

Potencial de produção de carne carbono neutro por bovinos machos da raça Nelore em sistema silvipastoril com capim-Piatã e eucalipto: Embrapa Pecuária Sudeste - São Carlos, SP



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Pecuária Sudeste
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 142

Potencial de produção de carne carbono neutro
por bovinos machos da raça Nelore em sistema
silvipastoril com capim-Piatã e eucalipto:
Embrapa Pecuária Sudeste - São Carlos-SP

*Patrícia Perondi Anção Oliveira
José Ricardo Macedo Pezzopane
Alberto Carlos de Campos Bernardi
Alexandre Rossetto Garcia
Alexandre Berndt
André de Faria Pedroso
Ana Laura Januário Lelis
Sérgio Raposo de Medeiros*

Editores Técnicos

Embrapa Pecuária Sudeste
São Carlos, SP
2022

Embrapa Pecuária Sudeste
Rod. Washington Luiz, km 234
13560 970, São Carlos, SP
Caixa Postal 339
Fone: (16) 3411- 5600
www.embrapa.br/pecuaria-sudeste
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável**

Presidente
André Luiz Monteiro Novo

Secretário-Executivo
Luiz Francisco Zafalon

Membros
*Gisele Rosso, Mara Angélica Pedrochi
Maria Cristina Campanelli Brito, Silvia
Helena Piccirillo Sanchez*

Revisão de texto
Gisele Rosso

Normalização bibliográfica
Maria de Cléofas Faggion Alencar

Editoração eletrônica
Maria Cristina Campanelli Brito

Foto da capa:
José Ricardo Macedo Pezzopane

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Pecuária Sudeste

Potencial de produção de carne carbono neutro por bovinos machos da raça Nelore em sistema silvipastoril com capim-Piatã e eucalipto: Embrapa Pecuária Sudeste – São Carlos-SP / Patrícia Perondi Anchão Oliveira... [et al.]. – São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2022.

PDF 52 p.: il. (Documentos/ Embrapa Pecuária Sudeste, ISSN 1980-6841;142)

1. Capim-Piatã 2. Carbono neutro 3. Carne 4. Eucalipto 5. Nelore 6. Silvipastoril I. Oliveira, Patrícia Perondi Anchão. II. Pezzopane, José Ricardo Macedo. III. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. IV. Garcia, Alexandre Rossetto. V. Berndt, Alexandre. VI. Pedrosa, André de Faria. VII. Lelis, Ana Laura Januário. VIII. Medeiros, Sérgio Raposo de. IX. Título. X. Série.

CDD 636.291

Maria de Cléofas Faggion Alencar CRB 1258

© Embrapa, 2022

Autores

Patricia Perondi Anchão Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Energia Nuclear na Agricultura, pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

José Ricardo Macedo Pezzopane

Engenheiro-agrônomo, doutor em Física do Ambiente Agrícola, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Alberto C. de Campos Bernardi

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fertilidade do Solo e Adubação, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Alexandre Rossetto Garcia

Médico Veterinário, doutor em Reprodução Animal, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Alexandre Berndt

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ecologia de Agroecossistemas, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

André de Faria Pedroso

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência Animal e Pastagens, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Ana Laura Januário Lelis

Ana Laura Januário Lelis, zootecnista, mestre, doutoranda, Universidade Estadual Paulista, Dracena, SP

Sérgio Raposo de Medeiros

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência Animal e Pastagens, pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

Sumário

Introdução e objetivos	6
Caracterização das áreas Silvipastoril (SSP) e Pleno Sol (PS)	8
Balanço hídrico e transmissão de radiação	10
Análise química do solo	12
Manejo animal	14
Disponibilidade de forragem nas pastagens	18
Índices de conforto térmico nos sistemas	22
Desempenho animal e estimativa de emissões de metano entérico	26
Incremento florestal e fixação de carbono	37
Mitigação de CO ₂ eq. no sistema IPF	39
Conclusões	42
Agradecimentos	43
Bibliografia	43
Anexo 1 – Modelo usado para a estimativa de emissões pela fermentação entérica	48

Introdução e objetivos

A intensificação da produção observada no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo, aumenta a ciclagem e a eficiência de utilização dos nutrientes, reduz custos de produção, diversifica e estabiliza a renda na propriedade rural e viabiliza a recuperação de áreas com pastagens degradadas (Carvalho et al., 2001; Macedo, 2009; Salton et al., 2014).

O solo é meio heterogêneo formado por diversos componentes sólidos (minerais, orgânicos), líquidos e gasosos, que interagem entre si e com o ambiente externo. As mudanças no uso da terra alteram os processos biogeoquímicos do solo, com reflexos no estoque de C e no fluxo de gases entre o solo e a atmosfera (Maia; Parron, 2015). A matéria orgânica tem sido sugerida como um indicador-chave da qualidade do solo em sistemas ILPF, considerando sua influência nos demais atributos essenciais para que o solo desempenhe suas funções (Marchão et al., 2009).

Os sistemas de produção integrados com a presença de árvores são considerados alternativas para a produção sustentável de bovinos de corte (Oliveira et al., 2017), pois podem melhorar ambiência (Silva et al., 2014; Giro et al., 2019), o conforto térmico dos animais (Lemes et al., 2021) e a qualidade da forragem (Paciullo et al., 2007; Pezzopane et al., 2020a). A inclusão do componente arbóreo nos sistemas de produção aumenta o sombreamento das pastagens, o que pode provocar queda na produção de forragem (Oliveira et al., 2014; Pezzopane et al., 2020b) e, conseqüentemente, na lotação animal. Isso, em termos de produção animal, em muitas ocasiões, pode concorrer para anular os efeitos benéficos do melhor desempenho animal e do aumento da qualidade da forragem.

Contudo, a adoção dos sistemas de produção integrados não pode ser avaliada somente considerando-se esses aspectos. É importante analisar outros benefícios, como o melhor aproveitamento dos recursos naturais, especialmente terra, luz e água, a produção de biomassa total dos sistemas integrados (Oliveira et al., 2017; Sene et al., 2018), o aumento e a diversificação da renda (Martha Júnior et al., 2006; Vinholis et al., 2021), a melhoria da reprodução dos animais em sistemas sombreados (Lemes et

al., 2021) e a possibilidade do abatimento da emissão dos gases de efeito estufa pela presença do componente arbóreo e do aumento do sequestro de carbono no solo, entre outras vantagens (Ofugi et al., 2008; Oliveira et al., 2017; Tadini et al., 2021).

Com esse enfoque, a Embrapa lançou a marca-conceito Carne Carbono Neutro (CCN) (Alves et al., 2015), que visa atestar, por meio de um protocolo parametrizável e auditável, que a produção de carne bovina em sistemas de integração com a presença do componente arbóreo (silvipastoril ou agrossilvipastoril) possibilita neutralizar as emissões de metano entérico dos animais em pastejo. Para isso, é necessário realizar a validação do protocolo de produção de carne com neutralização das emissões de metano entérico em diferentes Biomas do Brasil. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de neutralização das emissões de metano entérico de bovinos pela fixação de CO₂ no componente arbóreo de um sistema silvipastoril (integração pecuária floresta - IPF), por meio da aplicação do protocolo de produção de Carne Carbono Neutro (CCN), na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP.

A produção de Carne Carbono Neutro em sistema silvipastoril, por mitigar as emissões de metano entérico dos bovinos com o sequestro de carbono pelas árvores de eucalipto, atende ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 13, que trata da ação contra a mudança global do clima e prevê medidas para combater a mudança do clima e seus impactos. No Brasil esse ODS tem como meta integrar a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC - lei nº 12.187/2009.) às políticas, estratégias e planejamentos nacionais, tendo sido elaborado o Plano Nacional sobre mudança do Clima – (Decreto n. 6.263/2010), com a inclusão de ações, indicadores e metas específicas de redução de emissões, como é o caso da produção de carne com abatimento das emissões de gases de efeito estufa por meio do sequestro de carbono pelo componente arbóreo dos sistemas de produção. Do ponto de vista social e econômico, os sistemas integrados permitem a diversidade de renda nos sistemas de produção de bovinos, pois produz produtos da cadeia da madeira e pode aumentar a produção de emprego e renda.

Caracterização das áreas Silvipastoril (SSP) e Pleno Sol (PS)

O trabalho foi realizado na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21°57'42" S, 47°50'28" W, 860m). A coleta de dados ocorreu entre dezembro de 2017 e fevereiro de 2019. O clima é classificado como tropical de altitude, Cwa (Köppen) (Rolim et al., 2007), com duas estações bem definidas: estação seca, de abril a setembro, que apresenta temperatura média de 19,9 °C e 250 mm de chuva, e estação chuvosa, de outubro a março, com temperatura média de 23,0 °C e 1.100 mm de chuva. O solo das áreas experimentais é Latossolo Vermelho Distrófico (Calderano Filho et al., 1998). Quando os resultados foram expressos por estação climática, os períodos considerados foram: verão de 21/12/2017 até 20/03/2018, outono de 21/03/2018 até 20/06/2018, inverno de 21/06/2018 até 20/09/2018 e primavera de 21/09/2018 até 20/12/2018.

Para as avaliações do sistema silvipastoril (SSP), utilizado para validação do sistema CCN, e do sistema a pleno sol (PS) foram utilizadas quatro áreas de três hectares (ha) para cada sistema (Figura 1). Essas áreas foram divididas em seis piquetes de 0,5 ha. A área experimental era muito uniforme quanto às condições edáficas e de relevo. Foram estabelecidos os sistemas de produção com duas repetições de área cada um, arranjadas dentro e fora das áreas plantadas com o eucalipto. As áreas SSP1 e 2 foram convertidas de sistema agrossilvipastoril para sistema silvipastoril e as áreas SSP3 e 4 foram estabelecidos originalmente como sistema silvipastoril. As áreas a pleno sol PS1 e 2 foram convertidas de sistema agropastoril implantado em 2007 para sistema pastoril e as áreas PS3 e 4 foram estabelecidas originalmente como sistema pastoril em manejo intensivo implantado em 2007 (Figura 1).

Até o ano de 2007, todas as áreas descritas eram formadas por pastagem de *Brachiaria decumbens*. Após 2007, esses sistemas sofreram renovações de pastagens, implantando-se o capim-piatã [*Urochloa* (syn. *Brachiaria*) *brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã].

A pastagem de capim-piatã foi manejada em pastejo rotacional intensivo, com bovinos de corte das raças Nelore e Canchim (5/8 Charolês + 3/8 Zebu), na fase de engorda. O período de ocupação de cada piquete era de seis dias e o de repouso de 30 dias, perfazendo ciclos de pastejo de 36 dias. No período entre 2013 e 2019, as áreas de pastagens receberam 132 kg de nitrogênio por hectare ao ano, em média, além da calagem e de fertilizantes com fósforo (P), potássio (K), enxofre (S) e micronutrientes para a correção da acidez e dos níveis de fertilidade do solo.

No sistema silvipastoril, os eucaliptos (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) foram plantados em abril de 2011, em fileiras simples, com orientação próxima a leste-oeste e espaçamento de 15 m x 2 m (15 m entre fileiras e 2 m entre árvores nas fileiras), o que resultou em densidade populacional de 333 árvores/ha. Em julho de 2016, essas áreas foram desbastadas, o que consistiu no corte de 50% das árvores em cada linha. O espaçamento foi alterado para 15m x 4 m (165 árvores ha⁻¹).

Embora no período experimental todas as áreas estivesse no sistema pastoril, duas áreas de cada sistema, PS1 e PS2 no sistema a pleno sol, e SSP1 e SSP2 nos sistemas silvipastoril (Figura 1), foram manejadas até o ano de 2018 em sistema de integração lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta, com renovação da pastagem em um terço de cada área (dois piquetes) por ano safra. Para isso, a *Urochloa brizantha* cv. Piatã foi semeada simultaneamente com o milho (*Zea Mays* L. var. DKR 390 PRO 2) para silagem. Essa renovação da pastagem foi realizada nas safras 2013/2014, 2014/2015, 2016/2017 e 2017/2018.



Figura 1. Croqui da área experimental com destaque para as quatro áreas do sistema silvipastoril (SSP1 a SSP4), utilizadas para a validação do protocolo CCN, e das quatro áreas do sistema a pleno sol (PS1 a PS4), em São Carlos, SP. Adaptada de imagem cedida pela empresa Airscout

Balanco hídrico e transmissão de radiação

Na Figura 2, estão apresentados o balanço hídrico climatológico e a transmissão da radiação fotossinteticamente ativa durante o período de coleta de dados para a validação do protocolo Carne Carbono Neutro (CCN). As condições climáticas se comportaram dentro do padrão de normalidade nesse período experimental, considerando as médias históricas. Nos dois

verões (2017/2018 e 2018/2019), houve excedentes hídricos e elevados níveis de armazenamento de água no solo. O período de seca estacional iniciou-se em meados de abril de 2018 e encerrou-se no final de setembro. Apesar disso, durante os meses de agosto e setembro ocorreram chuvas, o que proporcionou níveis satisfatórios de água no solo (armazenamento próximo a 60 mm).

Para avaliar o efeito das árvores de eucalipto sobre a incidência de luz na pastagem, foram realizadas medidas contínuas da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em um transecto (linha perpendicular ao renque de eucaliptos) com quatro sensores no sistema SSP. Os valores foram relacionados com um sensor localizado na área externa (sistema a pleno sol). A transmissão (média dos sensores) da radiação fotossinteticamente ativa variou durante o período experimental em função do movimento aparente do sol e orientação das linhas do plantio (leste-oeste). As maiores transmissões da RFA ocorreram nas estações de primavera e verão (médias próximas a 55%). No período de outono e inverno, com maior influência da copa das árvores sobre a incidência da luz solar, as transmissões de RFA foram menores, em torno de 38%. Considerando todo o período experimental, ocorreu uma redução de cerca de 45% da incidência de radiação solar causada pela presença das árvores.

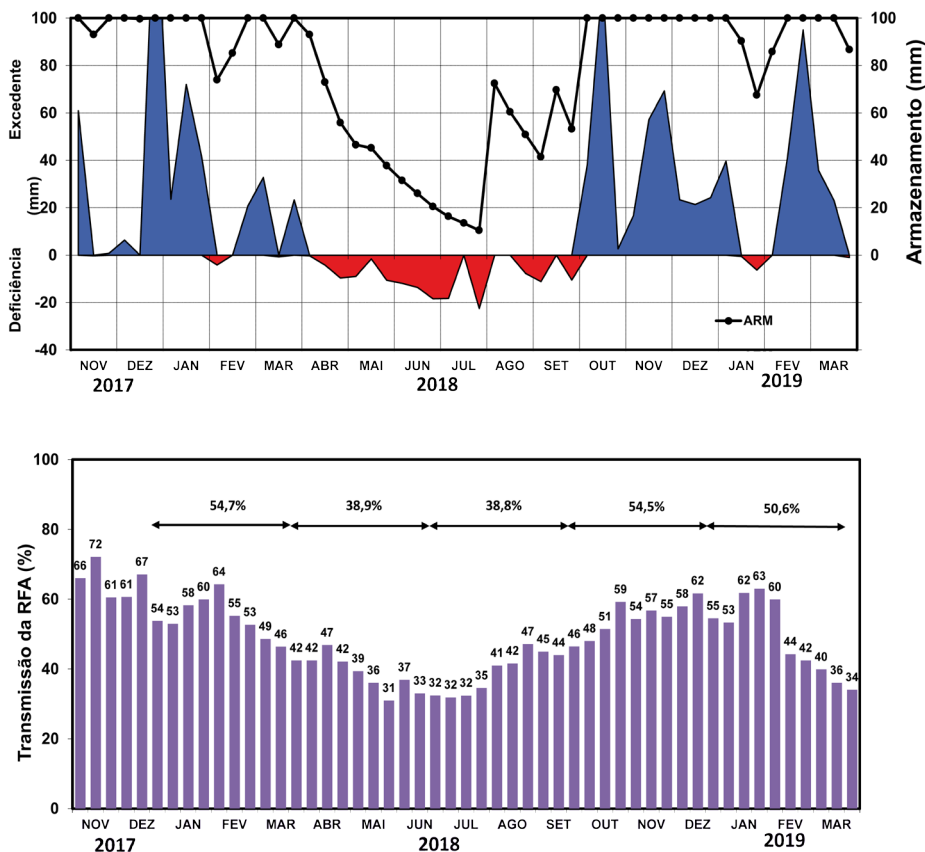


Figura 2. Extrato do balanço hídrico (acima) e transmissão decenal e por estação do ano da radiação fotossinteticamente ativa pelas árvores de eucalipto em sistema silvipastoril (abaixo) durante o período de novembro de 2017 a março de 2019 em São Carlos, SP.

Análise química do solo

Nas áreas de produção utilizadas para a validação do protocolo CCN, o solo foi amostrado anualmente, coletando-se seis subamostras a 0-0,2 m de profundidade, em cada um dos seis piquetes de 0,5 ha de cada uma das quatro repetições de sistemas de produção para as condições de pleno sol e

silvipastoril. As seis subamostras foram homogeneizadas para compor uma amostra por piquete. As amostras foram secas ao ar e peneiradas (2 mm). As propriedades químicas foram determinadas segundo Primavesi et al. (2005). As medições de pH do solo foram feitas em água e CaCl_2 , o carbono orgânico foi determinado por combustão úmida e o P disponível foi avaliado pelo método da resina. Determinou-se a acidez potencial (H+Al) pelo método do pH SMP. Também foram medidos K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} . A capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%) e por Al^{3+} (m%) foram então calculadas. Os resultados apresentados na Tabela 1 são a média de 24 amostras coletadas em cada sistema de produção (6 piquetes x 4 repetições).

A partir dos resultados da análise química, estabeleceu-se a recomendação de calcário e fertilizantes com base em Cantarella et al. (2002) e Oliveira et al. (2014) para cada piquete, conforme descrito por Bernardi et al. (2019). Para isso são utilizados os critérios: calagem (calcário dolomítico, PRNT 70%) para aumentar a saturação de base para 60%, adubação com o P (superfosfato simples, 18% P_2O_5) para aumentar o solo P para 15 mg dm^{-3} , e o K em 3% da CTC. A adubação com N varia em função da lotação animal e condições climáticas, tendo sido fornecido 150 kg ha^{-1} de N no período de estudo.

Os resultados da análise química de solo determinam a disponibilidade de nutrientes no solo e os elementos químicos que podem ser limitantes ao crescimento das culturas. Estes resultados possibilitam a correção do solo e adubação, bem como o monitoramento e avaliação periódica do balanço dos nutrientes no solo (Cantarella et al., 2002; Bernardi et al., 2012, 2019). Comparando-se os resultados obtidos nos dois anos avaliados (2017 e 2018) (Tabela 1), os parâmetros de fertilidade do solo estão sendo mantidos em níveis adequados. Isso se deve ao processo de correção do solo e adubação utilizados na área, que tem possibilitado a correção e manutenção da fertilidade do solo, como já havia sido descrito por Bernardi et al. (2019).

Considerando-se as classes de interpretação propostas por Raji et al. (1996) e Alvarez Venegas et al. (1999), os atributos pH, matéria orgânica (M.O.), P, K, CTC, V% estão em sua maioria na classe considerada média. Valores abaixo dos níveis estabelecidos como adequados são corrigidos, como foi o caso do P no sistema sombreado no início do estudo (2017), que no ano seguinte já apresentou valores significativamente mais altos, em razão do fornecimento deste nutriente. Houve uma variação significativa nos teores

de M.O. entre o início e o final do período em estudo, com aumento de 21% dos teores na área com sombra e redução de 20% nas áreas a pleno sol. Mesmo com as variações, os teores continuaram na classe de interpretação considerados médios (Alvarez Venegas et al., 1999). Destaca-se que estas variações da M.O. estiveram positiva e significativamente relacionadas às variações dos teores de P lábil ($r = 0,408$ e $\text{Prob} \leq 0,001$).

A redução significativa da acidez do solo, da acidez trocável e da saturação por Al^{3+} e o aumento dos níveis de Ca, Mg e da soma de bases, e sua manutenção nas classes de interpretação consideradas alta, refletem o efeito positivo da calagem superficial sem incorporação, que vem sendo implementada em ambos os sistemas. Isso confirma os efeitos benéficos e a eficácia dos corretivos aplicados na superfície do solo já relatados por Caires et al. (2000), Luz et al. (2001), Oliveira et al. (2014) e Primavesi et al. (2008).

Tabela 1. Atributos químicos do solo dos sistemas silvipastoril sombreado e do sistema a pleno sol, avaliados nos anos de 2017 e 2018 em São Carlos – SP.

Sistemas	pH (água)	pH (CaCl_2)	M.O. (g dm^{-3})	P_{res} (mg dm^{-3})	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+} (mmol dm^{-3})	H+Al	SB	CTC	V (%)	m
2017													
SSP	6,0	5,3 a	27,1 Bb	9,2 Bb	2,1	24,9 Ba	10,8 Ba	0,7 A	30,3 Aa	37,8 Ba	68,2 a	55,2 B	2,1 A
Pleno sol	5,9 B	5,1 Bb	33,7 Aa	16,4 a	1,9	22,2 Bb	9,6 Bb	0,6 A	25,4 Ab	33,7 Bb	59,1 Bb	57,1 B	1,9 A
2018													
SSP	6,1	5,4	32,8 Aa	13,2 A	1,8	28,7 Ab	13,1 A	0,3 B	25,4 Ba	43,7 Ab	69,0 b	62,3 Ab	0,8 B
Pleno sol	6,2 A	5,5 A	26,8 Bb	13,5	1,9	35,4 Aa	15,1 A	0,1 B	22,3 Bb	52,3 Aa	74,7 Aa	69,0 Aa	0,3 B

Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes indicam diferenças nos anos. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças nos tratamentos pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

Manejo animal

Nas áreas experimentais, foram alocados 32 machos bovinos não-castrados contemporâneos da raça Nelore. Animais da mesma categoria da raça Canchim foram alocados dinamicamente nas áreas de pastagens para controle de carga. Ao início do trabalho, os animais tinham $26,4 \pm 1,4$ meses e $357,1 \pm 33,8$ kg. Anteriormente ao período experimental, os bovinos foram criados sob as mesmas condições de manejo ambiental. Os animais experimentais foram separados em oito lotes contendo quatro animais cada

um, distribuídos em dois tratamentos (sistemas de produção a pleno sol ou sombreado com eucalipto) com quatro repetições de área cada um. Os animais foram mantidos sob iguais condições sanitárias, com acesso *ad libitum* à água em bebedouros automáticos e à mistura mineral em cochos cobertos localizados no centro de manejo de cada área experimental.

O manejo sanitário seguiu as recomendações preconizadas para a espécie regularmente adotadas pela Embrapa. Os protocolos de pesquisa foram previamente submetidos e aprovados pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Embrapa Pecuária Sudeste (Protocolo CEUA-CPPSE, Declaração 07_2017).

As pastagens foram submetidas ao ajuste de lotação animal usando a técnica do “*put and take*” (Mott e Lucas, 1952) e avaliação da disponibilidade de forragem. A técnica do “*put and take*” consiste em ajustar a lotação animal periodicamente para compensar as mudanças na disponibilidade de forragem. O objetivo é manter a pressão de pastejo o mais próximo possível da capacidade de carga durante o período experimental (Petersen, 1994). O ajuste na disponibilidade de forragem foi baseado na altura do resíduo pós pastejo de 20 cm recomendada para o capim piatã, de acordo com Costa e Queiroz (2017). A carga animal obtida é transformada em animais equivalentes aos traçadores para obtenção da lotação animal (bovinos machos Nelore/ha neste caso), e é aplicado o ganho de peso médio dos traçadores e o rendimento de carcaça a essa lotação para o cálculo da produção de peso vivo e de carcaça por hectare em um determinado período de tempo.

No período de maio a outubro, época que historicamente coincide com a menor disponibilidade de forragem no tipo climático tropical de altitude, os animais receberam suplementação de silagem de capim mais milho, disponibilizada em cochos localizados no centro de manejo de cada subsistema de produção, de forma a preservar o resíduo pós pastejo das pastagens, conforme recomendação de Costa e Queiroz (2017), e manter a condição corporal dos animais. Os cochos foram dimensionados para oferecer pelo menos 0,70 m linear de acesso a cada animal experimental.

A suplementação de volumoso era ofertada diariamente, uma vez ao dia, entre 9h e 10h, sendo a oferta equacionada para não haver sobras diárias. Quando presentes, as eventuais sobras de alimento eram removidas antes da oferta

de nova refeição. A composição bromatológica do volumoso suplementar oferecido está demonstrada na Tabela 2.

Tabela 2. Qualidade bromatológica da silagem usada para a suplementação dos animais no período de escassez de alimentos.

Amostragem da silagem fornecida	MS (%)	PB (%)	FDN (%)	FDA (%)	MM (%)	EE (%)	LIG (%)	DIV (%)
Silagem (11/06/2018)	25,86	8,60	56,83	32,36	6,25	2,11	2,29	62,40
Silagem Capim + 1/4 milho (13/07/2018)	25,04	9,04	62,45	43,40	9,30	2,62	3,01	60,07
Silagem Capim + Milho (19/06/2018)	28,60	8,79	56,49	34,10	6,23	1,07	2,76	60,94

Legenda: Matéria seca (MS), proteína bruta (PB), fibra detergente neutro (FDN), matéria mineral (MM), extrato etéreo (EE), lignina (LIG) e digestibilidade *in vitro* da matéria seca.

Os animais foram pesados no início e fim do período experimental com e sem jejum de sólidos de 16 horas. Durante a fase experimental, os animais foram pesados sem jejum, mensalmente. O ganho de peso médio diário de cada animal em cada estação climática foi calculado, dividindo-se o ganho total (diferença entre os pesos em jejum) no período pelo número de dias decorridos.

A produção de peso vivo por hectare foi calculada multiplicando-se o ganho de peso médio diário (média dos animais traçadores) pela lotação animal do período em bovinos por hectare. A produção de carcaça foi obtida pela multiplicação da produção de peso vivo por hectare pelo rendimento de carcaça. Após as ponderações da técnica do “*put and take*”, a lotação animal foi calculada por hectare em UA (unidade animal = 450 kg/UA) e em bovinos por hectare (considerando-se a média de peso dos bovinos traçadores).

Os animais foram abatidos com 38 meses de idade, em um frigorífico comercial para obtenção do rendimento de carcaça. Antes do abate, os animais foram mantidos em jejum sólido por 16 horas, recebendo apenas água *ad libitum* e foram transportados para o abatedouro de acordo com cada uma das quatro repetições de cada tratamento (Figura 1).

Os animais foram dessensibilizados por concussão cerebral através de pistola pneumática e sangrados através da veia jugular. As carcaças foram penduradas pelo tendão de Aquiles sem estimulação elétrica. Cabeças, pés, couros e órgãos viscerais foram removidos.

No final da linha de abate, as carcaças foram pesadas para obtenção do peso de carcaça quente (PCQ), a fim de se calcular o rendimento de carcaça (%) de cada animal. O rendimento de carcaça quente (RCQ) foi obtido pelos dados da razão entre o peso de carcaça e o peso vivo dos animais (PV), em porcentagem, de acordo com a equação:

$$RCQ (\%) = \left(\frac{PCQ}{PV} \right) \times 100$$

As repetições dos sistemas de produção foram consideradas como unidades experimentais quando os dados obtidos foram expressos por área, e os machos bovinos foram considerados como unidades experimentais para os dados obtidos por animal. Os dados foram analisados estaticamente usando o programa SAS 9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Antes das análises, os dados foram analisados para a presença de “outliers” e a normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk). Foi utilizado o procedimento para modelos mistos (PROC MIXED), e a estação foi considerada uma medida repetida (split-plot in time). Para escolha da melhor matriz dentre as 15 diferentes estruturas de covariância testada, foi usado o critério do menor valor do Corrected Akaike Information Criterion (AICC) (Wang e Goonewardene, 2004). O modelo incluiu os efeitos de tratamento (dois tipos de pastagens), as quatro estações climáticas e a interação entre eles, como fatores fixos. O efeito da repetição de área foi considerado como efeito aleatório. Na presença de interação tratamento*estação, foi realizado o desdobramento usando o SLICE command of Mixed Procedure. Os efeitos dos tratamentos foram separados pela opção do PDIFF do SAS.

Disponibilidade de forragem nas pastagens

Durante o período de fevereiro de 2018 até janeiro de 2019, foram realizadas coletas de forragem disponível aos animais no pré-pastejo. As amostras foram obtidas por meio do corte da forragem ao nível do solo em quadrados amostrais de 0,5 m x 0,5 m (0,25 m²) lançados de maneira aleatória nos piquetes de cada um dos sistemas de produção, em um total de quatro subamostras por piquete. As subamostras de cada piquete foram pesadas individualmente, sendo posteriormente misturadas e retiradas duas subamostras, uma para a determinação da matéria seca para a estimativa da disponibilidade de forragem no pré-pastejo e outra para separação das frações folha, colmo e material morto. A amostragem foi realizada em 10 ciclos de pastejo. Os resultados encontram-se nas Figuras 3 e 4.

Nos ciclos amostrados nos períodos de primavera e verão, a disponibilidade de forragem a pleno sol foi superior em relação ao SSP. Na média, a produção no SSP foi cerca de 40% menor em comparação ao sistema a pleno sol (Figura 3), em consequência provavelmente do sombreamento imposto pelas árvores, que ficou em cerca de 45% da RFA nas estações da primavera e verão (Figura 2). A literatura indica que as forrageiras tropicais apresentam tolerância ao sombreamento em níveis de até 35%, a partir de quando se inicia o decréscimo da produção (Lopes et al., 2017; Pezzopane et al. 2020a). Uma das alternativas para a manutenção da produção no sistema silvipastoril é o manejo do componente arbóreo, com operações de desrama e desbaste das árvores.

Na Figura 4, estão apresentados os dados da composição morfológica da pastagem nos dois sistemas de cultivo. Nos ciclos de junho a setembro, os dois sistemas apresentaram elevadas proporções de material morto, em função do período de seca estacional na região (Figura 2). Apesar de apresentar menor oferta de forragem nos ciclos de primavera e verão, no sistema silvipastoril ocorreram maiores proporções de folhas na forragem de pré-pastejo.

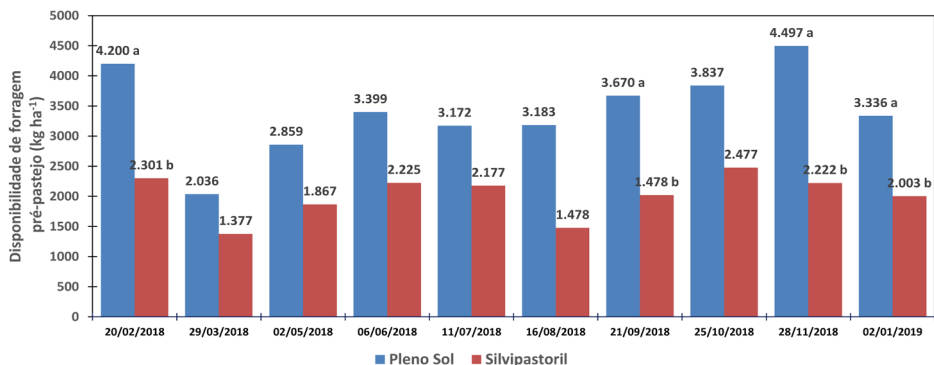


Figura 3. Matéria seca de forragem disponível no pré-pastejo nos piquetes estabelecidos a pleno sol e no sistema silvipastoril de eucalipto consorciado com braquiária para validação do protocolo CCN em São Carlos, SP. Média seguida por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste t a 5% de probabilidade.

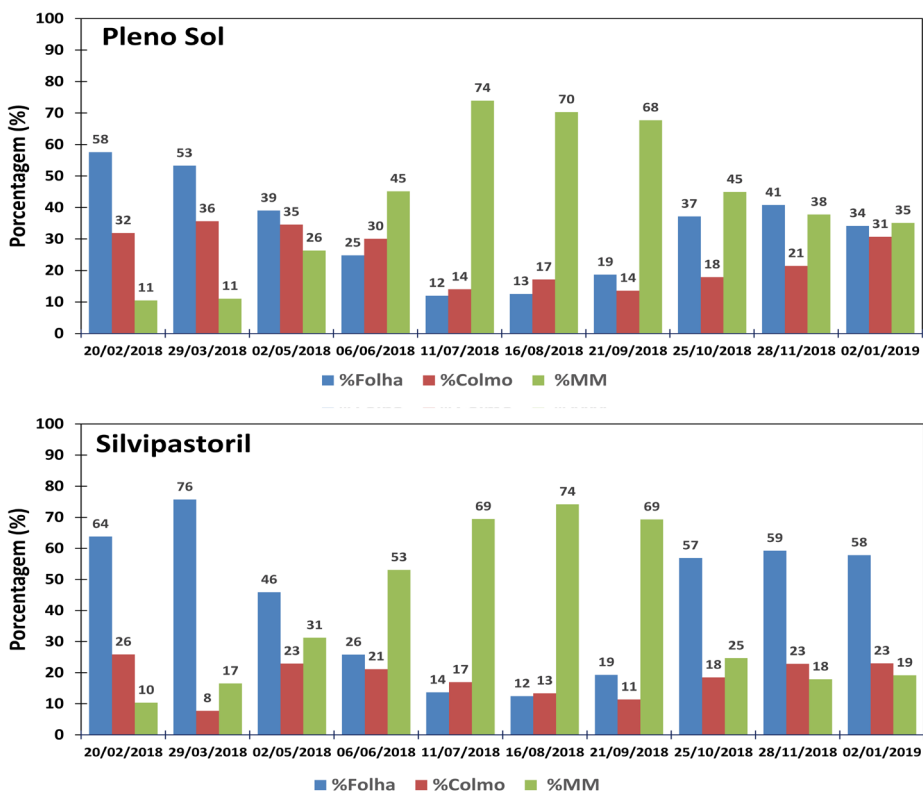


Figura 4. Porcentagem das frações folha, colmo e matéria morta (MM) de forragem no pré-pastejo nos piquetes estabelecidos a pleno sol e no sistema silvipastoril de eucalipto consorciado com braquiária para validação do protocolo CCN em São Carlos, SP.

As amostras de forragem disponível no pré-pastejo foram encaminhadas ao laboratório para a determinação do valor nutritivo, e foram analisadas pela técnica de FT (Transformada de Fourier) - NIR utilizando-se um espectrômetro modelo NIRFlex N-500 com interferômetro de polarização (Büchi, Flawil, Suíça). Essas medidas foram realizadas utilizando-se um modelo de calibração desenvolvido e validado pela Embrapa Pecuária Sudeste, especificamente para espécies e cultivares de *Urochloa* spp. Por esse método foram determinados os teores de proteína bruta (PB), digestibilidade in vitro (DIV), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), matéria mineral (MM) e extrato etéreo (EE).

Na Figura 5, estão apresentados os dados relativos ao valor nutritivo das pastagens nos sistemas a pleno sol e silvipastoril. O teor de proteína bruta variou entre 3,5% e 9,6% no sistema a pleno sol e entre 7,0% e 16,8% no sistema silvipastoril, com diferenças estatísticas em todas as coletas. Já a digestibilidade in vitro variou entre 26,3% e 53,2% no sistema a pleno sol e entre 26,8% e 69,2% no sistema silvipastoril. Nos dois sistemas, os teores de proteína e digestibilidade foram maiores na primavera e verão em comparação ao outono e inverno. Sistemas sombreados frequentemente são associados aos maiores teores de PB e digestibilidade (Paciullo et al., 2011; Oliveira et al., 2014; Pezzopane et al., 2020a). Durante a condução do experimento, as maiores diferenças desses parâmetros foram obtidas na primavera e verão de 2019, quando o sistema apresentou maior sombreamento em relação ao verão de 2018 (Figura 2).

Os teores de FDN e FDA apresentaram comportamento inverso à PB e digestibilidade ao longo dos ciclos, com maiores valores médios nos ciclos de outono/inverno. Nos ciclos de crescimento de verão (2018 e 2019), os valores de FDN foram superiores no sistema a pleno sol em comparação ao sistema sombreado, o que pode ter sido influenciado pelo maior teor de colmos (Figura 4) nesse último.

Os teores de EE e MM não apresentaram tendências estacionais, diferentes dos outros parâmetros de valor nutritivo. No verão de 2019, para ambos os atributos, o sistema silvipastoril apresentou uma tendência de apresentar valores superiores no sistema silvipastoril em comparação ao sistema a pleno sol.

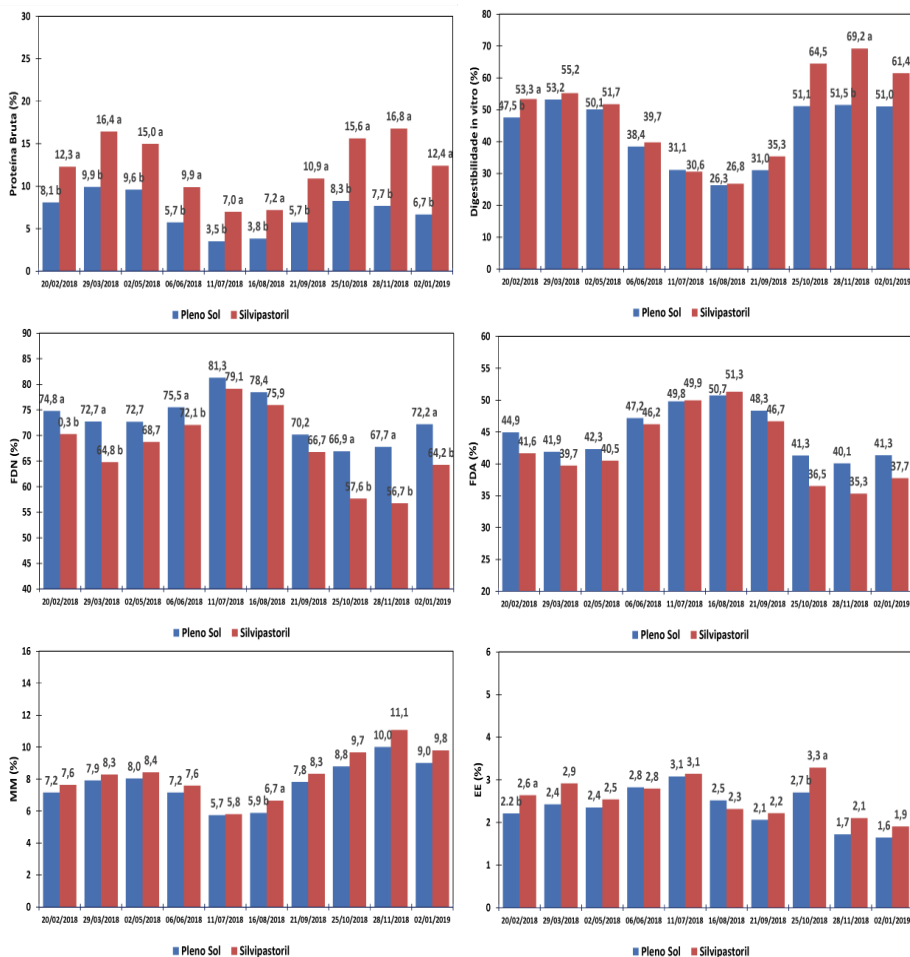


Figura 5. Valor nutritivo da forragem disponível no pré-pastejo nos piquetes estabelecidos a pleno sol e no sistema silvopastoril de eucalipto consorciado com braquiária para validação do protocolo CCN em São Carlos, SP. Média seguida por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste t a 5% de probabilidade

Índices de conforto térmico nos sistemas

Sistemas silvipastoris com árvores exóticas ou nativas frequentemente são associados ao conforto térmico ambiental ao animal (Pezzopane et al., 2019; Magalhães et al., 2020). Para quantificar os índices de conforto térmico foram instaladas estações meteorológicas no sistema a pleno sol e no sistema silvipastoril em dois pontos: Ponto 1, sob o renque de árvores, e Ponto 3, na distância média entre dois renques (Figura 6). Os sensores foram acoplados em dataloggers (CR1000, CampbellSCI), programados para leituras a cada cinco segundos e emissão de relatórios a cada hora.

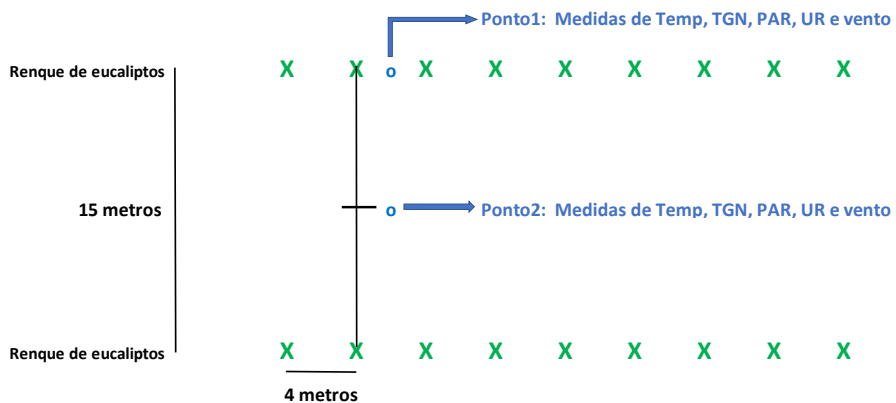


Figura 6. Representação esquemática das áreas experimentais com a distribuição das estações meteorológicas nos sistemas de integração com eucalipto. PAR = radiação fotossinteticamente ativa e TGN = temperatura do globo negro.

A partir dos dados de microclima, foi determinado o índice de conforto térmico denominado Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU) nos sistemas de produção a pleno sol e arborizado com eucalipto. O ITGU foi calculado a partir da equação descrita por Buffington et al. (1981):

$$ITGU = TGN + 0.36 Tpo + 41.5 \quad (1)$$

em que, TGN é a temperatura de globo negro (°C) e Tpo é a temperatura do ponto de orvalho (°C).

A partir do cálculo do índice ITGU, os dados foram agrupados por estação do ano (Figura 7) e para todo o período experimental. Para o sistema arborizado, foram considerados os valores de ITGU médios dos dois pontos de medida no sistema.

Para todas as épocas avaliadas (Figura 7) e para a média do período experimental (Figura 8), o sistema arborizado promoveu maior conforto térmico em comparação ao sistema a pleno sol. O mesmo padrão de diferenças entre o comportamento do ITGU nos dois sistemas foi observado ao longo do tempo nas diferentes estações climáticas. Os maiores valores de ITGU ao longo do dia foram obtidos nas estações de verão dos anos 2017/2018 e 2018/2019 (85,1 e 86,5, respectivamente). No sistema arborizado, os valores máximos para essas mesmas estações foram 81,9 e 82,8 (Figura 7).

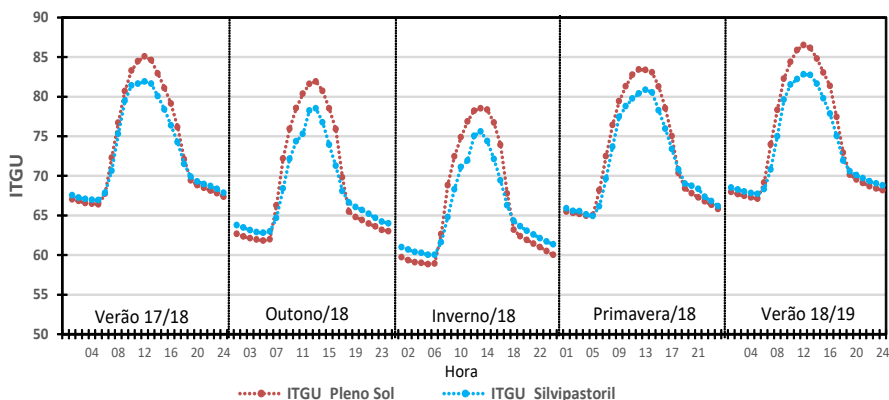


Figura 7. Variação horária média do Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade - ITGU ao longo das estações do ano do período experimental em pastagens a pleno sol (Sol pleno) e no sistema silvipastoril (médias de duas posições) (SSP) com árvores de eucalipto em São Carlos, SP.

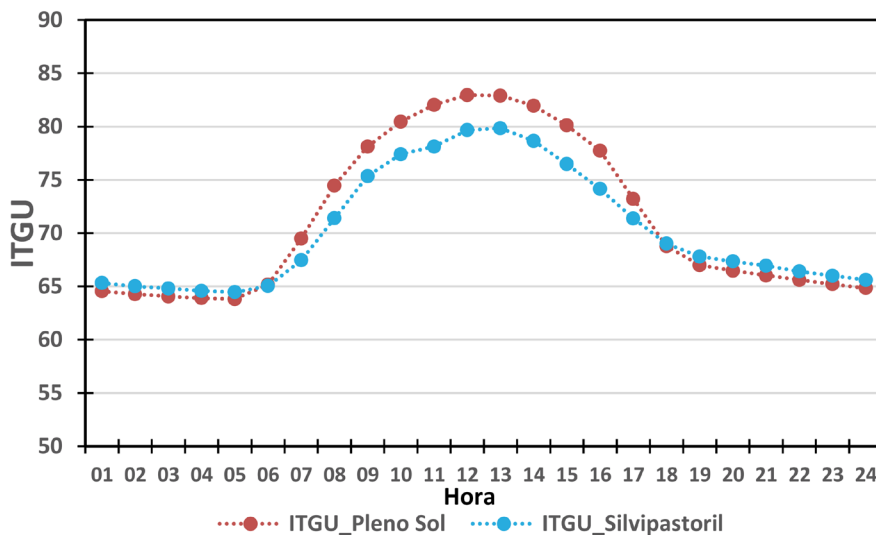


Figura 8. Variação horária média do Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade-ITGU ao longo do período experimental (entre dezembro de 2017 e março de 2019) em pastagem a pleno sol (Sol pleno) e no sistema silvipastoril (médias de duas posições) (SSP) com árvores de eucalipto em São Carlos, SP.

A partir dos valores horários, os dados de ITGU foram agrupados em médias para o período vespertino (12h às 18h), considerado como o período do dia de maior estresse aos animais. Para todas as estações do ano, assim como para todo o período experimental, os valores de ITGU no período vespertino foram menores no sistema silvipastoril em comparação ao sistema a pleno sol (Figura 9). Os maiores valores de ITGU no sistema a pleno sol para o período vespertino foram registrados no verão 2018/2019 (83,2), sendo que nessa mesma época o valor no sistema silvipastoril foi de 80,0. Na média geral (todo período experimental), os valores de ITGU vespertinos foram de 79,8 e 76,7 nos sistemas a pleno sol e silvipastoril, respectivamente.

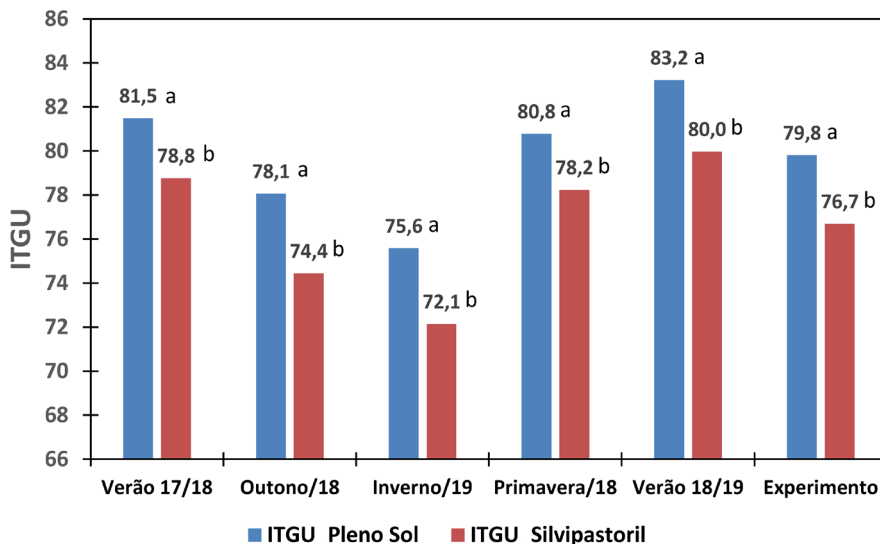


Figura 9. Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade-ITGU no período vespertino (12h às 18h) ao longo das estações do ano e média para todo o período experimental (dezembro de 2017 a abril de 2019) em pastagem a pleno sol (Sol pleno) e no sistema silvipastoril (médias de duas posições) (SSP) com árvores de eucalipto em São Carlos, SP. Média seguida por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste t a 5% de probabilidade.

Outra abordagem sobre o conforto térmico é considerar o valor de ITGU de 79 como referência para início de estresse térmico em bovinos (Baêta, 1985; Baêta; Souza, 2010). Nesse sentido, foi realizada a comparação entre os sistemas de produção quanto ao número de horas por dia com $ITGU > 79$. Assim como nas outras maneiras de avaliação, o sistema silvipastoril apresentou maior conforto animal com redução do número de horas de estresse em todas as estações do ano, assim como em todo período experimental (Figura 10). O sistema arborizado apresentou, em média, redução de duas horas diárias de estresse em comparação ao sistema a pleno sol.

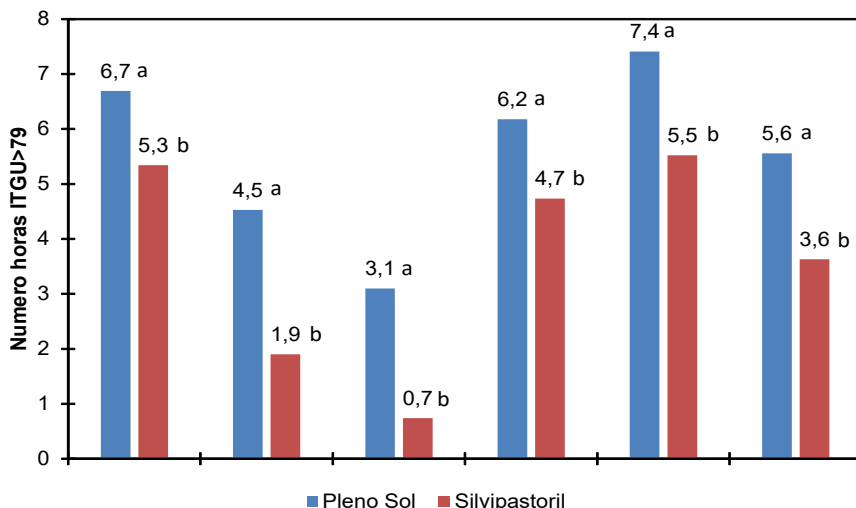


Figura 10. Número de horas diárias com Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade-ITGU>79 ao longo das estações do ano e média para todo o período experimental (verão 2017/2018 a verão 2018/2019) em pastagem a pleno sol (Sol pleno) e no sistema silvipastoril (médias de duas posições) (SSP) com árvores de eucalipto em São Carlos, SP. Média seguida por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste t a 5% de probabilidade.

Desempenho animal e estimativa de emissões de metano entérico

Os resultados anuais da avaliação de desempenho animal realizada de 21/12/2017 até 20/01/2019 mostraram que o ganho de peso médio diário dos animais variou de 0,41 a 0,94 kg/bovino.dia, com os maiores pesos no verão e primavera, em contraste com o outono e inverno. No outono, os animais a pleno sol tiveram um ganho de peso maior do que os animais em condições sombreadas (Figura 10).

A lotação animal (UA/ha) também foi maior para a condição a pleno solo do que nas áreas de pastagens sombreadas e foi compatível com as doses de fertilizantes empregadas (Figura 11). Na época seca (outono e inverno), a lotação (3,04 UA/ha) foi acima da encontrada na literatura para pastagens,

uma vez que os animais receberam suplementação de 4,04 kg de MS/animal por dia de silagem, em média. No outono, a diferença entre os ganhos de peso dos animais foi a maior, sendo menor a produção nos sistemas sombreados, evidenciando a competição dos diferentes sistemas pelos fatores produtivos (Figura 11).

A lotação expressa em bovinos por hectare foi calculada somente para possibilitar a realização dos cálculos de produtividade, pois sofre o efeito das variações de peso dos animais de cada tratamento. No caso dos tratamentos com aumento do peso dos animais ao longo do período experimental há como consequência uma diminuição da lotação em bovinos/ha, conforme o tempo experimental vai avançando (Figura 12 I), o que não ocorre quando a lotação animal é expressa em unidades animais, cujo peso é fixo em 450 kg por unidade animal. Apesar disso, a lotação (bovinos/ha) teve o mesmo comportamento que a lotação expressa em unidade animal, sendo maior para condição a pleno sol (3,01 bovinos/ha) do que para a condição de sombra (2,70 bovinos/ha). A maior lotação (bovinos/ha) ocorreu no verão, seguida do outono, sendo que o inverno e a primavera apresentaram as menores lotações.

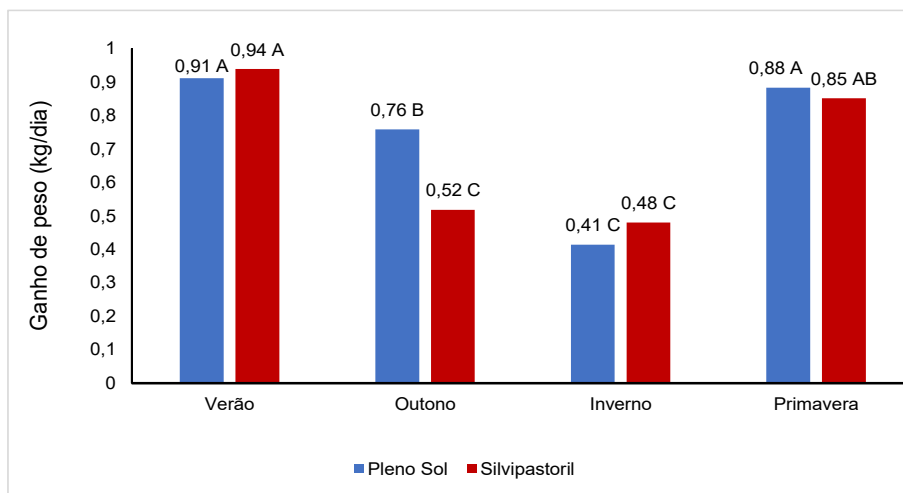


Figura 11. Ganho de peso médio diário de bovinos machos nelores não castrados (kg/dia) em função da presença ou não de sombra pela integração da pastagem com eucalipto nas diferentes estações climáticas. Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste Tukey a 0,02% de probabilidade.

EPM = erro padrão = 0,02

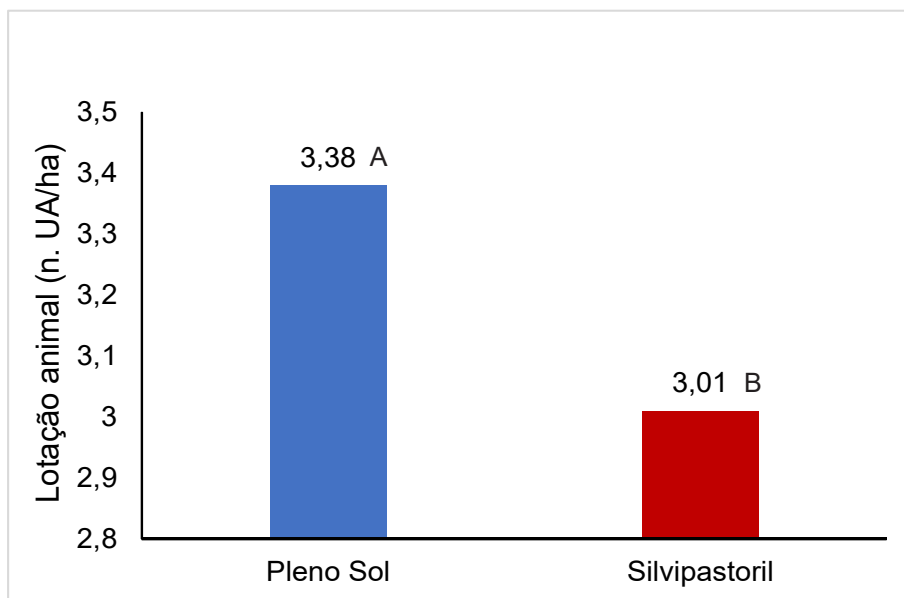


Figura 12. Lotação animal (UA/ha) em função da presença ou não de sombra pela integração da pastagem com eucalipto nas diferentes estações climáticas. Média seguida por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste de Tukey a 2,55 % de probabilidade.

EPM = erro padrão = 0,08.

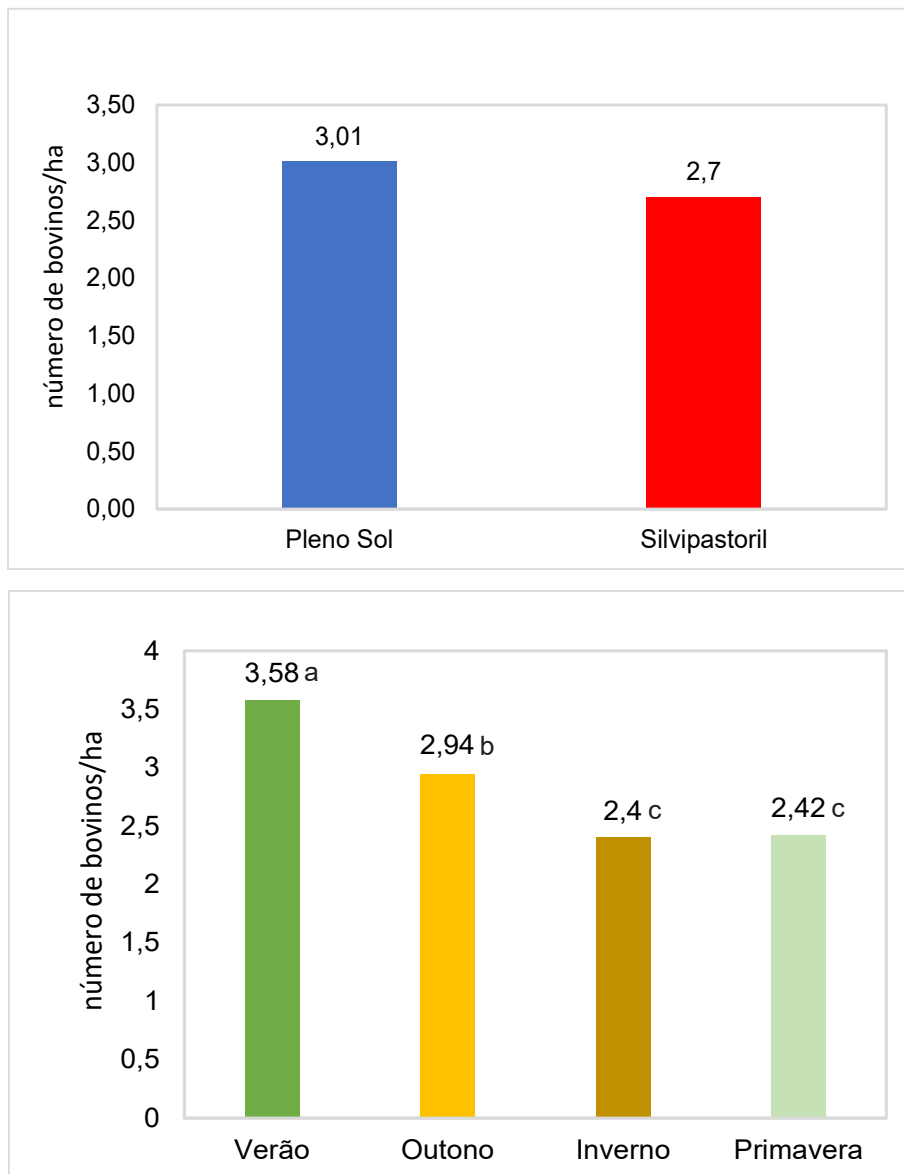


Figura 13. Lotação animal (número de bovinos/ha) de bovinos machos Nelores não castrados (kg/dia) em função da presença ou não de sombra (I) pela integração da pastagem com eucalipto nas diferentes estações climáticas (II). Médias seguidas por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste Tukey a 0,01% de probabilidade para o fator estação do ano e a 7,27% para o fator pleno sol/sombra.

Os animais dos sistemas de produção a pleno sol e sombreados apresentaram peso vivo inicial e final semelhantes. Entretanto, os animais dos sistemas a pleno sol tiveram um rendimento de carcaça maior do que os animais dos sistemas sombreados ao fim do período experimental (Tabela 3).

Tabela 3. Peso vivo inicial, peso vivo final e rendimento de carcaça de bovinos machos nelores não castrados em função da presença ou não de sombra pela integração da pastagem com eucalipto.

Sistemas de Produção	Peso Vivo Inicial (kg)	Peso Vivo final (kg)	Rendimento de Carcaça (%)
Pleno Sol	344,53	613,92	55,79
Silvipastoril	346,69	599,63	54,53
Dados Médios			
Média	345,61	606,78	55,12
EPM	5,51	9,04	0,28
Probabilidade estatística			
Tratamento	0,85	0,44	0,018

EPM = erro padrão

Como consequência do aumento da lotação animal e do ganho de peso vivo dos animais mantidos a pleno sol, o ganho de peso vivo por unidade de área (ha) diário por estação climática foi maior para o sistema a pleno sol do que para os sistemas sombreados (Tabela 4). Essas diferenças foram ainda mais acentuadas quando os valores foram expressos em termos de produção anual, com produção de peso vivo e de carcaça maior para o sistema a pleno sol do que para os sistemas sombreados (Tabela 5).

Tabela 4. Lotação animal e ganho de peso vivo de bovinos machos Nelores não castrados em sistemas de produção pastoris com a presença ou não de sombra pela integração com eucalipto.

Tratamentos	Estações climáticas	AnEq/ha n.an/ha	PesoVivo/ha kg/ha.dia	Lotação Animal n.UA/ha	Peso Vivo/ha kg/a.estação
Pleno Sol		3,01	1,93	3,38	205,18
Silvipastoril		2,70	2,26	3,01	175,86
	Verão	3.58 a	3.29 a	3,40	299.26 a
	Outono	2.94 b	1.89 b	3,17	172.24 b
	Inverno	2.50 c	1.10 c	2,93	99.95 c
	Primavera	2.42 c	2.10 b	3,27	190.62 b
Dados médios					
Média		2,86	2,09	3,19	190,52
EPM		0,11	0,16	0,08	14,94
Probabilidade estatística					
Tratamento		0,0727	0,0516	0,0255	0,0521
Estação		0,0001	<.0001	0,2082	<.0001
Trat*Esta		0,6237	0,0828	0,5470	0,0851

EPM = erro padrão

Tabela 5. Produção de peso vivo e de carcaça por bovinos machos Nelores não castrados em sistemas de produção pastoris com a presença ou não de sombra pela integração com eucalipto.

Sistemas de produção	Produção de peso vivo (kg/ha/ano)	Produção de Carcaça (kg/ha/ano)
Pleno Sol	820,71	432,39
Silvipastoril	703,43	361,97
Dados médios		
Média	762,07	397,18
EPM	34,67	19,86
Probabilidade estatística		
Tratamento	0,0879	0,0691

EPM = erro padrão da média

As emissões pela fermentação entérica foram baseadas na metodologia de Tier 2, descrita no Volume 4, Capítulo 10, do Guia Metodológica do IPCC de 2006 (Eggleston et al., 2006). As equações utilizadas são descritas no Anexo 1.

Para os dados de emissão foram considerados dez períodos em função das datas de coleta, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Datas das coletas e os períodos considerados, com o número de dias em cada um deles e os dias acumulados de experimento de sistemas de produção pastoris com a presença ou não de sombra pela integração com eucalipto.

	Data	Período	Dias por período	Dias acumulados
Pesagem	22-01-18			
Coleta 1	20-02-18	1	29	29
Coleta 2	28-03-18	2	36	65
Coleta 3	02-05-18	3	35	100
Coleta 4	06-06-18	4	35	135
Coleta 5	11-07-18	5	35	170
Coleta 6	16-08-18	6	36	206
Coleta 7	21-09-18	7	36	242
Coleta 8	25-10-18	8	34	276
Coleta 9	28-11-18	9	34	310
Coleta 10	02-01-19	10	35	345

A partir de maio de 2018, os animais começaram a receber silagem de capim, que foi ofertada até o final do experimento. Para fazer a atribuição da silagem de acordo com a pesagem dos animais, foram feitas regressões cúbicas entre o peso dos animais e os dias de experimento, de maneira a estimar o peso em cada uma das datas das coletas de forragem (Tabela 6). Comparando os dados das pesagens com os dados estimados pelas regressões, a média e desvio padrão de concordância entre esses valores foi de $99,62 \pm 2,77\%$. Dos 480 dados estimados, apenas cinco ficaram abaixo de 90% de concordância.

Foram, então, utilizados os dados médios de cada período para estimar o consumo diário de silagem de cada animal presente no pasto, na proporção do seu peso em relação ao lote. A diferença entre o valor estimado pelo modelo para consumo foi considerada como consumo de pastagem. A digestibilidade de cada animal em cada período de coleta, então, foi ponderada proporcionalmente ao consumo de silagem e forragem.

Na média, a silagem representou praticamente $40\% \pm 13\%$ da MS ingerida, mas variando ao longo do experimento. Em maio, representou $18\% \pm 3\%$, o valor mínimo. Mas, em julho, esse valor foi de mais da metade do consumo total, equivalendo a $52\% \pm 10\%$ da MS.

Com essa primeira abordagem, utilizando os valores de digestibilidade da análise de coleta da forragem, nos meses em que só houve consumo da pastagem, e o valor ponderado do consumo de silagem, conforme descrito acima, foram obtidos valores de emissão de metano biologicamente infactíveis. Foi identificado, então, que os valores de digestibilidade eram incompatíveis com os desempenhos obtidos, o que fazia com que o modelo superestimasse a emissão.

O fato de os valores nutritivos das forragens serem baseados em coleta total de forragem justifica que esses valores estejam subestimados, uma vez que os animais selecionam as partes mais nutritivas das plantas. Para ilustrar esse efeito, foi incluída a Tabela 7, com dados de *Urochloa brizantha* cv. Marandu (Euclides; Medeiros, 2003), os quais mostram a grande melhoria da digestibilidade que ocorre pela seleção exercida pelos animais no momento do pastejo.

Tabela 7. Valores de digestibilidade in vitro da matéria orgânica (DIVMO) da planta inteira de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e dados de mesma pastagem obtidos por pastejo simulado. Os dados de planta inteira são estimados em função da DIVMO de partes das plantas (folha, colmo e matéria morta) e a porcentagem de cada uma dessas partes na planta inteira. Adaptado de Euclides e Medeiros (2003).

	Planta Inteira	Pastejo Simulado	Melhoria pela seleção
Janeiro	47,3	63,6	135%
Fevereiro	44,6	61,3	137%
Março	42,0	61,8	147%
Abril	43,0	61,6	143%
Mai	40,8	58,3	143%
Junho	39,0	56,7	145%
Julho	36,1	54,5	151%
Agosto	34,9	52,6	151%
Setembro	34,2	53,5	156%
Outubro	41,0	61,2	149%
Novembro	43,7	64,4	148%
Dezembro	45,1	62,3	138%

Optou-se, então, usando o mesmo modelo do IPPC e as mesmas entradas, descobrir, de modo iterativo, o valor de digestibilidade para cada animal e em cada período, que resultaria no desempenho observado. Essa digestibilidade ajustada para desempenho foi, em média, entre 14% e 15% superiores aos valores de digestibilidade da planta inteira (entre fevereiro e março, $114\% \pm 13\%$, máximo, 146%) ou planta inteira mais silagem de capim (de maio em diante, $115\% \pm 17\%$, máximo, 170%). Menos de 10% dos dados tiveram valor de digestibilidade ajustada para ganho menor do que 95% do valor de pasto ou pasto mais silagem. Portanto, o ajuste dos dados de digestibilidade para o desempenho ficou dentro das margens esperadas em função da seleção do animal conforme a Tabela 7.

Além desse valor de digestibilidade, no modelo do IPCC (Eggleston et al., 2006), as entradas utilizadas por bovino da raça Nelore foram: o peso vivo médio e o ganho médio diário de cada período de coleta. Foi considerado o

peso adulto de bovinos machos Nelore como 600 kg. Maiores detalhes podem ser consultados no Anexo I. O dado médio e desvio padrão obtido para todos os bovinos machos Nelore para o experimento, em quilogramas de metano por animal por ano (kg CH₄/cab.ano), foi 88,08 ± 9,04 (valor máximo = 116,38 e valor mínimo = 67,77). Com relação às médias dos tratamentos, em pleno sol o valor foi de 88,66 kg de CH₄/bovino.ano, e no silvipastoril de 87,49 kg de CH₄/bovino.ano.

Na Tabela 8 são apresentados os dados das várias formas de expressão de emissão de cada uma das estações ao longo do experimento.

Tabela 8. Taxas de emissão de metano em sistemas de produção pastoris com a presença ou não de sombra pela integração com eucalipto.

Efeitos Fixos		Efeitos Principais	
Tratamentos	Estação	kg CH ₄ /cab.ano	g CH ₄ /UA.dia
Pleno Sol		88,99	214,33
Silvipastoril		87,82	217,77
	Verão	84.38 c	216,44
	Outono	84.44 c	221,77
	Inverno	89.18 b	215,54
	Primavera	95.61 a	210,45
Médias			
Média		88,40	216,05
Erro padrão		0,65	0,56
Probabilidades			
Tratamento		0,2607	0,0278
Estação		<.0001	<.0001
Trat*Estação		0,6379	0,0002

Os valores de $\text{kg CH}_4/\text{bovino.ano}$ são bastante semelhantes para os dois tratamentos ao longo das estações ($P=0.2607$). Já os valores entre as estações foram diferentes ($P<0,0001$), pois são crescentes, uma vez que os animais aumentavam de peso ao longo do período experimental. Do Outono ao Inverno, temos médias que diferem entre si, apenas o Verão com uma média praticamente igual a de Outono, o que está de acordo com a provável maior ingestão de MS no Verão.

A Figura 14, por sua vez, combina as informações de lotação, em UA, com a emissão em $\text{kg CH}_4/\text{dia}$, para termos a emissão de metano por UA por dia. Essa foi a única métrica em que houve interação entre tratamento e épocas do ano.

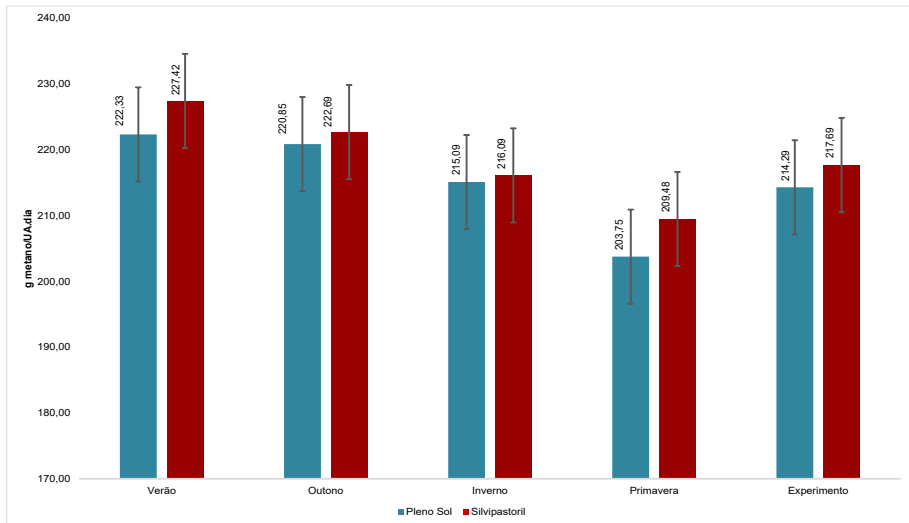


Figura 14. Emissão estimada em grama de metano por unidade animal por dia ($\text{kg CH}_4/\text{UA.dia}$) ao longo das estações do ano e média para todo o período experimental (dezembro de 2017 a janeiro de 2019) em pastagem a pleno sol (Sol pleno) e no sistema silvipastoril (SSP) com árvores de eucalipto em São Carlos, SP. Média seguida por letras distintas são diferentes entre si pelo Teste Tukey a 2,78 % de probabilidade. EPM = erro padrão = 0,56

Apesar dos valores expressos em $\text{kg CH}_4/\text{UA.dia}$ apresentarem baixa variação, foi possível identificar interação significativa entre tratamento e época do ano. Os dados de emissão diário, em g de metano por unidade animal, foram

sempre numericamente superiores para o tratamento silvipastoril, sendo que, no verão e na primavera, significativamente mais altos ($P < 0,05$). Os valores mais altos foram para verão, com média de 227 g/UA.dia, sem diferença significativa entre os tratamentos nesta estação. O valor mais baixo, foi para o tratamento em pleno sol na primavera, com 7 gramas menos de emissão de metano para cada UA por dia, em relação ao tratamento silvipastoril.

Os resultados parecem mostrar que o silvipastoril seria ligeiramente menos interessante quando incluímos ganhos individuais e lotação das pastagens, aqui incluídos tanto animais-teste, como animais carga. Todavia, o sistema silvipastoril ainda conta com a fixação de carbono na madeira das árvores.

Incremento florestal e fixação de carbono

O crescimento das árvores foi avaliado semestralmente de outubro de 2017 (árvores com 78 meses) a abril de 2019 (árvores com aos 96 meses), por meio das medidas do diâmetro na altura do peito (DAP), medido com fita diamétrica, e altura total (H) das árvores, com hipsômetro eletrônico. Em cada uma das quatro áreas foram medidas 15 árvores por piquete (totalizando 24 piquetes).

Para o cálculo do volume (V) de madeira por hectare ($m^3 ha^{-1}$), biomassa do fuste (Bf) ($Mg ha^{-1}$) foram ajustadas equações do modelo de Schumacher e Hall (1933), a partir de cubagem de 110 árvores e amostragens de biomassa em 28 árvores da área experimental nos anos de 2016 e 2019 (Pezzopane et al., 2021):

$$\ln V = -10.2101 + 1.6808 * \ln DAP + 1.2910 * \ln H \quad (R^2 = 0.9824)$$

$$\ln Bf = -4.7039 + 2.0489 * \ln DAP + 1.1154 * \ln H \quad (R^2 = 0.9831),$$

O teor de carbono no fuste foi obtido a partir da multiplicação da biomassa pelo fator 0,4549, determinado a partir de determinação do teor de carbono nas árvores amostradas.

Como o período de avaliação dos animais foi entre dezembro de 2017 e janeiro de 2019, para fins de cálculo de fixação de carbono foi considerado o intervalo anual entre abril de 2018 e abril de 2019. No período considerado, a média do diâmetro na altura do peito (DAP) das árvores nas quatro áreas avaliadas variou de 27,6 cm a 29,9 cm, com incremento de 2,3 cm. A altura total das árvores variou entre 28,9 m e 30,5 m, com incremento de 1,6 m. (Figura 15).

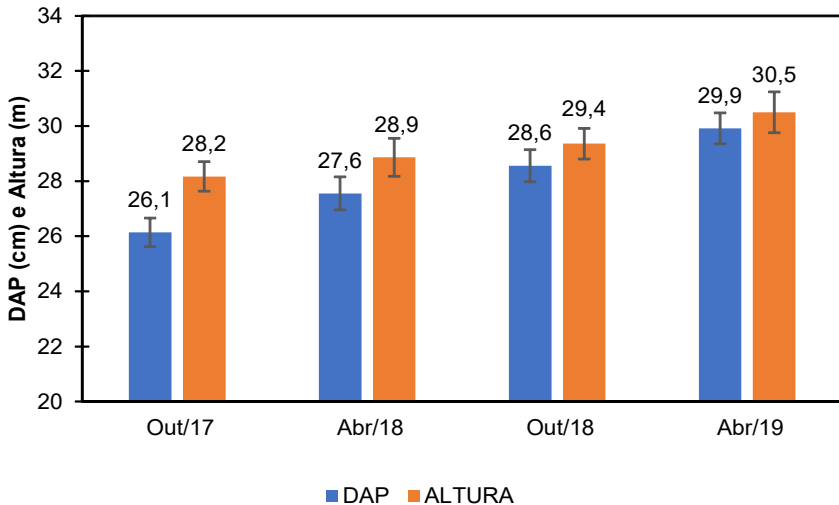


Figura 15. Diâmetro altura do peito (DAP) e Altura média das árvores de eucalipto, entre outubro de 2017 (aos 78 meses após plantio) e abril de 2019 (96 meses) em piquetes de integração IPF e ILPF em São Carlos, SP.

Esse crescimento das árvores permitiu uma variação de volume de 124,4 m³ ha⁻¹ a 153 m³ ha⁻¹, com incremento anual de 28,6 m³/ha. Já a biomassa do fuste das árvores apresentou um incremento de 14,6 Mg/ha e o carbono de 6,7 Mg/ha no mesmo período (Figura 16).

Na avaliação de 70 árvores do experimento, ocorrida em 2019, com oito anos de idade, foi determinada a porcentagem do volume da madeira em quatro classes de diâmetro, que foram assim classificados: Diâmetro menor que 18 cm (15,0%), diâmetro entre 18-25 cm (34,0%), diâmetro entre 25-35 cm (49,9%) e diâmetro maior que 35 cm (1,1 %).

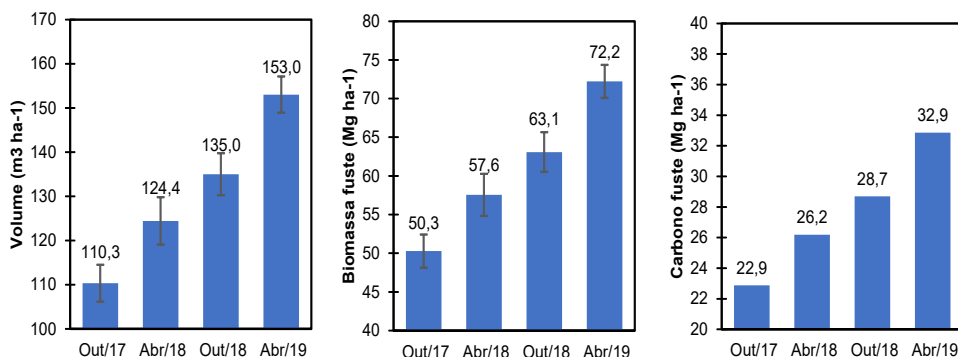


Figura 16. Volume, biomassa e carbono da madeira do fuste de árvores de eucalipto entre outubro de 2017 (aos 78 meses após plantio) e abril de 2019 (96 meses) em piquetes de integração IPF e ILPF em São Carlos, SP

Mitigação de CO₂ eq. no sistema IPF

Com base nos dados de fixação de CO₂ eq. pelo componente florestal do sistema IPF e na emissão entérica de CO₂ eq. dos animais que utilizaram a pastagem no período avaliado (dezembro de 2017 a janeiro de 2019) foi estimado o potencial de neutralização do metano emitido pelos bovinos e determinado o saldo CO₂ eq. fixado no fuste das árvores no sistema IPF para o período experimental (Tabela 9).

Tabela 9. Características produtivas e fixação de carbono pelo fuste das árvores, desempenho animal e emissão de CO₂ eq. pelos animais e balanço de carbono de um sistema silvipastoril com eucaliptos no período de avaliação do projeto (2018-2019) em São Carlos, SP.

Variável	Fonte	Unidade	Ano	Valor
Árvores				
Estande		Arv./ha		165
Volume	Figura 16	m ³ /ha	2018	124,4
			2019	153,0
Incremento (Volume)		m ³ /ha		28,6
Incremento (Biomassa no fuste)	Figura 16	Mg/ha		14,6
Incremento (Carbono no fuste)	Figura 16	Mg/ha		6,7
CO ₂ eq. fixado no fuste (a)	*	Mg/ha		24,6
Animais				
Emissão de CO ₂ eq. por bovinos (b)	Figura 14 **	Mg/ha		6,7
Lotação média (bovino/ha)	Tabela 4	Bov/ha		2,7
lotação média (c)	Tabela 4	UA/ha		3,0
Emissão de CO ₂ eq. por UA (d)	(b)/(c)	Mg/ha		2,2
Saldo	(a)-(b)	Mg/ha		17,8
Potencial de neutralização	(a)/(d)	UA/ha		11,2

* Total de carbono multiplicado por 3,667 para obtenção de CO₂ eq.

** Potencial de aquecimento global (GWP – sigla do inglês para Potential Warming Global) de 28 para conversão de CH₄ em CO₂ eq. (The Core Writing Team et al., 2015)

Pode-se observar que a quantidade de carbono sequestrado no fuste das árvores de eucalipto em um hectare seria suficiente para neutralizar a emissão de CH₄ de 11,2 UA ha⁻¹ ano⁻¹. Esse número foi obtido pela divisão entre o total de carbono fixado nos troncos (24,6 Mg) pela emissão de 1 U.A. (2,2). Isso aconteceu em função do grande crescimento das árvores durante o período avaliado, correspondente a 28,6 m³ ha⁻¹ entre abril de 2018 a abril de 2019.

Para analisar o potencial de neutralização de carbono pelas árvores em todo o período de crescimento, são apresentados três cenários (Tabela 10): no cenário 1, foi considerada toda a produção de madeira do sistema, que envolveu o desbaste aos cinco anos e a produção final aos oito anos; no cenário

2, foi considerada apenas a madeira das 165 árvores ha⁻¹ remanescentes aos oito anos, por considerar que a madeira proveniente do desbaste (cinco anos) ainda não permitia exploração em serraria; e, no Cenário 3, foi considerado, a partir da madeira produzida aos oito anos, um rendimento de desdobro em serraria de 40% (Anjos; Fonte, 2016; Costa et al., 2019) para as toras acima de 18 cm.

Nos cenários estudados, o carbono sequestrado no fuste das árvores no Cenário 1 apresentou um potencial de neutralizar a emissão de 9,4 U.A.ha⁻¹, no Cenário 2, potencial para neutralizar 6,7 U.A.ha⁻¹ e no Cenário 3, 2,3 U.A.ha⁻¹, quando foi considerada apenas a madeira resultante do processo de desdobro na serraria.

É importante ressaltar que o protocolo do CCN visa produção de madeira destinada para produtos de maior valor agregado, de maior vida útil e mais tempo de imobilização do carbono, como móveis ou materiais para construção civil (Alves et al., 2015). Mesmo considerando o cenário onde somente a madeira desses usos é contabilizada para neutralizar a emissão dos animais (Cenário 3), ainda é possível ocorrer a neutralização de uma ocupação média de 2,3 U.A. ha⁻¹, bem acima da média nacional de ocupação.

Tabela 10. Características produtivas e fixação de carbono pelo fuste das árvores, características produtivas e emissão de CO_2 eq. pelos animais e potencial de neutralização de carbono de um sistema silvipastoril com eucaliptos aos oito anos de idade em São Carlos, SP.

	Unidade	Cenário 1 ** Total fuste (dois cortes)		Cenário 2 *** Total fuste		Cenário 3 **** Uso serraria	
		8 anos	Taxa anual	8 anos	Taxa anual	8 anos	Taxa anual
Árvores							
Volume aos 8 anos	m ³ /ha	220,45	27,6	153	19,1	52,0	6,5
Biomassa do fuste aos 8 anos	Mg/ha	101,5	12,7	72,2	9,0	24,5	3,1
Carbono no fuste aos 8 anos	Mg/ha	45,7	5,7	32,9	4,1	11,2	1,4
CO_2 eq. fixado no fuste (*) aos 8 anos (a)	Mg/ha	167,6	20,9	120,6	15,1	41,0	5,1
Animais							
Emissão de CO_2 eq. (b)	Mg/UA		2,2		2,2		2,2
Potencial de neutralização (a)/(b)	UA/ha		9,4		6,7		2,3

* Total de carbono multiplicado por 3,667 para obtenção de CO_2 eq.

** Considerando o total produzido pelo manejo de desbaste que ocorreu na área aos cinco anos e do remanescente de árvores até os oito anos.

*** Considerando apenas a produção das árvores remanescentes aos oito anos de implantação

**** Considerando rendimento de desdobra de 40% do volume de madeira apta para serraria (diâmetro acima de 18 cm)

Conclusões

Considerando os resultados obtidos na validação do Protocolo CCN, é possível produzir a carne carbono neutro, uma vez que todo o período de crescimento das árvores no sistema silvipastoril (oito anos), o carbono fixado no tronco das árvores permitiu a neutralização das emissões de CO_2 eq. de 9,4 U.A./ ha. Se considerarmos apenas o carbono na madeira resultante do processo de desdobra na serraria, as árvores no sistema silvipastoril aos oito anos de idade (165 arvores ha⁻¹) neutralizaram as emissões de CO_2 eq. de 2,3 U.A./ha.

Além dos benefícios relativos à dinâmica de gases de efeito estufa, outros pontos benéficos que levam à sustentabilidade dos sistemas de produção foram observados. Durante o período de avaliação do sistema silvipastoril, o sombreamento das árvores promoveu melhoria na composição morfológica e

bromatológica, com menor porcentagem de matéria morta e maiores teores de proteína em comparação ao sistema a pleno sol, apesar de ter provocado redução na produção de forragem. As árvores proporcionaram maior conforto térmico animal durante todo o período experimental. A ocupação animal foi semelhante nos sistemas de produção a pleno sol e no sombreado, em função de suplementação com silagem na época das secas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa (Projetos Rede Pecuária, Rede AP: 11.14.09.001.03.03 e Carne Carbono Neutro), à Fapesp (Processos 15/26627-5, 16/02959-1, 19/04528-6) pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais. Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável - Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

Bibliografia

ANJOS, R. A. M.; FONTE, A. N. M. Rendimento de madeira serrada de espécies de Eucalyptus. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.16, n.1, p.26-32, 2017

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; SILVA, V. P.; MACEDO, M. C. M.; MEDEIROS, S. R.; FERREIRA, A. D.; GOMES, R. C.; ARAÚJO, A. R.; MONTAGNER, D. B.; BUNGENSTAB, D. J.; FEIJÓ, G. L. D. **Carne carbono neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2015 (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 210).

ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 1999. p.25-32.

BAÊTA, F. C. **Responses of lactating dairy cows to the combined effects of temperature, humidity and wind velocity in the warm season**. 1985. 218 f. Tese (Doutorada) - University of Missouri, Columbia, 1985.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. 2.ed. Viçosa: UFV. 2010. 246p.

- BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Trans ASAE**, v. 24, p. 711-714, 1981. doi:10.13031/2013.34325.
- BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PRIMAVESI, O. Soil fertility of tropical intensively managed forage system for grazing cattle in Brazil. In: WHALEN, J. K. **Soil fertility improvement and integrated nutrient management: a global perspective**. Rijeka, Croatia: Intechopen, p. 37-56, 2012.
- BERNARDI, A. C. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, J. R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 4, p.290-300, 2019.
- CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n.1, p. 161-170, 2000.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G. dos; FONSECA, O. O. M. da; SANTOS, R. D. dos; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP**: levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ; São Carlos, SP: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95 p. il. (EMBRAPA-CNPQ. Boletim de pesquisa, 7; EMBRAPA-CPPSE. Boletim de pesquisa, 2). Acompanha 1 mapa, p&b. Escala 1:40.000.
- CANTARELLA, H.; CORREA, L. A.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. Fertilidade do solo em sistemas intensivos de manejo de pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 19., 2002, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2002. p.99-131.
- CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. (ed.). **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite; Brasília: FAO, 2001. 414 p.
- THE CORE WRITING TEAM; PACHAURI, R. K.; MEYER, L. **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, CH: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf. Acesso em: 02 fev. 2022.
- COSTA, J. A. A. da; QUEIROZ, H. P. de. **Régua de manejo de pastagens**: edição revisada. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2017. 7 p. (Embrapa Gado de Corte. Comunicado técnico, 135).
- COSTA, T. C. e C. da; CAMPANHA, M. M.; FRANÇA, L. F. M.; ALBERNAZ, W. M.; PINTO JÚNIOR, E. da S. **Primeira validação do CalcMadeira, software para estimativa de peças de madeira roliça e serrada**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 24 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 194).
- EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). **2006 guidelines for national greenhouse gas inventories**, v. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama, Kanagawa, Japan: IPCC National Greenhouse gas Inventories Programme, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 02 fev. 2022.

- EUCLIDES, V. P. B.; MEDEIROS, S. R. de. **Valor nutritivo das principais gramíneas cultivadas no Brasil**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2003. 43 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 139).
- GIRO, A., PEZZOPANE, J., BARIONI JUNIOR, W., PEDROSO, A. F., LEMES, A. P., BOTTA, D., ROMANELLO, N., BARRETO, A., GARCIA, A. R. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. **The Science of the Total Environment**, v. 684, p. 587–596, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377>.
- LEMES, A. P.; GARCIA, A. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRANDÃO, F. Z.; WATANABE, Y. F.; COOKE, R.F.; SPONCHIADO, M.; de PAZ, C. C. P.; CAMPLESIA, C.; BINELLI M.; GIMENES, L. U. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. **Nature Scientific Reports**, v. 11, p.14092, 2021.
- LOPES, C. M.; PACIULLO, D. S. C.; ARAUJO, S. A. C.; MORENZ, M. J. F.; GOMIDE, C. A. M.; MAURICIO, R. M.; BRAZ, T. G. S. Plant morphology and herbage accumulation of signal grass with or without fertilization, under different light regimes. **Ciência Rural**, v. 47, p. 1-5, 2017. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160472.
- LUZ, P. H.; HERLING, V. R.; PETERNELLI, M.; BRAGA, G. J. Calagem e adubação no manejo intensivo do pastejo. In: EVANGELISTA, A.R.; SALES, E. C. J.; SIQUEIRA, G. R.; LIMA, J. A. (ed.) SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS: TEMAS EM EVIDÊNCIA, 2., 2001, Lavras. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2001. p.27-110.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009 (supl. especial).
- MAGALHÃES, C. A. S.; ZOLIN, C. A.; LULU, J.; LOPES, L. B.; FURTINI, I. V. ; VENDRUSCULO, L. G. ; ZAIATZ, A. P. S. R. ; PEDREIRA, B. C. ; PEZZOPANE, J. R. M. . Improvement of thermal comfort indices in agroforestry systems in the southern Brazilian Amazon. **Journal Of Thermal Biology**, v. 91, p. 102636, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102636>.
- MAIA, C. M. B. F.; PARRON, L. M. Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 101-108.
- MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BROSSARD, M. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 442-450, 2009.
- MARTHA JUNIOR, G. B.; BARCELLOS, A. de O.; VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. de. Benefícios Bioeconômicos e Ambientais da Integração Lavoura-Pecuária. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2006. 28 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 154).
- MOTT, G. O., e LUCAS, H. L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. **International Grassland Congress**. Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380.
- OFUGI, C.; MAGALHÃES, L. L.; MELIDO, R. C. N.; SILVEIRA, V. P. Integração lavoura-pecuária (ILPF), sistemas agroflorestais (SAFs). In: TRECENTI, R. et al. (ed.). Integração lavoura-pecuária-silvicultura: boletim técnico. Brasília: MAPA/SDC, 2008. p.20-25.

OLIVEIRA, P. P. A.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S.; CORSI, M. Liming and fertilization to restore degraded *Brachiaria decumbens* pastures grown on an entisol. **Scientia Agricola**, 60:125-131. 2003.

OLIVEIRA, C. C.; VILLELA; S. D. J.; ALMEIDA, R. G.; ALVES, F. V.; BEHLING-NETO, A.; MARTINS, PAULO G. M. A. Performance of Nellore heifers, forage mass, and structural and nutritional characteristics of *Brachiaria brizantha* grass in integrated production systems. **Tropical Animal Health Production**, v. 46, n. 1, p. 167-172, 2014. DOI 10.1007/s11250-013-0469-1.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; ALVES, T. C.; PEDROSO, A. F. Evolução na recomendação de fertilização de solos sob pastagens: eficiência e sustentabilidade na produção pecuária. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO DE GADO DE CORTE, 9.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF BEFF CATTLE PRODUCTION, 5., 2014, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2014. p.289-344.

OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MEO FILHO, P. de; BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; BERNARDI, A. C. de C. Balanço e emissões de gases de efeito estufa em sistemas integrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 1.; ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, 4., 2017, Pato Branco. Palestras: intensificação com sustentabilidade. Cascavel: UTFPR, 2017. p. 23-32.

PACIULLO, D. S. C.; CARVALHO, C. A. B.; AROEIRA, L. J. M.; MORENZ, M. J. F.; LOPES, F. C. F.; ROSSIELLO, R. O. P. Morfofisiologia e valor nutritivo do capim-braquiária sob sombreamento natural e a sol pleno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 4, p. 573-579, 2007.

PACIULLO, D.S.C.; GOMIDE, C.A.M.; CASTRO, C.R.T.; FERNANDES, P.B.; MULLER, M.D.; PIRES, M. F.A.; FERNANDES, E.M.; XAVIER, D.F., Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1176–1183. 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000009>.

PETERSEN, R. **Agricultural field experiments: design and analysis**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994. P. 301-302. <https://doi.org/10.1201/9781482277371>.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103–111. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>.

PEZZOPANE, J. R. M., BERNARDI, A. C. C., AZENHA, M. V., OLIVEIRA, P. P. A., BOSI, C., PEDROSO, A. F., ESTEVES, S. N., Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agricola**, v. 77, p. 1–10. 2020a. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150>.

PEZZOPANE, J. R. M.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; ROCHA, E. L. F. da; BERNARDI, A. C. de C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. de F. Reducing competition in a crop-livestock-forest integrated system by thinning eucalyptus trees. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 4, p. 574-586, jul. 2020b.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>.

PRIMAVESI, A. C.; ANDRADE, A. G.; ALVES, B. J. R.; ROSSO, C.; BATISTA, E. M.; PRATES, H. T.; ORTIZ, F. R.; MELLO, J.; FERRAZ, M. R.; LINHARES, N. W.; MACHADO, P. L. O. A.; MOELLER, R.; ALVES, R. C. S.; SILVA, W. M. Métodos de análise de solo. In: Nogueira, A. R. A.; Souza, G. B. **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 67-130.

PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; FREITAS, A. R.; PRIMAVESI, A. C. **Calagem superficial em pastagens de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk sob adubação nitrogenada intensa**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 66 p. 2008. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Pecuária Sudeste, 15).

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C.A. Interpretação de resultados de análise de solo. In: RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. FURLANI, A.M.C. (ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônômico, 1996. p.8-13.

ROLIM, G. D. S.; CAMARGO, M. B. P. D.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. D. Climatic classification of Köppen and Thornthwaite systems and their applicability in the determination of agroclimatic zoning for the state of São Paulo, Brazil. **Bragantia**, v.66, n.4, p.711-720, 2007.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENCO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SENE, G. A. de; HENRIQUE, F. L.; CORTE, R. R.; ASSUMPTÃO, A. H. P. M.; TSEU, R. J.; SOLORZANO, L. A. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; RODRIGUES, P. H. M. Sistemas agropecuários integrados e sua interface com a adaptação às mudanças climáticas. In: BALIEIRO, J. C. de C.; GAMEIRO, A. H.; PEREIRA, A. S. C.; RODRIGUES, P. H. M.; GARBOSSA, C. A. P.; BRUNETTO, M. A.; VENTURA, R. V. (org.). **Novos desafios da pesquisa em nutrição e produção animal**. Pirassununga: 5D Editora, 2018. p. 219-242.

SILVA, J. A. R., ARAUJO A. A., LOURENCO JUNIOR J. B., SANTOS N. F.A., VIANA R. B., GARCIA A. R., RONDINA D., GRISE M. M. Hormonal changes in female buffaloes under shading in tropical climate of eastern Amazon, Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.43, n.1, p.44- 48, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982014000100007>.

TADINI, A. M.; XAVIER, A. A. P.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. de C.; MARTIN NETO, L. Evaluation of soil organic matter from integrated production systems using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil & Tillage Research**, v. 211, e105001, 2021

VINHOLIS, M. de M. B.; SOUZA FILHO, H. M. de; SHIMATA, I.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. de F. Economic viability of a crop-livestock integration system. **Ciência rural**, v. 51, n. 2, p. 1-13, e20190538, 2021.

Anexo 1 – Modelo usado para a estimativa de emissões pela fermentação entérica

Abaixo é detalhada a metodologia usada para estimar a emissão de metano. Ela está descrita no Volume 4, Capítulo 10, do Guia Metodológica do IPCC de 2006 (Eggleston et al., 2006).

Tabela AI - 1. Principais equações utilizadas para calcular as emissões do subsetor fermentação entérica

Equação	Descrição	Modelo	Referência IPCC (Eggleston et al.2006)
Equação 1	Emissão pela fermentação entérica por categoria animal	$Emissão = EFT_{(T)} \times (N_{(T)}10^6)$	Equação 10.19, Cap. 10, Volume 4.

Onde:

EFT(T) = Fator de emissão para população pecuária definida, kg CH₄ cabeça-1 ano-1

N(T) = Número de cabeças da espécie pecuária/categoria animal T no país

T = Espécie/categoria animal pecuária

Fator de emissão (EF(T))

O fator de emissão é calculado através da Equação 2 da Tabela 10.

Onde:

GE = Ingestão de energia bruta, MJ cabeça-1 dia-1 (Tabela 10)

Y_m = fator de conversão de metano, porcentagem da energia bruta ingerida convertida em metano

O fator 55,65 (MJ/kg CH₄) é a energia contida no metano.

Tabela A1 - 2. Equações que descrevem o fator de emissão e a ingestão de energia bruta.

Equação	Descrição	Modelo	Referência IPCC (Eggleston et al.2006)
Equação 2	Fator de emissão para cada categoria animal	$EF_{(T)} = GE \cdot (Y_m/100) \cdot \frac{1}{365/55,65}$	Equação 10.21, Cap. 10, Volume 4.
Equação 3	Ingestão de energia bruta	$GE = (NE_m + NE_a + NEI + NE_{work} + NE_p / REM) + (NE_g + NE_{wool} / REG) / (DE\%/100)$	Equação 10.16, Cap. 10, Volume 4.

Ingestão de energia bruta (GE)

A ingestão de energia bruta é calculada através da Equação 3 da Tabela 10.

Onde:

NE_m = requerimento de energia líquida para a manutenção animal, MJ dia⁻¹

NE_a = energia líquida para atividade animal, MJ dia⁻¹

NE_l = energia líquida para lactação, MJ dia⁻¹

NE_{work} = energia líquida para trabalho, MJ dia⁻¹

NE_p = requerimento de energia líquida para gestação, MJ dia⁻¹

REM = taxa de energia líquida utilizada para a manutenção (% da energia digestível)

NE_g = energia líquida necessária para crescimento, MJ dia⁻¹

REG = taxa de energia líquida utilizada para o crescimento (% da energia digestível)

DE% = energia digestível (% da energia bruta)

Tabela AI - 3. Equações para estimar a Ingestão de energia bruta (GE)

Equação	Descrição	Modelo	Referência IPCC (Eggleston et al.2006)
Equação 4	Energia líquida de manutenção	$NE_m = Gf_i \times (PV)^{0,75}$	Equação 10.3, Cap. 10, Volume 4.
Equação 5	Energia líquida de atividade	$NE_a = C_a \times NE_m$	Equação 10.4, Cap. 10, Volume 4.
Equação 6	Energia líquida para crescimento	$NE_g = 22,02 \times (BW/C \times MW)^{0,75} \times WG^{1,097}$	Equação 10.6, Cap. 10, Volume 4.
Equação 7	Energia líquida para lactação	$NE_l = Milk \times (1,47 + 0,40 \times Fat)$	Equação 10.8, Cap. 10, Volume 4.
Equação 8	Energia líquida para trabalho	$NE_{work} = 0,10 \times NE_m \times Hours$	Equação 10.11, Cap. 10, Volume 4.
Equação 9	Energia líquida para gestação	$NE_p = C_{pregnancy} \times NE_m$	Equação 10.13, Cap. 10, Volume 4.
Equação 10	Taxa de energia líquida utilizada para a manutenção (% da energia digestível)	$REM = [1,123 - (4,092 \times 10^{-3} \times DE\%) + [1,126 \times 10^{-5} \times (DE\%)^2] - (25,4/DE\%)]$	Equação 10.14, Cap. 10, Volume 4.
Equação 11	Taxa de energia líquida utilizada para crescimento (% da energia digestível)	$REG = [1,164 - (5,160 \times 10^{-3} \times DE\%) + [1,308 \times 10^{-5} \times (DE\%)^2] - (37,4/DE\%)]$	Equação 10.15, Cap. 10, Volume 4.

Energia líquida de manutenção (NEm)

A energia líquida de manutenção é calculada através da equação 4 da Tabela 11.

Onde:

Cf_i = coeficiente que varia para cada categoria animal MJ dia⁻¹ kg⁻¹;

PV = peso vivo do animal, kg.

Energia líquida de atividade (NE_a)

A energia líquida de atividade é calculada através da equação 5 da tabela 11.

Onde:

C_a : coeficiente correspondente à situação da alimentação animal. Para animais confinados em pequenas áreas assume-se o valor 0,0 para o coeficiente; para animais em pastagens com forragem suficiente, exigindo gasto moderado de energia para adquirir alimentos, o valor de 0,17 é assumido; e, para animais que pastam em terrenos abertos ou montanhosos com gasto de energia significativa para adquirir alimentos o valor de 0,36 é recomendado (Eggleston et al., 2006).

NE_m : requerimento de energia líquida para manutenção animal, MJ dia⁻¹.

Energia líquida para crescimento (NE_g)

A energia líquida para crescimento é calculada através da Equação 6 da Tabela 11.

Onde:

BW = média do peso vivo corporal dos animais na população, kg;

C = coeficiente que varia de 0,8 para fêmeas, 1,0 para machos castrados e 1,2 para reprodutores (NRC, 1996, apud Eggleston et al., 2006);

MW = peso vivo corporal maduro de uma fêmea adulta em condição corporal moderada, kg;

WG = média diária de ganho de peso por animal dentro de uma população, kg dia⁻¹.

Energia líquida para lactação (NE_l)

A energia líquida para lactação é calculada através da Equação 7 da Tabela 11.

Onde:

Milk = montante da produção de leite, kg de leite dia⁻¹

Fat = conteúdo de gordura no leite, % por peso

Energia líquida para trabalho (NE_{work})

A energia líquida para trabalho é calculada através da Equação 8 da Tabela 11.

Onde:

NE_m = requerimento de energia líquida para manutenção animal, MJ dia⁻¹

Hours = número de horas de trabalho por dia

Energia líquida para gestação (NE_p)

A energia líquida para gestação é calculada através da Equação 9 da Tabela 11.

Onde:

$C_{pregnancy}$ = coeficiente de gestação

NE_m = requerimento de energia líquida para manutenção animal, MJ dia⁻¹

Taxa de energia líquida utilizada para a manutenção (% da energia digestível) (REM)

A taxa de energia líquida utilizada para a manutenção é calculada através da Equação 10 da Tabela 11.

Onde:

DE% = energia digestível (% da energia bruta).

Taxa de energia líquida utilizada para crescimento (% da energia digestível) (REG)

A taxa de energia líquida utilizada para crescimento é calculada através da Equação 11 da Tabela 11.

Onde:

DE% = energia digestível (% da energia bruta).

Embrapa

Pecuária Sudeste

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

CGPE: 017449