheep. To achieve this goal, twenty-six lambs were fed during 60 days in a corral pen with shade provided by a set of photovoltaic panels, and another 26 were fed in a conventional feedlot without shade availability.

MATERIAL AND METHODS

Animals and experimental design

The procedures involving animals were approved by the Animal Ethics Committee of the São Paulo State University, Jaboticabal, São Paulo, Brazil (1434/21). From May to June 2022, fifty-two crossbred (F_1 , Santa Ines \times Dorper) non-castrated lambs with mean body mass of 35 kg (SD=0.2) were fed during 60 days in the Laboratory of Animal Biometeorology at the Sao Paulo State University, Brazil (21°15'17" S latitude, 48°19'20" W longitude). Approximately three weeks before the beginning of the study, lambs were treated with anthelmintic medication (1 ml 20 kg BW of levamisole phosphate (18.8%), Zoetis, São Paulo, Brazil).

Twenty-six lambs (body mass = 35, SD = 0.4) were housed in a corral pen with shade provided by a set of twenty photovoltaic panels (1.0 m \times 2.0 m; 335 Wp, peak efficiency of 16.72%, Canadian Solar model CS6Ue335P, Guelph, ON). The structure had the following dimensions: lower height: 3.0 m; inclination angle: 15°; width: 4.0 m; length: 5.0 m; area: 20 m²; total shaded area: 40 m² or 1,53 m² animal⁻¹ (Figure 01). Another 26 lambs (body mass = 34.79, SD = 0.4) were housed in a conventional corral pen without shade availability. The corral pens had area of 450 m² and were equipped with four feeders Intergado Efficiency (AF 1000) adapted with access ramps for sheep, and one water trough with RFID system.



Figure 01. Experimental facilities of the Animal agrivoltaic system in Jaboticabal, São Paulo, Brazil.

Nutritional management

Prior to the experiment, lambs were purchased from a commercial herd (average transport distance of 1.400 km) and placed in five covered pens equipped with a trough over four weeks. Each week the animals received increment the corresponding to 20% of the experimental diet until reaching 100% the diet experimental in order to reestablish physiological and ruminal conditions. During the experimental period, lambs received a growing diet with 40% of roughage (corn silage) and 60% of concentrate feed (Table 01). The diet was formulated according to the NRC (1985) to meet or exceed an average daily gain (ADG, kg day⁻¹) of 0.300 kg. Lambs were fed twice daily (07:30h and 16:00h). The dry matter adjustments of diet was performed on a daily basis. Feed refusals of every pen were daily collected and weighted before the first meal. Composite samples of ration were weekly collected and then frozen at -20 °C to determine dry matter intake (DMI, kg animal⁻¹ day⁻¹) and for chemical analyses.

Table 1: Ingredients and nutrients of feed diets used in the shaded and unshaded pens

Ingredient (% , DM basis)	Experimental diet
Corn silage	40
Corn bran	32.30
Soy grain	22.70
^a Mineral supplement	3
^b Calcitic limestone	1
Urea	1
Nutrients, %	
Dry matter	67.64
^c Crude protein	18.34
^d Crude fiber	6.54
^e Ether extract	2.73
Mineral matter	5.51
^f Non-extractive nitrogenous	66.89
Total digestible nutrients	74.50

^aCalcium 200.0 g/kg, phosphorus 32.0 g/kg, cobalt 12.0 mg/kg, copper 800 mg/kg, sodium 96.0 g/kg, sulphur 35.0 g/kg, iodine 50.0 mg/kg, magnesium 1,500.0 mg/kg, manganese 2,400 mg/kg, selenium 26.0 mg/kg, zinc 3,200.0 mg/kg, iron 0 mg/kg, vitamin A 240,000 IU/kg, vitamin D3 504,000 IU/kg, vitamin E 30,000 IU/kg, monensin 600.0 mg/kg, virginiamycin 714.0 mg/kg; ^b Calcium 90 g/Kg; ^cEstimated by method Dumas- factor 6,25; ^dEstimated by acid alkaline hydrolysis; ^eEstimated by NEN-(100)-(%CP=%MM+EE+%CB); ^fEstimated by KEART, 1982.

Meteorological data

Meteorological variables were recorded every one minute using a portable weather station (Campbell Scientific CR1000x Model) placed near to the corral pens (~3 m), and included: solar irradiance (R_S , $W\ m^{-2}$; CMP-22, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands; spectral range: 0.3–3.6 μm), ultraviolet solar irradiance (R_{UV} , $W\ m^{-2}$; CMP-22, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands; spectral range: 0.28–0.4 μm), air temperature (T_A , $^{\circ}C$; accuracy ± 0.4 ; sensor model CS215, Kipp & Zonen®), relative humidity (R_H , %; accuracy $\pm 4\%$; sensor model CS215, Kipp & Zonen®), black-globe temperature in the sun (T_G , $^{\circ}C$; accuracy $\pm 0.1\ ^{\circ}C$), black-globe temperature in the shade (T_G , $^{\circ}C$; accuracy $\pm 0.1\ ^{\circ}C$), wind speed (U , $m\ s^{-1}$; accuracy ± 0.5) and direction (U_d , degrees; accuracy $\pm 5^{\circ}$; Anemometer 03002, R.M. Young Company®) and daily precipitation (P , $mm\ h^{-1}$).

Thermal stress indicators

Intraperitoneal (T_{INT} , $^{\circ}C$), subcutaneous (T_{SC} , $^{\circ}C$), skin temperature (T_{SKIN} , $^{\circ}C$), and the respiratory rate (R_R , $breath\ min^{-1}$) and shade use were measured in lambs of Animal Agrivoltaic and in corral pen without shade.

Twenty days before the experimental period, miniature implantable biologgers (Star-Oddi, Reykjavik, Iceland, DST centi-T, accuracy $\pm 0.1\ ^{\circ}C$, range: 5 to 45 $^{\circ}C$) were surgically implanted within the intraperitoneal and subcutaneous cavity in 14 lambs to measure T_{INT} and T_{SC} . Previously the biologgers were calibrated and sterilized according to the manufacturer. Logging and storage of T_{INT} and T_{SC} was to record every minute during the experimental period. For measuring the T_{SKIN} , another bi-logger (i-buttom DS1922L, Maxin integrated, São José, US; size = 0.60 x 1.70 cm, height x diameter, accuracy ± 0.06 , $^{\circ}C$) was attached in a 10 x 10 cm shaved area, between the second and third posterior ribs, with the aid of an elastic belt. Logging and storage of T_{SKIN} was set to record every five minutes. During the experimental the T_{SKIN} logger was removed, and data retrieved every seven days.

The R_R was instantaneously sampled every 15 min, from 07:00 to 17:00h on 16 lambs, of which 8 in the Animal Agrivoltaic, and eight in the corral pen without shade, during 16 days along the study period. Two observers were positioned outside the pens (~2m apart from the animals) for visually counting the flank movements of lambs.

In the same the days of R_R assessments, other two observers instantaneously scanned the behavior (Table 2) of 16 lambs every five minutes, from 08:00 to 17:00h.

The shade-use behaviors of the lambs was scanned for two observers every five minutes (Martin and Bateson, 2007). The lying or standing of the lambs were recorded whether the lambs were ruminating or not. An animal was in shade when, at least, her head or one of her hooves was in the shade, otherwise, it would be in the sun. Ruminating was defined as chewing movements without there being feed in the mouth, feed regurgitation or both of them (Schütz et al., 2014); otherwise, idling was recorded. Lying was defined as when the flank of a heifer was in direct contact with the ground, otherwise, it was considered to be standing.

Animal performance

The dry matter intake (DMI, $\text{kg animal}^{-1} \text{ day}^{-1}$), daily weight gain (DWG, $\text{g animal}^{-1} \text{ day}^{-1}$), feed efficiency (FE, gain: feed ratio), feed conversion (FC, feed: gain ratio) and carcass yield (CY, kg animal^{-1}) were determined for all lambs. The DMI was given by:

$$DMI_{ijk} = \left(\sum_{j=1}^n FI_i \right) (dm_i/100)$$

where FI_i ($\text{kg animal}^{-1} \text{ day}^{-1}$) is the amount of feed ingested in the i^{th} visit in the feed bunk equipped with an electronic feeding system performed by j^{th} animal in the k^{th} ordinal day of feeding, and dm_i is the percentage of dry matter in the diet. The live weight of animals without feed and water withdrawal was recorded for every drinking event. By using this database, a spline function was fitted as follow:

$$w(x)_{jk} = \alpha + \beta_1 x_{jk} + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3 + \dots + \gamma_n z_n$$

where x is the k^{th} ordinal day from the feeding period registered in the j^{th} animal. The daily weight gain [1], feed conversion [2] and efficiency [3] were given as follows:

$$[1] \text{ ADG}_{jk} = w(x)_{jk} - w(x)_{jk-1}$$

$$[2] FC_i = \frac{DMI_i}{ADG_i}$$

$$[3] FE_i = \frac{ADG_i}{DMI_i}$$

At the end of experiment, after a 16-h of feed and water withdrawal, the animals were weighted to obtain the final body (FBW_i, kg animal⁻¹). They were then transported (191,4 km) to a commercial slaughterhouse, and the hot carcass weight (HCW, kg animal⁻¹) was obtained after complete evisceration and remotion of kidney, pelvic and heart fat of the carcass.

The carcass yield (CY) was obtained as follow:

$$CY = (HCW * 100) / BW_f$$

Economic and environmental outcomes of the two feedlot systems

Between August of 2021 or June 2022, the electricity generated by the photovoltaic panels was recorded every five minutes using a frequency inverter (Fronius 3kWp). The amount of equivalent CO₂ (CO₂-eq, kg) not emitted to the atmosphere was calculated using the 2019 daily Brazilian CO₂ emission factor for electric energy generation (for hydroelectric, wind, photovoltaic, and thermal; MCTIC, 2019).

Heat load experienced by feedlot sheep In_comfort Index (InCI)

Principal component analyses were used to classify the days on feeding based on meteorological conditions (T_A, H_R, R_S, U, W_S and T_G) experienced by the animals. Meteorological data were computed from January to December 2022. Principal components were obtained by computing eigenvalues (λ_i) and its respective eigenvectors $e'_i = [e_{i1} \ e_{i2} \ e_{i3}]$ from the correlation matrix. Bi-dimensional representation of the multidimensional set was created by using scores of the first ($PCA_{1j} = e_{11}T_A + e_{12}H_R + e_{13}R_S + e_{14}U + e_{15}W_S + e_{16}T_G$), and second principal component ($PCA_{2j} = e_{21}T_A + e_{22}H_R + e_{23}R_S + e_{24}U + e_{25}W_S + e_{26}T_G$). All principal components were used to develop an environmental index, the InComfort Index (InCI) for feedlot sheep based on the Membership Function Value Analysis:

$$InCI = \sum_{i=1}^n [R(\lambda_i)W(e_i)]$$

Where, n is the number of principal components and InCI is the weighted membership value calculated with principal components for each day linked with its meteorological condition and level of thermal comfort experienced by sheep (Maia et al., 2023). The

$R(\lambda_i)$ is given by

$$R(\lambda_i) = \frac{\lambda_i - \lambda_{i(\min)}}{\lambda_{i(\max)} - \lambda_{i(\min)}}$$

Where, λ_i is the value of i^{th} principal component, $\lambda_{i(\min)}$ and $\lambda_{i(\max)}$ are the maximum and minimum values of i^{th} principal component, respectively. The $W(e_i)$ is given by

$$W(e_i) = e_i / \sum_{i=1}^n e_i$$

Where, $W(e_i)$ is the weight of the i^{th} principal component among all the principal components selected for evaluating level of heat stress experienced by animals (Maia et al., 2023) on i^{th} day, and e_i is the contribution rate of the i^{th} principal component. The InCI were grouped into four classes: rainy days, when the mean is $0 \leq \text{InCI} \leq 1$, and precipitation rate above 20 mm day⁻¹; thermally comfortable days, when the mean is $0 \leq \text{InCI} \leq 0.4$; hot days, when $0.4 < \text{InCI} \leq 0.6$; and very hot days, when the mean is $0.6 < \text{InCI} \leq 1$.

Confirmatory analyses

The thermal stress indicators (rate respiratory and body temperatures) were analyzed as repeated measure, with animal as random, using General linear mixed models (Proc Mixed). Analysis of variance with fixed and random effects for rate respiratory and body temperatures were based on the following independent variables:

$$Y_{ijkLm} = \mu + P_i + A_j (P_i) + I_k + H_L + (PH_{iL}) + (HI_{ikL}) + e_{ijkl}$$

where Y_{ijkLm} is the m^{th} observation of the studied variables; μ is the parametric mean; P_i is the fixed effect of the i^{th} paddock (i = shade or exposed to sun); $A_j(P_i)$ is the fixed effect of the j^{th} animal inside the i^{th} paddock if $i=1$, $j= 1, \dots, 26$ if $i=2$, $j=27, \dots, 52$; I_k is the fixed effect of the k^{th} class of the InComfort Index ($I=1, \dots, 3$); H is the effect of the L^{th} class of time ($L=08h, 09h, \dots, 17h$), PH_{iL} is the interaction of the L^{th} class of time with the i^{th} picket and the HI_{ikL} is the interaction between the L^{th} hour class with the k^{th} class of the Incomfort Index; e_{ijkl} is the random error.

For the purpose of independent variables on performance (predict dry matter intake (a), average daily gain (b) and hot carcass weight (c) the confirmatory models were then fitted by applying conventional statistical techniques through mixed model

based on Generalized Least Squares (GLS) using the Statistical Analysis System [SAS Institute, Version 8. To choose the best fitted models that predict predict dry matter intake (a), average daily gain (b) and hot carcass weight (c) the following independent variables were considered:

$$Y_{ijkLm} = \mu + P_i + A_j(P_i) + \epsilon_{ijkl}$$

where Y_{ijkLm} is the m^{th} observation of the studied variables; μ is the parametric mean; P_i is the fixed effect of the i^{th} paddock (i = shade or exposed to sun); $A_j(P_i)$ is the fixed effect of the j^{th} animal inside the i^{th} paddock if $i=1$, $j= 1, \dots, 26$ if $i=2$, $j=27, \dots, 52$; ϵ_{ijlm} is the random error.

The shade-use was analyzed using nonparametric regression analyses through the Generalized Additive Models (GAM Procedure; Binary distribution), by fitting air temperature, black-globe temperature, relative humidity, solar irradiance, and wind speed as independent variables.

RESULTS AND DISCUSSION

To the best of our knowledge, this is the first study to determine the potential of an agrivoltaic system in comfort, performance, and sustainability in the finishing of sheep. Based on three main results, it is concluded that the agrivoltaic system improves thermal comfort, increases efficiency in weight gain and has the potential to mitigate methane. In conditions with high potential for thermal stress 41 hot days (60 days data base) whose probability is greater of triggering responses indicating thermal stress in the sheep (according to the InComfort Index, InCI, *Figure 2 and 3*) that shading from solar panels, increased shading use was more likely to when sheep were in and spend more time lying down and ruminating when compared to animals in the conventional feedlot ($P = 0.0001$, *Figure 4 and 5*) reduction of up to 0.7°C ($P = 0.0001$, *figure 8*) is subcutaneous temperature. Second, a better consumption and gain ratio with an increment of 5% for animals in the agrivoltaic system in relation to the conventional feedlot. A better consumption and gain ratio with an increment of 5% for animals in the agrivoltaic system in relation to the conventional feedlot ($P = 0.0001$, *Figure 6, 7 and table 2*). And third, the offset of which is close to 65% of the total $e\text{CH}_4$ emissions.

According to the classification Confort index (InCI, *Figure 2*), on these days there is a greater probability of causing thermal stress for the combined effects of solar irradiance, black globe, air temperature, relative humidity, wind speed and precipitation rate. The hot days from 09:00h to 15:00h, average solar radiation exceeded 600 W m^{-2} , air temperature around 30°C and black globe temperature around 40°C (*Figure 3*) with a maximum registered from 10:00am at 2:00 pm. Previous studies with hair sheep in a semi-arid environment have shown that under conditions similar to those experienced, these animals cope well with situations of high air temperature, but there is a cost to maintain the metabolic rate reflected in sensitive exchanges (Fonseca et al., 2019).

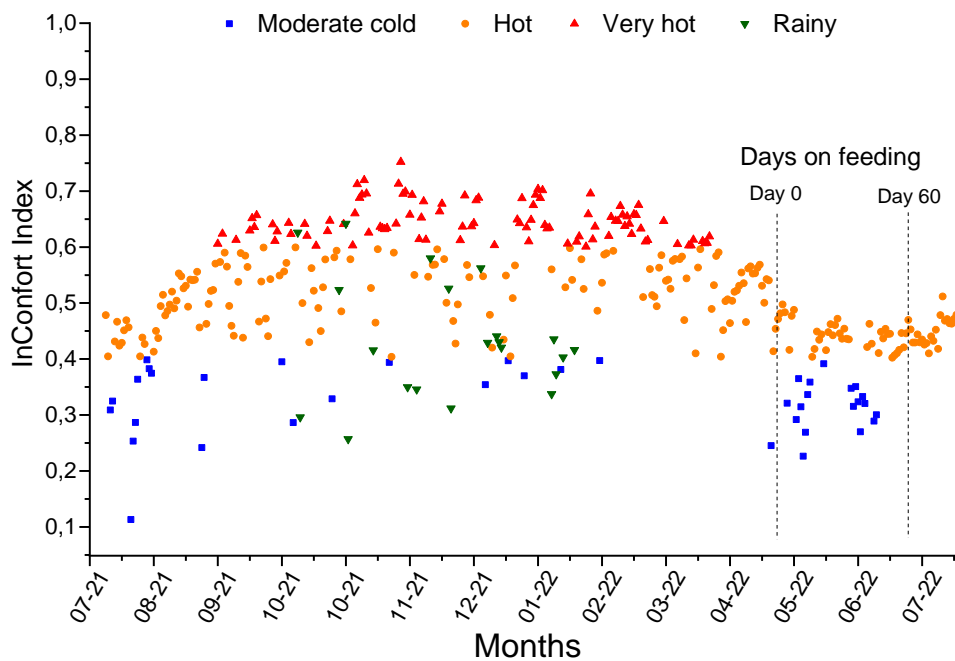


Figure 2. Distribution of day classes: moderate cold $0 \leq \text{InCI} \leq 0.4$; hot days $0.4 < \text{InCI} \leq 0.6$; very hot days and rain from precipitation rate above 20 mm day^{-1} over a year and along the confinement days.

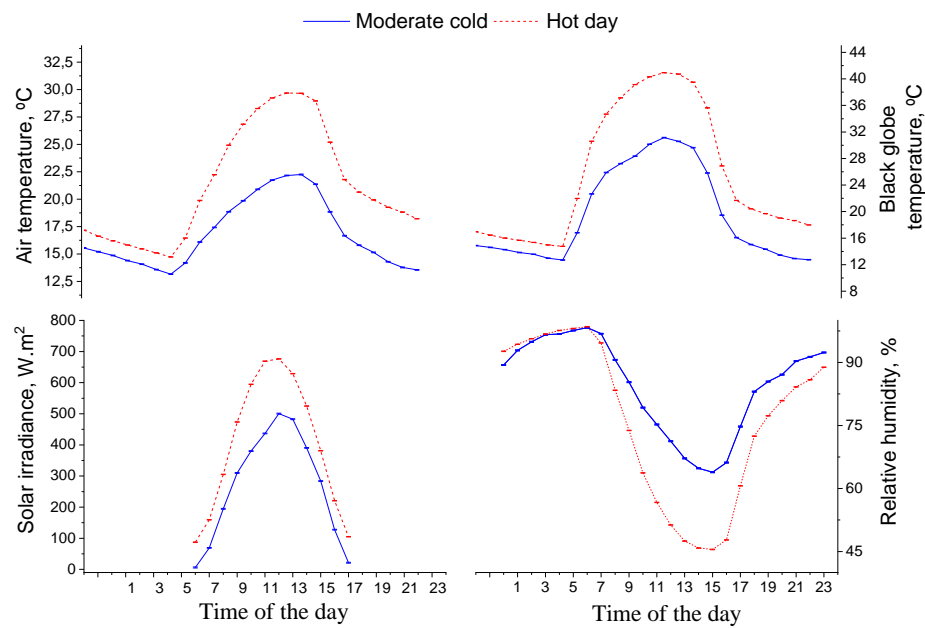


Figure 3. Least square mean (\pm SEM) of meteorological variables – Air temperature (T_{AR} ; °C), relative humidity (%), black-globe temperature (T_G ; °C) and Solar irradiance (R_S ; $W m^{-2}$) during confinement days.

Our results revealed that the animals choose to remain in the shade because of the solar panels, whose probability of staying in the shade was greater than 60% ($P = 0.0001$; *Figure 4*) regardless of the day class, especially after 08:00h in which they stay lying in the shade about 70% of the time (*Figure 5*). Of this total time, the animals spent 15% more lying down ruminating, mainly from 08:00h to 14:00h. The use of shade is closely related to radiation levels. This indicates that these animals were experiencing better thermal conditions, as most were lying down, a behavior indicative of thermal comfort (Gebremedhin et al., 2011). In summary, the expression of these behaviors was positively reinforced due to the relief of the heat load provided by the shade of the solar panels.

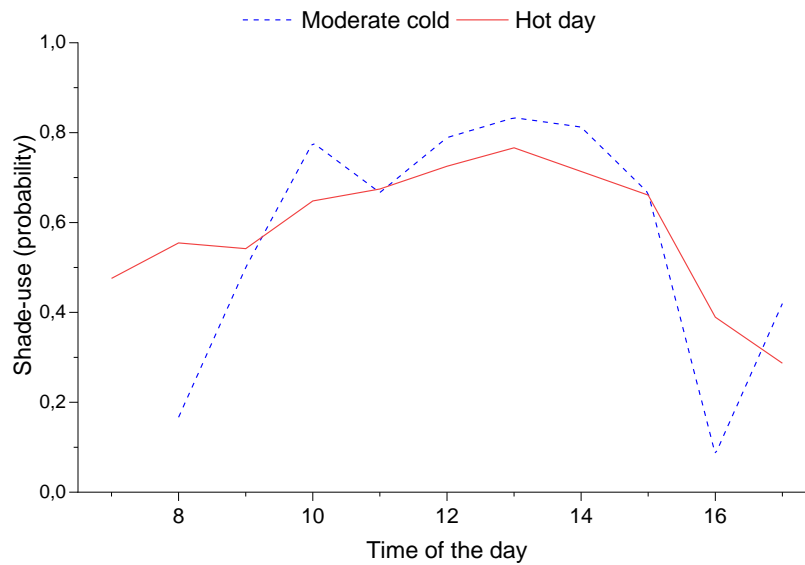


Figure 4. Use of shade in the animal agrivoltaic system from day classes: moderate cold ($Inc < 0.4$), hot ($0.4 < Inc < 0.6$) along the days.

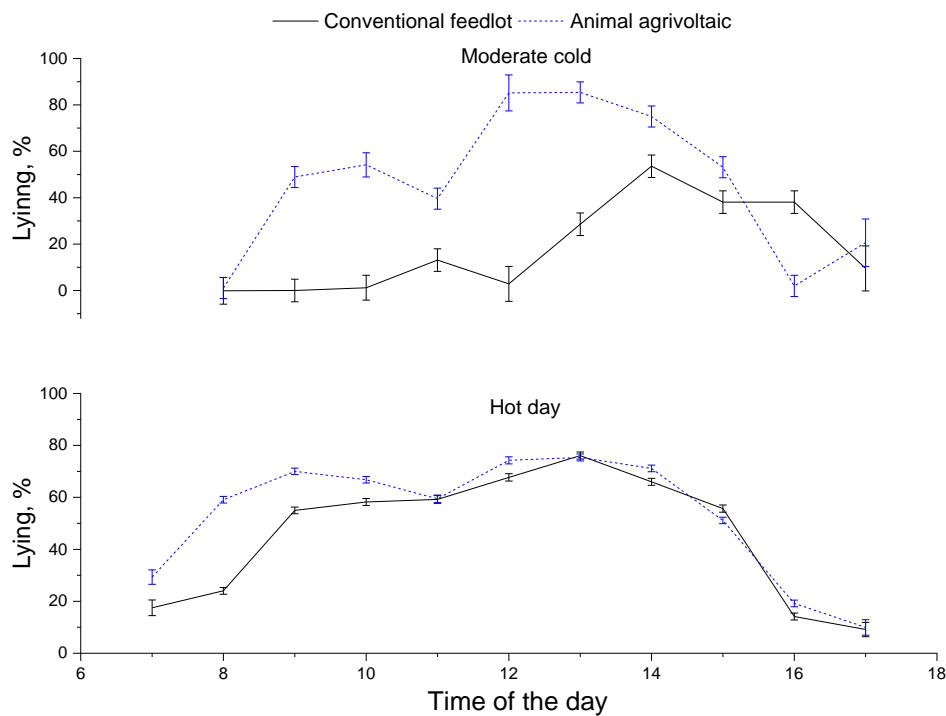


Figure 5. Total lying down time from day classes: moderate cold ($Inc < 0.4$), hot ($0.4 < Inc < 0.6$) along the days

Body temperatures gradually increase ($P = 0.0001$, Figure 6) from 06:00h with a peak at 16:00h. The shade of the panels allows these animals to be protected from a solar load of around 1000 Wm^{-2} and both on moderately cold and hot days, there is

a reduction in the load experienced, with the maximum intraperitoneal temperature recorded around 39.2°C and a reduction of 0.7°C in the subcutaneous temperature of animals in the agrivoltaic animal compared to animals accepted in the conventional feedlot. Skin temperature had a substantial increase, especially on hot days between 12:00h and 14:00h. The pattern of body temperature variation follows the range of variation in air temperature and radiation levels throughout the day. A similar pattern was observed by Titto et al. (2016) in Santa Inês sheep. Results by Faria et al. (2023) indicated that the availability of leftover panels allowed the maintenance of body temperature in a narrow range (~ 1.2 °C) with a decrease of 6°C in the body surface of heifers. In our study, the cost of maintaining a constant temperature was directly reflected in the respiratory rate, which is a sensitive indicator of the thermal condition experienced.

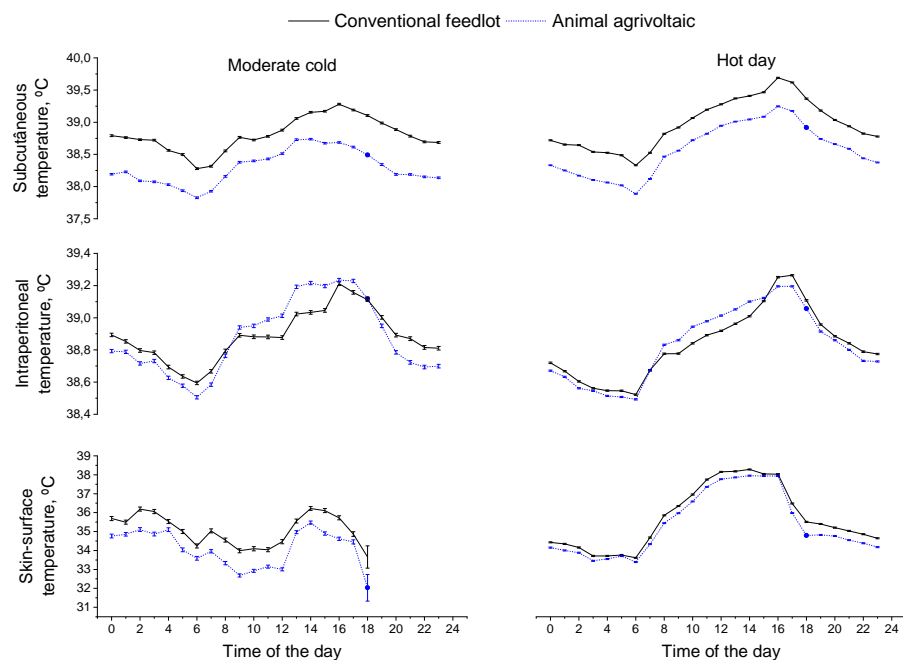


Figure 6. Least squares mean (\pm SEM) of body temperatures: subcutaneous temperature (T_{SC} , °C), intraperitoneal temperature (T_{INT} , °C) and skin-surface temperature (T_S , °C) days on feedlot.

The increments in the respiratory rate ($P = 0.0001$) indicate benefits from the shade of the panels, especially on hot days, with disponible on shading protection from radiation levels above 600 Wm^{-2} from 08:00h (Figure 7). On cold days, the rate ranged from 22 to 41 breath min^{-1} , while on hot days the respiratory rate reached 132 breath

min^{-1} in animals without protection from direct solar radiation. Respiratory rates recorded in this study indicate potential stress experienced by animals on hot days. Especially rates to above $100 \text{ breath min}^{-1}$ (Silanikove, 2000). Effect can be minimized with the structure of the panel, which can provide up to 40 Wm^2 less radiant thermal load compared to other artificial shades (Maia et al. 2020). If we consider the production systems, with similar conditions in this study where the animals are kept all the time in the field without shelter, it is possible to infer that the temperature gradient between the environment and the animals induces a greater loss of excessive heat during the night and high gain during the day as observed in hair sheep by Fonseca et al. (2019) in a semi-arid region characterized by high temperatures throughout the day and a sharp drop at night.

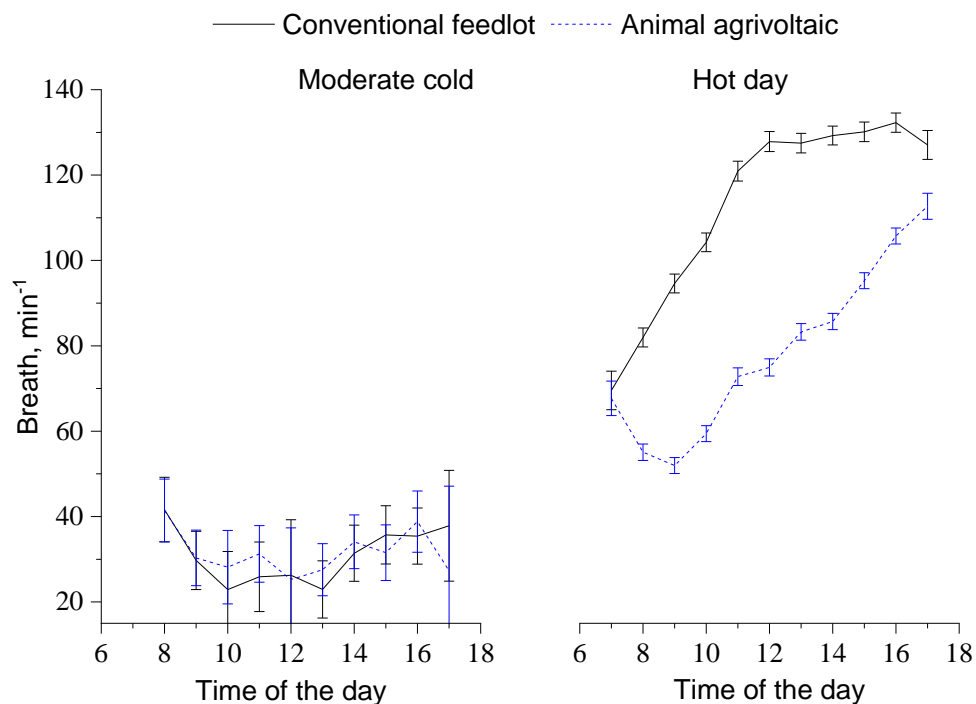


Figure 7. Mean (\pm SEM) of respiratory rate (RR; mov min^{-1}) during the feedlot period.

Regarding performance indicators, the animals in the agrivoltaic system had lower dry matter consumption when compared to the animals in the conventional system, the average difference is about 250 grams over the days of feedlot, which in percentage terms represent up to 11, 91% (Figure 8). Previous studies by Rojas-

Moreno et al. (2022) indicated that in a confinement system for sheep, the importance of feed in the production cost is 43.6%. According to these authors, the cost to produce 1 kg of carcass is around R\$1.33. If we consider this cost and the share of food costs within our study conditions, it is possible to infer that producing 1 kg of carcass in the agrivoltaic system is up to R\$0.16 less expensive than a system without shading.

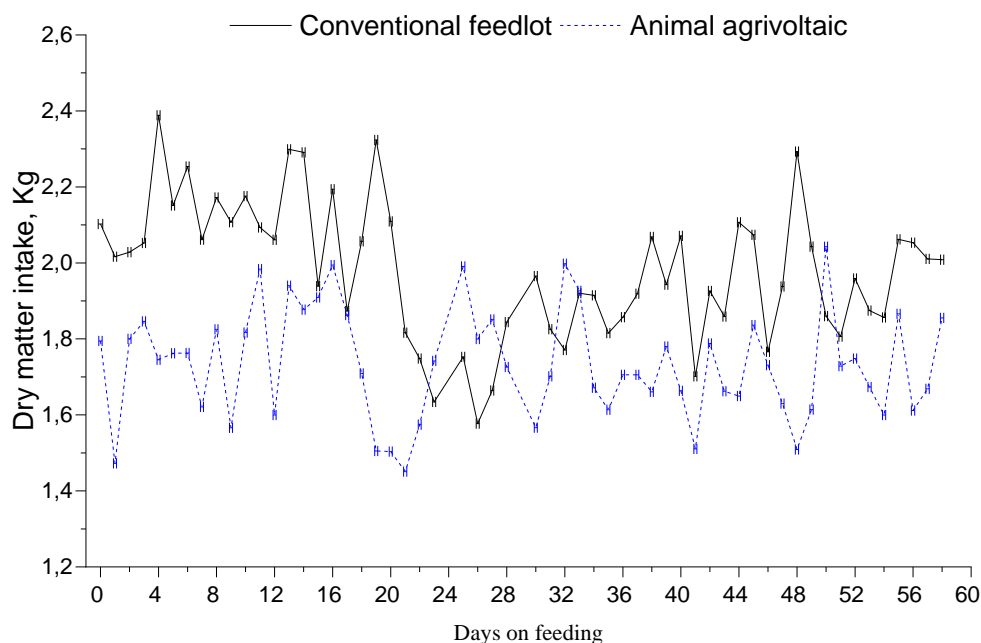


Figure 8. Dry matter intake (kg animal^{-1}) in relation to days of confinement by sheep kept in an agrivoltaic system and system conventional.

Despite the animals in the agrivoltaic system spending up to 25% more time in the trough ($P = 0.0001$; Figure 9) and having a similar number of visits, there was no difference in final weight ($P = 0.8853$), feed conversion ($P = 0.0605$), hot carcass weight ($P = 0.0630$) and carcass dressing ($P = 0.1500$). However, the average dry matter intake in the agrivoltaic system was $1.77 \text{ kg animal}^{-1}$ while the animals in the conventional system was $1.99 \text{ kg animal}^{-1}$ ($P = 0.0001$) which contributed to a 4% improvement in relationship gain efficiency of animals in the agrivoltaic system (Table 2). The improvement in performance indicators in the agrivoltaic system was probably due to the improvement in the thermal condition, which resulted in greater efficiency. The relationship between the hot environment and ruminants, especially about food intake (Alvarez et al., 2013; Rhoads et al., 2013; Hamzaoui et al., 2013) was quite

evident, however, studies did not bring information regarding the benefits of this hue and the direct impact on performance.

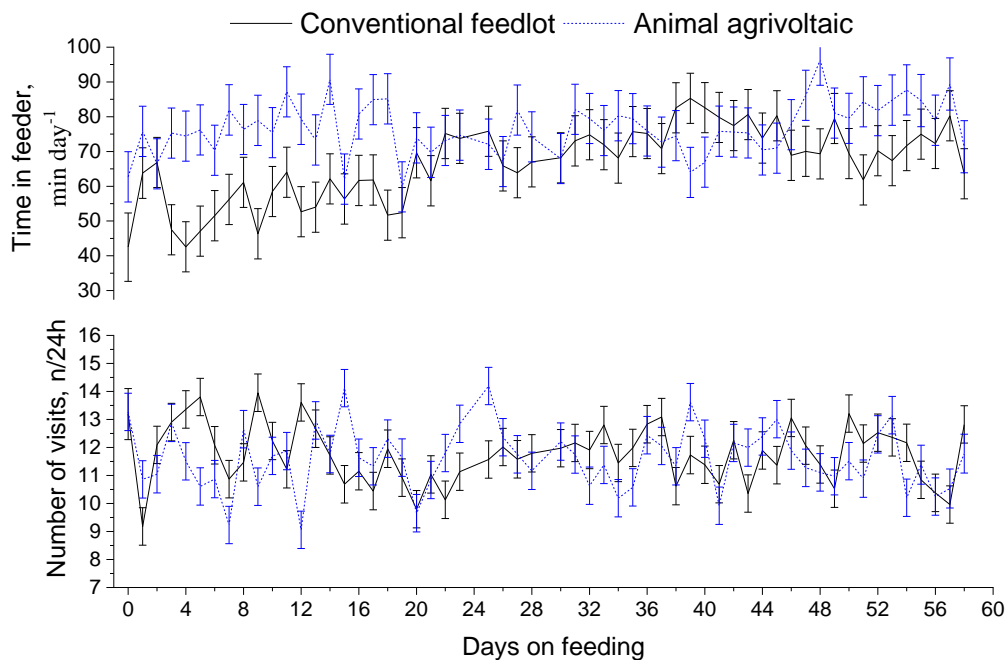


Figure 9. Time in the feeder (min day^{-1}) and number of visits by sheep kept in agrivoltaic system and conventional feedlot.

Table 2. Performance data (Least square means \pm SEM) the sheep in feedlot period.

	Farming system		SEM	<i>P</i> -value
	Conventional Feedlot	Animal Agrivoltaic		
Initial body weight, kg	35,75	35,87	0,0227	0,1605
Final body weight, kg	54,65	53,84	0,1984	0,8853
Average daily gain, kg d^{-1}	0,283	0,293	0,003	0,0605
Dry matter intake, kg d^{-1}	1,99	1,74	0,0157	0,0001
Food efficiency	16,25	17,07	0,1651	0,0002
Feed conversion	6,27	6,49	0,0862	0,0605
Hot carcass weight, kg	26,66	26,10	0,1239	0,0630
Carcass (%)	48,39	48,21	0,1919	0,1500

Were increasing environmental concerns about greenhouse gas emissions, the panels have potential to achieve net-zero emissions. In addition to these benefits in

terms of performance gains over a year (August 2021 to July 2022; *Figure 10*) generated 13.70 MWh of electricity which is a saving of US\$ 890,5, and avoiding the emission of around 3.79 ton of CO₂ if produced by burning fossil fuels. By taking into account enteric CH₄ emission of 30 g animal⁻¹ day⁻¹ or 0.81 kg of CO₂-eq (Patra, 2014; Hammond et al., 2014), 1.53 m² panels (nominal power of the solar panel = 530 W) the solar modules the offset of which 65% of the total eCH₄ emissions. Based on the level of emission, the area projected the panels 1,5 m² of shade per animal, the offset of which in close to the 100% enteric methane by the animals in the animal agrivoltaic.

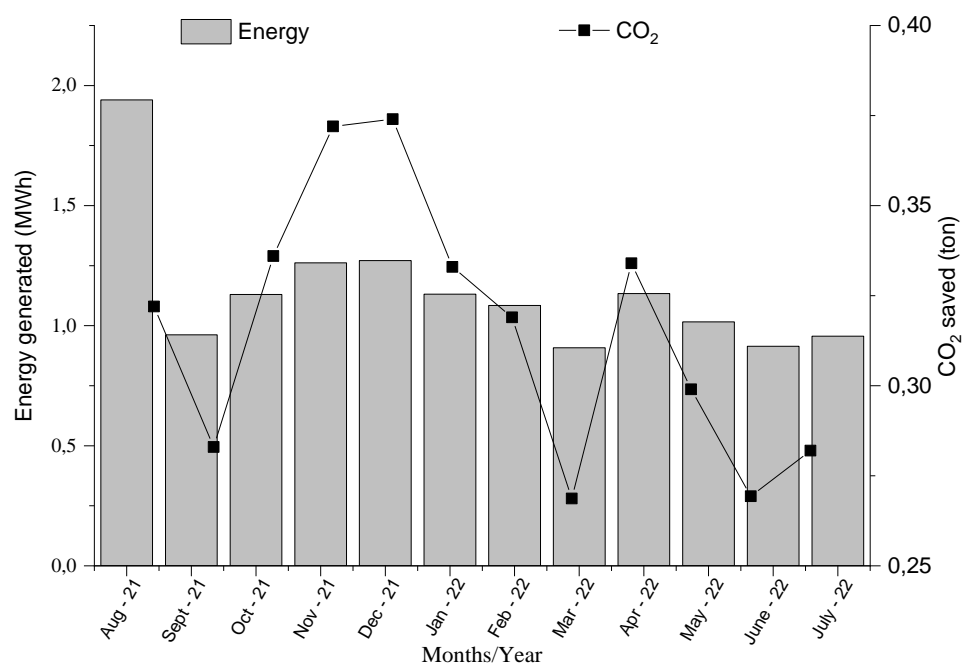


Figure 10. Energy generated by photovoltaic panels (bars) over a year and amount of CO₂ (points) not emitted into the atmosphere.

This study demonstrated that use of shade from solar panels significantly benefit sheep, reduced their body temperature and respiration rate, generated renewable electric energy, and provided a source of income. The amount of CO₂ saved by generating electricity by solar panels has the potential reduce de enteric methane The results suggest that Animal Agrivoltaics in sheep production systems in tropical areas provide improved animal welfare, lower the GHG emissions and provide a source of income.

CONCLUSIONS

Concluded that Animal Agrivoltaics in tropical systems have the potential and benefit in producing electricity, providing improved thermal comfort for sheep, offsetting enteric methane emission to the environment, and become a source of income to farmers.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the assistance of Valéria Araújo with data collection and Sao Paulo Research Foundation (FAPESP grant nº: 2021/02437-3) for granting the scholarship

COMPETING INTERESTS

The authors declare no competing or financial interests.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization: A.S.C.M., S.S.F., V.F.C.F.; Methodology: A.S.C.M., V.F.C.F.; Validation: A.S.C.M., V.F.C.F.; Data collection; S.S.F.; Analysis: A.S.C.M., S.S.F.; G.A.B.M., V.F.C.F.; Writing the original draft: S.S.F.; V.F.C.F.; Figures: S.S.F.;

REFERENCES

Camerro LZ, Maia ASC, Chiquitelli-Neto M, Costa CCM, Castro PA. Thermal equilibrium responses in Guzerat cattle raised under tropical conditions. **Journal of Thermal Biology**, (2016). 60:213-221.

Cezar MF, Souza BB, Souza WH, Pimenta Filho EC, Tavares GP, Medeiros GX. Avaliação de parâmetros fisiológicos de ovinos Dorper, Santa Inês e seus mestiços perante condições climáticas do trópico semiárido nordestino. **Ciência e Agrotecnologia**, (2004). v.28, n.3, p.614-620.

Faria AFPA, Maia ASC, Moura GAB, Fonseca VFC, Nascimento ST, Milan HFM, Gebremedhin KG. Use of solar panels for shade for holstein heifers. **Animals**, (2023). 13:3.329.

Fonseca VFC, Saraiva EP, Maia ASC, Melo Costa CC, SANTOS SGCG, Morais LKC, Fuller A, Chiquitelli Neto M. Training sheep for indirect calorimetry trials. **Small Ruminant Research**, (2019). v. 177, p. 36- 43.

Fonseca VFC, Culhari E, Moura GAB, Nascimento ST, Milan HFM, Maia ASC. Shade of solar panels relieves heat load of sheep managed in tropical áreas. **Available at SSRN**, (2023).

Gebremedhin KG, Lee CN, Hillman PE, Brown-Brandl TM. Body Temperature and Behavioral Activities of Four Breeds of Heifers in Shade and Full Sun. **Applied Engineering in Agriculture**, (2011). 27(6), 999–1006.

Hamzaoui S, Salama AAK, Albanell E, Such X, Caja G. Physiological responses and lactational performances of late-lactation dairy goats under heat stress conditions. **Journal Dairy Science** (2013). 96, 6355-6365.

Hinrichs RA, Kleinbach M, Reis LB. Energia e meio ambiente. 5ed. São Paulo. **Cengage Learning**, 2015.

IRENA (2017), Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Solar PV, IRENA and Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Abu Dhabi.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2021. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/>>

Maia ASC, daSilva RG, Battiston LCM. Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. **International Journal of Biometeorology**, (2005). 13;50:17–22.

Maia ASC, Milan HFM. RR Respiratory Rate-Frequência respiratória de animais de grande porte em condições de campo. Patente registrada. BR512016000418-5, depositada em 2015.

Maia ASC, Culhari EA, Fonsêca VDFC; Milan HFM, Gebremedhin KG. Photovoltaic panels as shading resources for livestock. **Journal of Cleaner Production**, (2020).258, 120551.

Maia ASC, Moura GAB, Fonseca VFC, Gebremedhin KG, Milan HFM, Chiquitelli-Neto M, Simão BR, Campanelli VPC, Pacheco RDL. Economically sustainable shade design for feedlot cattle. **Frontiers in Veterinary**. (2023).18.3389.

Marai IFM, El-Darawany AA, Fadiel A, Abdel-Hafez MAM. Physiological traits as affect by heat stress in sheep – A review. **Small Ruminant Research**, (2007). 71:1-12.

Martin, P, Bateson PPG, Bateson, P. **Measuring behaviour: an introductory guide**. Cambridge University Press, 2007.

McManus C, Hermuche P, Paiva SR, Silva FCP, Moraes JCF, Melo CB, Mendes C (2014) Distribuição geográfica de raças de ovinos no Brasil e sua relação com fatores ambientais e climáticos, como a classificação de risco para a conservação. Disponível em: <[http://www.arcoovinos.com.br/images/artigosTecnicos/Distribuicao Geografica de racas de Ovinos no Brasil.pdf](http://www.arcoovinos.com.br/images/artigosTecnicos/Distribuicao_Geografica_de_racas_de_Ovinos_no_Brasil.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2023

MCTIC. Brazilian Ministry of Science, Technology, Innovation and Communication. CO2 Emission Factors for the Generation of Electrical Energy in the Brazilian National Interconnected System; MCTIC: Brasilia, Brazil, 2019. Available online: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/search> (accessed on 1 January 2023).

National Research Council – NRC., 1985. Nutrient requirement of small ruminants animals. Washington, D.C. 292 p.

Oliveira SEO, de Melo Costa CC, de Souza Jr JBF, de Queiroz JPAF, Maia ASC, de Macedo Costa LL. Short-wave solar radiation level willingly tolerated by lactating

Holstein cows in an equatorial semi-arid environment. **Tropical animal health and production**, (2014). 46(8): 1413-1417.

Pereira EB, Martins FR, Gonçalves AR, Costa RS, Lima FJL, Ruther R, Abreu SL, Tiepolo GM, Pereira SV, Souza JG (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ed. São José dos Campos: INPE.

Pezzopane JRM, Nicodemo MLF, Bosi C, Garcia AR, Lulu J. Animal thermal Comfort indexes in silvipastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, (2019). 79:103-111.

Raineri C, Nunes BCP, Gameiro AH. Technological characterization of sheep production systems in Brazil. **Animal Science Journal**, (2015). v. 86, p. 476–485.

Ramos MJ. et al. Sistema agroindustrial da carne ovina no Oeste paranaense. **Revista de Política Agrícola**, (2014). p. 18–32.

Rojas-Moreno DA, Nascimento RA, Pena-Bermudez YA, Resende AT, Sartorello GL, Filho AS, Agostinho F, Bueno ICS, Gameiro AH. Can we obtain high productivity allied to environmental gains? Na energy-economic study af sheep meat production systems. **Journal of Cleaner Production**, (2022). 132722.

Santos SGCG, Saraiva EP, Gonzaga Neto S, Maia MIL, Lees AM, Sejian V, Maia ASC, Medeiros GR, Fonsêca VFC, Heat tolerance, thermal equilibrium and environmental management strategies for dairy cows living in intertropical regions. **Frontiers in Veterinary Science**, (2022).1772.

Santos MM, Azevedo M, Costa LAB, Silva Filho FP, Modesto EC, Lana ÂMQ. Comportamento de ovinos da raça Santa Inês, de diferentes pelagens, em pastejo. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, (2011). 33: 287-294.

Silanikove, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. **Livestock Production Science**, (2000). 67, 1-18.

Silva RG (2000) Um modelo para a determinação do equilíbrio térmico de bovinos em ambientes tropicais. *Revista Brasileira de Zootecnia* 29(4): 1244-1252.

Silva RG, Guilhermino MM, Morais DAEF. Thermal radiation absorbed by dairy cows in pasture. **International of journal Biometeorology**, (2010). 54:5-11.

Silva RG, Maia ASC, Costa LLM. Index of thermal stress for cows (ITSC) under high solar radiation in tropical environments. **International of journal Biometeorology**. (2015). 59:551-559.

Schütz KE, Cox NR, Tucker CB. A field study of the behavioral and physiological effects of varying amounts of shade for lactating cows at pasture. **Journal of Dairy Science**, (2014). 97:3599-3605.

Teixeira BE, Nascimento ST, Mós JVN, Oliveira EM, Santos VM, Maia ASC, Fonseca VFC, Passos BM, Murata LS. The potential of natural shade provided by Brazilian savanna trees for thermal comfort and carbon sink. **Science of The Total Environment**. (2022). 845:157324.

Vogeler, I., Beukes, P., & Burggraaf, V. Evaluation of nitrate leaching mitigation strategies in pasture dairy systems. **Agricultural systems**, (2013).115,21-28.