



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

PABLO RICARDO NITSCHÉ

**MICROCLIMA, PRODUTIVIDADE DA PASTAGEM E
ACÚMULO DE CARBONO EM SISTEMA SILVIPASTORIL**

Londrina
2020

PABLO RICARDO NITSCHÉ

**MICROCLIMA, PRODUTIVIDADE DA PASTAGEM E
ACÚMULO DE CARBONO EM SISTEMA SILVIPASTORIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto de Aguiar e Silva

Coorientador: Dr. Paulo Henrique Caramori

Londrina
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

N732m Nitsche, Pablo Ricardo.
Microclima, produtividade da pastagem e acúmulo de carbono em sistema silvipastoril / Pablo Ricardo Nitsche. - Londrina, 2020.
78 f. : il.

Orientador: Marcelo Augusto de Aguiar e Silva.
Coorientador: Paulo Henrique Caramori.
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2020.
Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Tese. 2. Eucalyptus grandis - Tese. 3. Microclimatologia - Tese. 4. Sequestro de carbono - Tese. I. Silva, Marcelo Augusto de Aguiar e . II. Caramori, Paulo Henrique. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

PABLO RICARDO NITSCHÉ

**MICROCLIMA, PRODUTIVIDADE DA PASTAGEM E ACÚMULO DE
CARBONO EM SISTEMA SILVIPASTORIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto de
Aguiar e Silva
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dr. Alvadi Antônio Balbinot Junior
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -
EMBRAPA

Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
– EMBRAPA

Dr. Daniel Soares Alves
Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR

Prof. Dr. José Henrique Bizzarri Bazzo
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 20 de fevereiro de 2020.

Dedico este trabalho

À minha família

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram com a realização deste trabalho.

À minha esposa Clau, meus filhos Lara e Caio, pela compreensão nas ausências, pelos incentivos constantes e incondicionais. São a razão de todo o esforço e dedicação.

Aos meus pais, Valdir e Naide, pelo amor, apoio e formação de caráter e educação, sustentação fundamental a todo ser humano.

Agradeço a minha irmã e família pelo apoio, que mesmo enviado de tão distante são captados e canalizados para o bem.

Ao amigo Wilian Ricce, pela ajuda e incentivo no início da caminhada na agrometeorologia e, em especial, ao irmão Daniel Soares Alves pela incondicional parceria nas longas horas de estrada e de enfrentamento nas coletas de dados de campo, sob o forte calor do noroeste.

À todos os colegas, bolsistas e estagiários da área de agrometeorologia do IAPAR, pelo companheirismo na realização desta e de outras atividades cotidianas.

Ao grande amigo, que neste foi coorientador Dr. Paulo Henrique Caramori. Grande cientista, companheiro sempre presente para orientações e imenso ser humano. Profissional que escancarou as portas do seu conhecimento para que eu pudesse mergulhar neste universo da agrometeorologia.

Ao meu orientador Professor Dr. Marcelo Augusto Aguiar e Silva, excelente professor, profissional e ser humano. Por acreditar no projeto e confiar no desenvolvimento dos trabalhos. Certamente novos projetos serão realizados.

Ao Instituto Agronômico do Paraná pelo apoio que possibilitou a realização deste.

À Universidade Estadual de Londrina e do Programa de Pós Graduação em Agronomia pela formação.

À todos, meu sincero MUITO OBRIGADO!

NITSCHÉ, Pablo Ricardo. **Microclima, produtividade da pastagem e acúmulo de carbono em sistema silvipastoril**. 2020. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

RESUMO

O enfrentamento da agricultura perante às alterações climáticas globais é um desafio tanto no desenvolvimento de tecnologias para adaptação às mudanças climáticas, quanto para sistemas mitigadores. Os sistemas integrados mostram-se promissores para ambas as estratégias, atenuando extremos de temperatura e sequestrando carbono da atmosfera. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar quantitativamente os efeitos microclimáticos, os fatores limitantes do processo e estimar o sequestro de carbono num sistema silvipastoril de eucalipto com capim-mombaça na região noroeste do estado do Paraná. Os experimentos foram realizados em uma propriedade particular no município de Tapejara - PR (23° 41' S, 52° 53' O, 445 m). O primeiro estudo teve foco nas avaliações microclimáticas com medições de elementos meteorológicos, em quatro posições do sistema silvipastoril (abaixo das copas e centro das entre linhas de árvores) em duas distâncias de entre linhas de árvores (20 e 30 m), e em um ponto de pastagem a pleno sol em área adjacente. Os resultados indicaram reduções máximas de 59% da radiação solar global, de 32,9% da precipitação, de temperatura média (1,01 °C) e máxima (1,18 °C) do ar e de 56% da velocidade média do vento. Concluiu-se que as condições microclimáticas foram alteradas com a implantação do sistema silvipastoril. O segundo trabalho focou na identificação de fatores limitantes ao desenvolvimento do sistema. Foram medidas a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), a umidade do solo e a produção de matéria seca (MS) da forrageira nos mesmos locais do trabalho anterior. Os resultados indicaram redução de 39 a 51% da RFA nos espaçamentos de 20 e 30 m entre linhas de árvores. A umidade do solo foi reduzida significativamente nos pontos amostrais do sistema silvipastoril à exceção da faixa central das entre linhas de árvores no espaçamento de 30 m. A produção média de MS da forrageira foi significativamente menor, com redução de até 69,2%. Concluiu-se que o sombreamento e a competição por água reduziram a produção forrageira, sendo estes fatores limitantes, mas não impeditivos, para a condução do sistema. No terceiro trabalho estimou-se o sequestro de carbono do componente arbóreo, da forrageira e o armazenado no solo. O carbono sequestrado pelo eucalipto foi de até 25,781 ton C ha⁻¹ e pela forrageira foi maior no tratamento a pleno sol em relação ao sistema silvipastoril. Não houve diferença significativa nos estoques de carbono no solo entre os tratamentos. Concluiu-se que o sistema silvipastoril sequestra mais carbono em comparação ao sistema de pastagem a pleno sol.

Palavras chave: Mitigação e adaptação climática. *Eucalyptus grandis*. Produção forrageira. Sustentabilidade.

NITSCHKE, Pablo Ricardo. **Microclimate, pasture productivity and carbon accumulation in silvopastoral system**. 2020. 78 p. Thesis (PhD in Agronomy) - State University of Londrina, Londrina, 2020.

ABSTRACT

Coping with society in the face of global climate change is a challenge both in the development of technologies for adapting to climate change and for mitigating systems. Integrated systems are promising for both strategies, attenuating temperature extremes and sequestering carbon from the atmosphere. In this context, this work sought to present a quantitative assessment of the microclimate effects, the limiting factors of the process and an estimate of carbon sequestration in a silvopastoral system of eucalyptus with mombaça grass in the northwest region of the state of Paraná. The experiments were carried out on a private property in the municipality of Tapejara - PR (23° 41' S, 52° 53' O, 445 m). The first study focused on microclimate assessments with measurements of meteorological elements, in four positions of the silvopastoral system (below the crowns and center of between tree lines) at two distances between tree lines (20 and 30 m), and in a grazing point in full sun in an adjacent area. The results indicated maximum reductions of 59% of global solar radiation, 32.9% of precipitation, average temperature (1.01 °C) and maximum temperature (1.18 °C) of the air and 56% of the average wind speed. It was concluded that the microclimate conditions were changed with the implantation of the silvopastoral system. The second work focused on the identification of factors limiting the development of the system. Photosynthetically active radiation (PAR), soil moisture and dry matter production (DM) of the forage were measured in the same locations as the previous work. The results indicated a reduction of 39 to 51% of the PAR in the spacing of 20 and 30 m between tree lines. The soil moisture was significantly reduced in the sampling points of the silvopastoral system, except for the central strip of between tree lines in the 30 m spacing. The average production of DM from the forage was significantly lower with a reduction of up to 69.2%. It was concluded that the shading and competition for water reduced the forage production, these factors being limiting, but not impeding, for the conduction of the system. The third work estimated the carbon sequestration of the tree, forage and stored components in the soil. The carbon sequestered by eucalyptus was up to 25.781 ton C ha⁻¹ and forage was higher in full sun treatment compared to the silvopastoral system. There was no significant difference in carbon stocks in the soil between treatments. It is concluded that the silvopastoral system captures more carbon compared to the pasture system under full sun.

Keywords: Mitigation and climate adaptation. *Eucalyptus grandis*. Forage production. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Concentração de CO ₂ em Mauna Loa, no observatório do Havaí. Dados históricos (A) e dos últimos anos (B)16
Figura 2.2	Representação esquemática das inter-relações holísticas entre os principais fatores que afetam o sequestro de carbono do solo em sistemas agroflorestais25
Figura 3.1	Posicionamento das estações meteorológicas no experimento em sistema silvipastoril, Tapejara – PR, Brasil33
Figura 3.2	Esquema de alocação das estações meteorológicas entre as linhas de árvores nas áreas de pastagens sombreadas33
Figura 3.3	Temperatura média do ar (oC) e precipitação acumulada (mm) na escala decendial para o período do experimento, Tapejara – PR, Brasil35
Figura 3.4	Radiação solar global acumulada média, em MJ m ⁻² , anual e estações do ano, na escala decendial, entre as estações meteorológicas, Tapejara – PR, Brasil.....36
Figura 3.5	Temperatura média do ar (T _{med}), em oC, nas estações meteorológicas para dias quentes e amenos, Tapejara – PR, Brasil37
Figura 3.6	Médias da temperatura máxima do ar (T _{max}), em oC, nas estações meteorológicas para dias quentes e amenos, Tapejara – PR, Brasil39
Figura 3.7	Precipitação pluvial acumulada (P), em mm, na escala decendial entre as estações meteorológicas para grupo chuvoso (P≥40 mm) e seco (P<40 mm), Tapejara – PR, Brasil...30
Figura 3.8	Velocidade média do vento (V _{med}), em m s ⁻¹ , anual e nas estações do ano, entre as estações meteorológicas, Tapejara – PR, Brasil41
Figura 4.1	Posicionamento dos pontos amostrais no experimento em sistema silvipastoril, Tapejara – PR, Brasil48
Figura 4.2	Esquema representativo da malha de pontos de coleta da radiação fotossinteticamente ativa (RFA)49

Figura 4.3	Esquema de alocação das gaiolas de exclusão entre as linhas e abaixo das copas das árvores nas áreas de pastagens sombreadas.	50
Figura 4.4	Temperatura média do ar, em oC, e precipitação acumulada, em mm, na escala decendial, para o período do experimento, Tapejara – PR, Brasil	51
Figura 4.5	Média horária da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, e sombreamento, em %, para os tratamentos pleno sol, distâncias entre linhas de árvores de 20 m e 30 m, das 8 às 17 horas, para as quatro datas de coletas, entre junho de 2017 e novembro de 2018, Tapejara – PR, Brasil	52
Figura 4.6	Média diária da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para os tratamentos pleno sol, distâncias entre linhas de árvores de 20 m e 30 m, das 8 às 17 horas, para as quatro datas de coletas, entre junho de 2017 e novembro de 2018, Tapejara – PR, Brasil	53
Figura 4.7	Valores médios de umidade do solo, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, nas camadas de solo a 0-0,8, 0-0,4 e 0,5-0,8 m, para os pontos amostrais, Tapejara – PR, Brasil	54
Figura 4.8	Matéria seca (MS) de forragem, média de sete cortes, em ton ha ⁻¹ , para os pontos amostrais, para o período de março de 2018 a abril de 2019, Tapejara – PR, Brasil	55
Figura 5.1	Posicionamento dos pontos amostrais no experimento em sistema silvipastoril, Tapejara – PR, Brasil	64
Figura 5.2	Esquema de alocação das gaiolas de exclusão entre as linhas e abaixo das copas das árvores nas áreas de pastagens sombreadas.	64
Figura 5.3	Carbono capturado da atmosfera pela forrageira, média de seis cortes, em ton ha ⁻¹ , para os pontos amostrais entre julho de 2018 e abril de 2019, Tapejara – PR, Brasil	66
Figura 5.4	Médias de estoque de carbono no solo, em g dm^{-3} , nas camadas 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,4-0,5 m, para os tratamentos pleno sol, linhas de árvores a 20 m e 30 m, em março de 2019, Tapejara – PR, Brasil	67

Figura 5.5 Estoque de carbono no solo, em ton C ha⁻¹, para a camada de 0-0,5 m, para os tratamentos pleno sol, linhas de árvores a 20 m e 30 m, em março de 2019, Tapejara – PR, Brasil68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Denominação, coordenadas geográficas, altitude e condição ambiental das cinco estações meteorológicas instaladas no experimento.	34
Tabela 4.1	Análise textural do solo da área experimental, em diferentes camadas, em g kg ⁻¹	47
Tabela 4.2	Análise química do solo da área experimental, nas camadas 0,0-0,1 (1), 0,1-0,2 (2), 0,2-0,3 (3), 0,3-0,4 (4) e 0,4-0,5 m (5)...	47
Tabela 4.3	Produção de matéria seca (MS), em ton ha ⁻¹ ano ⁻¹ , e redução percentual em relação ao pleno sol (TAP1), de <i>Megathyrsus maximus</i> (capim-mombaça), para o período de março de 2018 a abril de 2019, Tapejara – PR, Brasil.	56
Tabela 5.1	Análise textural do solo da área experimental, em diferentes camadas, em g kg ⁻¹	61
Tabela 5.2	Análise química do solo da área experimental, nas camadas 0,0-0,1 (1), 0,1-0,2 (2), 0,2-0,3 (3), 0,3-0,4 (4) e 0,4-0,5 m (5)...	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	15
2.2	SISTEMA SILVIPASTORIL	17
2.3	MICROCLIMA EM SISTEMA SILVIPASTORIL	18
2.4	SEQUESTRO DE CARBONO EM SISTEMAS INTEGRADOS.....	21
2.5	FATORES LIMITANTES DO SISTEMA SILVIPASTORIL	25
3	ARTIGO A - SISTEMA SILVIPASTORIL CAUSA ALTERAÇÕES NO MICROCLIMA NO NOROESTE DO PARANÁ, BRASIL	29
3.1	INTRODUÇÃO	31
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.2.1	Local De Experimentação.....	32
3.2.2	Caracterização Microclimática.....	32
3.2.3	Análise Estatística	34
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
3.4	CONCLUSÕES	42
4	ARTIGO B - COMPETIÇÃO POR ÁGUA E LUZ SÃO FATORES LIMITANTES PARA PRODUÇÃO FORRAGEIRA EM SISTEMA SILVIPASTORIL NO NOROESTE DO PARANÁ, BRASIL	43
4.1	INTRODUÇÃO	45
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
4.2.1	Local De Experimentação.....	46
4.2.2	Experimentação.....	47
4.2.3	Radiação Fotossinteticamente Ativa (Rfa).....	48
4.2.4	Umidade Do Solo	49
4.2.5	Estimativa Da Produção Forrageira.....	50
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.4	CONCLUSÕES	57

5	ARTIGO C - SEQUESTRO DE CARBONO EM SISTEMA SILVIPASTORIL DE EUCALIPTO NO NOROESTE PARANAENSE.	58
5.1	INTRODUÇÃO	60
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	61
5.2.1	Local De Experimentação	61
5.2.2	Sequestro De Carbono	62
5.2.2.1	Estimativa do estoque de biomassa e carbono do tronco do componente arbóreo	62
5.2.2.2	Estimativa do estoque de biomassa e carbono no componente forrageiro	63
5.2.2.3	Estimativa do estoque de carbono no solo	65
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.4	CONCLUSÕES	68
6	CONCLUSÕES GERAIS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas globais são uma realidade e apresentam-se como um desafio para o setor agrícola, tanto no âmbito do desenvolvimento de tecnologias para adaptação às mudanças climáticas, quanto para sistemas mitigadores.

As causas desses problemas são conhecidas, alterações no uso e ocupação da terra, fontes energéticas baseadas em queima de combustíveis fósseis, degradação de recursos hídricos, entre tantas outras.

Além da compreensão dos motivos causadores das alterações e de suas possíveis consequências, a ciência tem papel preponderante na proposição de soluções aos enfrentamento da problemática ambiental.

Pesquisas têm sido realizadas no intuito de fornecer soluções à sociedade frente às estas alterações. Estas buscam tecnologias que sejam aplicáveis em diferentes ambientes, viáveis economicamente, justas socialmente e factíveis ambientalmente.

Neste contexto, este trabalho buscou apresentar uma avaliação quantitativa dos efeitos da implantação de uma técnica de mitigação e de adaptação aos efeitos das alterações regionais do clima, o sistema silvipastoril.

Estes sistemas combinam espécies florestais e forrageiras numa mesma área. Mostram-se promissores pois pressupõem que a associação de árvores com pastagens proporciona atenuação nos extremos climáticos, melhoria no conforto térmico animal e aumento da fixação de carbono da atmosfera. O uso de espécies arbóreas em meio às pastagens sugere a possibilidade da manutenção de temperaturas mais amenas durante os verões e invernos.

No entanto, as interações entre os elementos dos sistemas integrados ocorrem em todos os sentidos e em diferentes magnitudes, necessitando assim, de aprofundados estudos para sua melhor compreensão. Procurou-se neste trabalho, inclusive, quantificar alguns aspectos limitantes do sistema avaliado.

A região tropical tem como característica climática apresentar altas temperaturas, principalmente na primavera e verão, além de registrar uma tendência ao aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos, tais como estiagens prolongadas, chuvas de alta intensidade e ondas de calor, entre outros.

Estas condições ambientais adversas afetam diretamente as atividades pecuárias, que já apresentam sinais de saturação em função de sua característica

principal de exploração ser a monocultura. Nestas regiões as buscas por alternativas de sistemas alternativos são ainda mais necessárias.

Nesta tese foram testadas as seguintes hipóteses:

1) Sistemas silvipastoris proporcionam atenuação nos valores de alguns elementos meteorológicos, alterando o microclima e contribuindo para a adaptação às mudanças climáticas;

2) A inserção do componente arbóreo, mesmo acirrando a competição por radiação solar e água, não inviabiliza a produção forrageira;

3) A inserção do componente florestal amplia o sequestro de carbono da atmosfera, mitigando os efeitos das emissões de gases de efeito estufa.

Para verificar a hipótese 1, foram realizadas coletas de dados meteorológicos com objetivo de quantificar as alterações microclimáticas. A hipótese 2 foi verificada com a coleta de dados de radiação fotossinteticamente ativa, umidade do solo e produção forrageira. A hipótese 3 foi experimentada realizando medidas de biomassa do componente arbóreo e forrageiro para estimar o carbono sequestrado. Todas as coletas de dados de campo foram realizadas em um sistema silvipastoril na região noroeste do estado do Paraná.

Os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos: a) Quantificar as diferenças dos principais elementos agrometeorológicos num sistema silvipastoril com eucalipto em comparação a uma pastagens a pleno sol; b) Identificar os principais fatores limitantes para produção forrageira no sistema silvipastoril; d) Estimar o carbono sequestrado da atmosfera e armazenado no sistema silvipastoril em comparação com as pastagens a pleno sol.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Diante das diversas evidências das alterações climáticas globais associadas ao aumento da capacidade de processamento de dados em larga escala, as pesquisas sobre o tema no mundo tiveram relevante aumento a partir dos anos 70. Destaca-se a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), criado em 1988, com o objetivo de avaliar as alterações do clima baseado no conhecimento científico disponível. O IPCC não tem como missão conduzir pesquisas sobre o clima, mas revisar e avaliar as mais recentes informações técnico-científicas relacionadas ao tema, sintetizando-as em documentos e relatórios (IPCC, 2014). Estes são norteadores da atual situação climática do nosso planeta.

As principais indicações do IPCC relatadas em suas publicações periódicas são:

- A temperatura global aumentou em aproximadamente 0,5 °C, desde o início da revolução industrial em meados do século XVIII (IPCC, 1990).

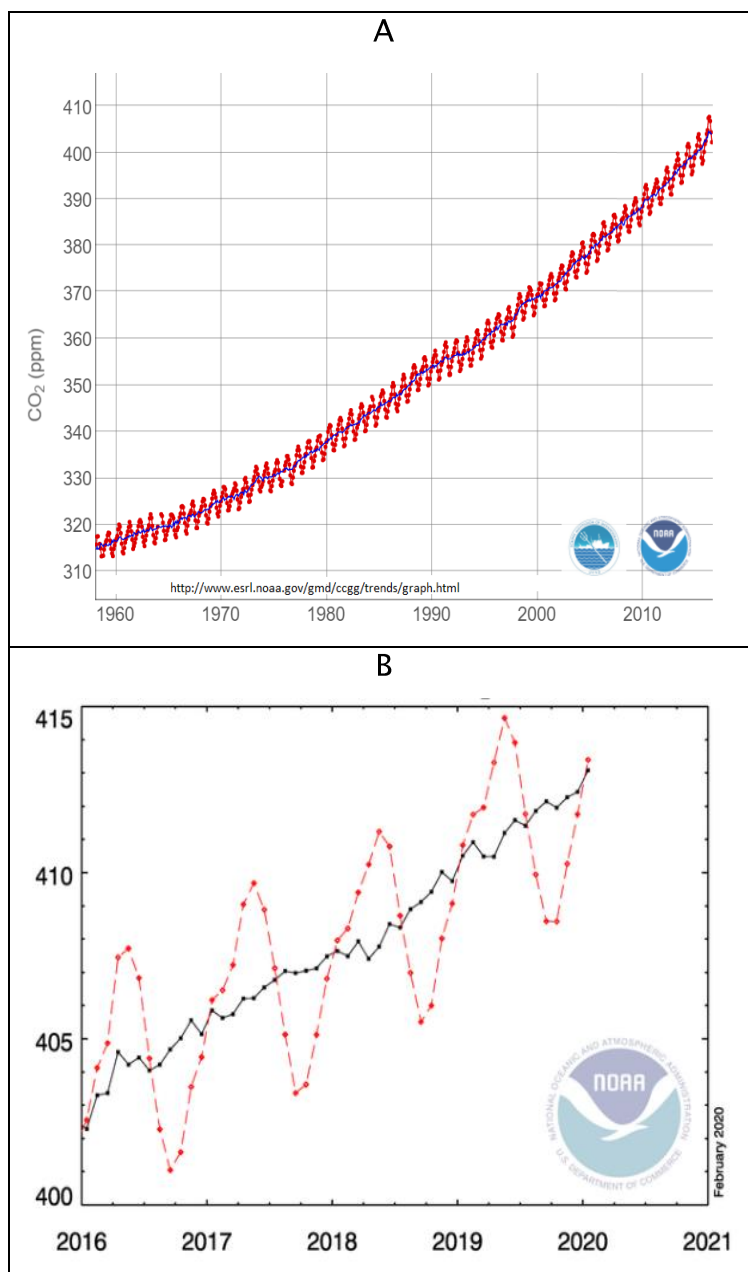
- O aumento da concentração dos gases geradores de efeito estufa na atmosfera continuam aumentando (IPCC, 1995), e estes têm relação com as mudanças ocorridas no planeta (IPCC, 2007) (Figura 2.1).

Em 2013 o IPCC fez atualizações sobre as mudanças climáticas em escala global. Seguem as principais conclusões: Ocorreu aumento médio global das temperaturas medidas sobre terra e oceanos de 0,85 °C entre 1880 e 2012; As três últimas décadas têm sido sucessivamente mais quentes em todo o planeta; A precipitação mostra tendências de aumento ou diminuição, conforme a região geográfica; O número de dias frios diminuiu e o número de dias quentes aumentou em escala global; Aumentou a ocorrência de eventos severos; Aumentou o nível dos oceanos devido ao derretimento das geleiras (IPCC, 2013).

Em simulações realizadas para quatro diferentes cenários de aumento de concentrações de CO₂ possíveis de ocorrer até o final deste século, projeta-se aquecimento de 1,7 a 4,8 °C (IPCC, 2014).

Frente a estas evidências, ações de adaptação e mitigação climática devem ser adotadas para que os efeitos das alterações sobre o clima possam ser enfrentados.

Figura 2.1. Concentração de CO₂ em Mauna Loa, no observatório do Haváí. Dados históricos (A) e dos últimos anos (B).



Fonte: NOAA (2020)

O conceito de adaptação às mudanças climáticas pode ser entendido como uma série de ações de respostas aos impactos atuais e futuros com o objetivo de minimizar seus danos (LINDOSO; MARIA, 2013).

Já o conceito de mitigação envolve todo tipo de intervenção humana voltada para a redução de emissões dos gases de efeito estufa, bem como medidas de sequestro do CO₂ atmosférico (DAIOGLOU *et al.*, 2019).

A aplicação destes conceitos pode ser realizada nos mais diversos setores da sociedade, sendo a agropecuária destaque, pois os impactos do aquecimento global afetam de forma significativa o cultivo de alimentos e o desempenho pecuário. As emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) resultam em alterações nos padrões de precipitação, redução da oferta de terras agricultáveis e vulnerabilidade na infraestrutura urbana (IPPC, 2007).

Dentre as medidas de adaptação climática na agropecuária os sistemas silvipastoris representam uma excelente oportunidade, devido ao seu potencial de reduzir os extremos térmicos e promover o conforto térmico animal. Já para as ações mitigatórias, o carbono capturado da atmosfera é estocado na forma de biomassa pelo componente arbóreo em sistemas silvipastoris (MARIA et al., 2017).

2.2 SISTEMA SILVIPASTORIL

Os sistemas integrados são compostos pelo cultivo de espécies agrícolas forrageiras com a associação de plantas (arbóreas, perenes ou herbáceas) e de animais. Esta integração de componentes pecuário, agrícola e florestal compõe o sistema silvipastoril (SSP) (BALBINO *et al.*, 2011). Neste sistema, há um alto potencial de produção aliado a preservação ambiental. Segundo Nicodemo *et al.* (2010), SSP é a combinação intencional de árvores, pastagem e gado numa mesma área ao mesmo tempo e manejados de forma integrada, com o objetivo de incrementar a produtividade por unidade de área. Nesses sistemas, ocorrem interações em todos os sentidos e em diferentes magnitudes.

Os SSP têm como objetivo incrementar a produtividade, beneficiando-se das vantagens que cada um tem em separado e associados, ou seja, a rapidez da produção de proteína animal pela pecuária, com as características favoráveis do mercado de produtos florestais e madeireiros (CASTRO SANTOS *et al.*, 2018), melhoria do conforto térmico e das condições físicas do solo e ampliação da fixação de carbono com consequente adaptação aos efeitos do aquecimento global (OLIVEIRA *et al.*, 2015; PACIULLO *et al.*, 2011).

Os sistemas integrados apresentam grande potencial de benefícios econômicos e ambientais para toda a cadeia produtiva. São sistemas multifuncionais, onde existe a possibilidade de intensificar a produção pelo manejo integrado dos recursos naturais, evitando sua degradação, além de recuperar sua capacidade produtiva (PEZZOPANE *et al.*, 2015). Por exemplo, a

criação de animais com árvores dispersas na pastagem, árvores em divisas e em barreiras de quebra-ventos, pode reduzir a erosão, melhorar a conservação da água, reduzir a necessidade de fertilizantes químicos, capturar e fixar carbono, diversificar a produção, aumentar a renda e a biodiversidade, melhorar o conforto dos animais (BALBINO, 2011).

Segundo Paciullo *et al.* (2008), de maneira geral as principais vantagens desse sistema são: aumento da biodiversidade, fixação de nitrogênio, ciclagem de nutrientes, redução da erosão do solo, proteção de nascentes, melhoria do valor nutricional da forragem para os animais, possibilidade de suplementação alimentar para os animais por meio das folhas de algumas arbóreas ou arbustivas; aumento da retenção de carbono no sistema, melhoria das propriedades químicas e físicas do solo, possibilidade de aumentar oferta de matéria seca, melhor conforto térmico para os animais por meio da sombra das árvores.

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), há grandes oportunidades de redução de emissões diretas da atividade agropecuária melhorando o manejo das pastagens (AZEVEDO; ANGELO, 2018). Quando em estado de degradação, perdem biomassa do solo e emitem carbono e, quando bem manejadas, tornam-se sumidouros de carbono que podem compensar as emissões de metano. Entre 1990 e 2016, as emissões brutas de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil passaram de 1,72 para 2,27 bilhões de toneladas de gás carbônico equivalente, registrando um aumento de 32%. Entre 2015 e 2016 houve um aumento de 9% das emissões, mesmo num período de recessão, devido ao aumento das emissões por mudanças de uso do solo, especialmente pelo aumento do desmatamento na Amazônia e agricultura, pois o menor abate de bovinos, causado pela recessão, provocou aumento de rebanho (AZEVEDO; ANGELO, 2018).

2.3 MICROCLIMA EM SISTEMA SILVIPASTORIL

Dentre as estratégias adotadas para a mitigação ambiental, a incorporação de microclimas adequados se torna fundamental para o setor agropecuário, uma vez que as condições climáticas são fatores relevantes na produtividade dos animais e cultivos.

De acordo com Roserberg, Blad e Verma (1983), microclima é definido como o clima próximo ao solo. Ou seja, é o clima em que plantas e animais vivem. É distinto de macroclima, em que prevalece as condições acima dos primeiros metros do solo. Sendo assim, alterações nas condições microambientais podem beneficiar tanto plantas como animais, minimizando as alterações das condições macroclimáticas.

Os microclimas na interface terra–ar afetam o funcionamento fisiológico de organismos que, por sua vez, influenciam a estrutura, composição e o funcionamento dos ecossistemas (ZELLWEGER *et al.*, 2019; SILVA–PANDO *et al.*, 2002). A identificação de microclimas em cada região agropecuária, bem com seus fatores de influência, é essencial para o correto manejo florestal em condições de mudanças climáticas. Como exemplo, a existência de refúgios e abrigos em microclimas promovem ambientes com temperaturas inferiores aos ambientes em pleno sol, portanto, podem proporcionar maior conforto térmico aos animais. Greiser *et al.* (2018) sugerem que o manejo florestal (tamanho, estrutura e composição do povoamento) e a conservação podem desempenhar um papel importante na amplificação ou impedimento dos efeitos dos fatores climáticos na temperatura próxima do solo, ou seja, podem modificar o microclima, sendo então, estratégias eficazes de mitigação ambiental frente aos impactos do aquecimento global.

Ao longo dos últimos anos foram realizados diversos estudos sobre sistemas silvipastoris, pois buscam associar o comportamento ingestivo animal ao seu conforto térmico. Vieira Junior *et al.* (2019) caracterizaram o microclima em um sistema silvipastoril, área de refúgio e a pleno sol. Verificaram a preferência de bovinos em realizar suas atividades sob a sombra das árvores. O estudo destaca que o sistema silvipastoril propiciou a mudança no hábito alimentar e a otimização do tempo de pastejo.

As condições climáticas estão diretamente relacionadas ao conforto térmico animal. Diversos estudos apontam a influência do estresse ambiental no desempenho produtivo animal. Neiva *et al.* (2004) relataram a queda de desempenho em ovinos quando expostos a condição ausente de sombra, mesmo com uma dieta alimentícia específica para alto desempenho produtivo.

Além de ovinos, os bovinos leiteiros demonstraram que mesmo em condições de temperatura ambiente menor que 24 °C, a sombra (natural ou artificial) ainda assim se faz necessária para mitigar o estresse ambiental nos horários mais quentes do dia (RODRIGUES *et al.*, 2010). Sendo assim, o tamanho

da área de sombra disponível ao animal influencia a qualidade desta sombra, e interfere no consumo alimentar e produção láctea.

A qualidade de um sistema silvipastoril depende de alguns fatores. A espécie arbórea que fornece a sombra, a anatomia foliar e resistência ao sombreamento das plantas forrageiras, características climáticas e de solo, são fatores que afetam a otimização deste sistema. Partindo dessa premissa, Santos *et al.* (2018) avaliaram os efeitos de diferentes arranjos de eucaliptos sobre o crescimento morfoanatômico de plantas forrageiras. Como resultado, a interferência do sombreamento pelo eucalipto alterou as características das folhas da forrageira sombreada em relação à forragem a pleno sol. Isto é devido à adaptação da forrageira à baixa incidência de luz, que reduz sua atividade fisiológica e crescimento.

As espécies forrageiras que apresentam plasticidade fenotípica, em resposta às variações climáticas sazonais e aos níveis de sombreamento ambiental, são as que possuem melhores potenciais para utilização em sistemas silvipastoris (PACIULLO *et al.*, 2008).

Mesmo com um sistema silvipastoril consolidado, o fator da sazonalidade dos parâmetros climáticos entre as estações do ano resulta em uma grande variabilidade microclimática. Os trabalhos de Greiser *et al.* (2018) e Aalto *et al.* (2017) modelaram o microclima e a topografia, respectivamente, considerando as variações durante um ano inteiro. Os autores conseguiram complementar a caracterização do microclima a partir de modelos que preveem o sistema agroflorestal em toda escala temporal.

No Brasil, o sistema silvipastoril é frequentemente manejado por espécies arbóreas de eucalipto. A escolha do eucalipto, segundo Lucas *et al.* (2015) é compreendida pelo seu rápido crescimento permitir o uso da madeira para diversas finalidades, possuir tecnologias avançadas de melhoramento genético e pesquisa científica com manejo, e possibilitar sombra e abrigo contra os extremos climáticos. Em vista destas características, Santos *et al.* (2016) compararam o crescimento da massa e da estrutura da forragem *Brachiaria brizantha* associadas com duas espécies de eucaliptos (*Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*) e em pleno sol. O trabalho demonstrou que houve alterações positivas em ambas características, tanto nos períodos chuvosos quanto nos secos.

O fator temperatura afeta diretamente o sistema silvipastoril, pois pode interferir na produtividade e na qualidade das forrageiras. Os estudos de Vieira

Junior *et al.* (2019) constataram redução na temperatura do ar entre 0,4 e 1,6 °C com o sombreamento do *Eucalyptus grandis*. Além desses autores, Pezzopane *et al.* (2015), usando as espécies arbóreas Angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), Canafístula (*Peltophorum dubium*), Ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis*), e Pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*), observaram que a temperatura mínima média não variou significativamente em comparação com a área ao sol. Em compensação, a temperatura máxima média da parte arborizada apresentou-se inferior 0,8 °C em relação à área ao sol.

A presença das espécies arbóreas é fundamental para o funcionamento do sistema silvipastoril. Entretanto, deve-se tomar o cuidado para que o sombreamento excessivo não interfira na fotossíntese das forrageiras. Segundo Coelho *et al.* (2014), o arranjo espacial dos eucaliptos prevê a quantidade de luz interceptada pela copa das árvores. No estudo destes autores, o uso de linhas duplas de eucalipto resultou na redução da quantidade de radiação incidente nas forragens em relação ao uso de linhas simples, mas não reduziu a produtividade do pasto. Deve-se encontrar o equilíbrio da quantidade de árvores para não influenciar negativamente o sistema.

Portanto, a importância em caracterizar o microclima permite definir o correto manejo em sistemas silvipastoris, essencial para atingir uma produtividade com qualidade, sustentabilidade e competitividade.

2.4 SEQUESTRO DE CARBONO EM SISTEMAS INTEGRADOS

A intensificação do aquecimento global é determinada por diversos fatores. Pode-se destacar o aumento da emissão dos gases de efeito estufa (GEE), ocasionado principalmente pela queima de combustíveis fósseis. Carvalho *et al.* (2010) cita também outras fontes de GEE no Brasil: mudanças no uso do solo, agricultura e pecuária.

Uma das principais alternativas para a mitigação de GEE é o sequestro de carbono nos solos. O IPCC (2007) indicou que as florestas podem contribuir ativamente para o sequestro. Elas desempenham um papel significativo no ciclo global do carbono, atuando como os principais contribuintes e sumidouros do CO₂ atmosférico. Entretanto, o correto manejo do solo determina se esta contribuição é positiva ou negativa.

O manejo adequado do solo e da vegetação deve ter como premissa básica a utilização de métodos com o mínimo revolvimento; sistemas de rotação/sucessão de culturas que incluam plantas com alta produção de resíduos vegetais; e plantas leguminosas capazes de acumular nutrientes (CARVALHO *et al.*, 2010). Portanto, no setor agropecuário, o correto manejo pode propiciar o aumento do estoque de carbono no solo, assim como reduzir a emissão de GEE.

Neste contexto de promoção de sumidouros de carbono e mitigação de GEE, os sistemas agroflorestais contribuem para melhorar o armazenamento de carbono orgânico no solo na presença de raízes profundas de árvores. Chatterjee *et al.* (2018) buscaram comparar o armazenamento de carbono entre sistemas integrados e outros sistemas como: agricultura, silvicultura, pastagem, e área não cultivada. No geral, sistemas agroflorestais e agrícolas resultaram em valores positivos de armazenamento de carbono orgânico até um metro de profundidade do solo. Os autores enfatizam o papel de sistemas agroflorestais na adaptação às mudanças climáticas e como estratégia de mitigação de impactos ambientais.

Um dos compromissos brasileiros, dentro do Plano para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), é o aumento da área de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta em quatro milhões de hectares, o que corresponderia a um potencial de mitigação de 18 a 22 milhões ton CO₂ equivalente (BRASIL, 2012). Entretanto, não existe uma especificidade local em relação ao real potencial de mitigação desses sistemas, sendo as estimativas apresentadas pelo governo brasileiro de maneira generalizada.

Considerando o estudo realizado por Rocha *et al.* (2017), com a captura de 16,12 ton CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ gera-se um saldo aproximadamente quatro vezes maior que o proposto no Plano ABC. Com base neste estudo e considerando a meta de ampliação da área desses sistemas em cerca de quatro milhões de hectares, a estimativa do potencial de mitigação seria de 64,48 milhões ton CO₂ equivalente. Portanto, observa-se que a base de cálculo apresentada subestima o potencial de mitigação desses sistemas.

Os sistemas silvipastoris têm sido reconhecidos como importantes técnicas na estratégia de sequestrar e fixar carbono da atmosfera. A utilização destes sistemas, em detrimento de pastagens em monocultivo, pode promover aumento no estoque de carbono e redução dos impactos decorrentes das

emissões de gases de efeito estufa (BERNARDINO; GARCIA, 2009). Acredita-se que estes sistemas possam ser mais eficientes que os tradicionais monocultivos florestais, pois são formados por diferentes componentes que se beneficiam das suas interações.

Através do processo de fotossíntese e a imobilização do carbono em reservatórios estáveis, tais como a madeira e o solo, o CO₂ é sequestrado da atmosfera (BARRETO *et al.*, 2009). Os sistemas silvipastoris, através da componente arbórea, são eficazes em realizar o sequestro do carbono permitindo o convívio harmônico com a atividade principal, a pecuária, sendo então os de maior potencial de sequestro de carbono da atmosfera (VALE *et al.*, 2006). Sendo assim, coberturas florestais são consideradas grandes sequestradoras de carbono da atmosfera, e os sistemas florestais considerados grandes reservatórios (DENARDIN *et al.*, 2014).

A quantificação do sequestro de carbono com precisão e a mensuração dos valores econômicos para os sistemas florestais é um grande desafio. A partir da modelagem, é possível aferir o carbono sequestrado. Segundo Chu *et al.* (2019), 67% do carbono fica armazenado no solo após a implantação do sistema com dinâmica florestal. Os autores destacaram que este baixo investimento retornou grandes benefícios de sequestros de carbono. O valor econômico do sequestro de carbono aumentou continuamente por 25 anos, além de auxiliar na recuperação ambiental e microclimática da área.

Em estudos de escala macroclimática, Naidoo *et al.* (2008) mapeou o carbono global sequestro usando o Modelo de Ecossistema Terrestre. Os autores encontraram alta taxa de sequestro de carbono no leste dos EUA, norte da América do Sul, meio da África, sudeste da China e leste da Austrália.

O estudo de Fernandes *et al.* (2018) estimou o estoque de carbono em diferentes desenhos de Sistemas Agroflorestais (SAF) biodiversos na área de proteção ambiental da Bahia. A biomassa acima e abaixo do solo foi determinada pelo método indireto, e por meio desta estimaram o estoque de carbono. Os autores ressaltam que os desenhos com maior densidade relativa de frutíferas e árvores de sombra proporcionaram maior armazenamento de carbono, e a riqueza e diversidade de espécies na fase de implantação do SAF é diretamente proporcional à quantidade de carbono sequestrado.

Os estudos sobre os manejos florestais variam conforme as regiões e suas propriedades ambientais. Por isso, Hutchinson *et al.* (2007) estudaram diversas regiões para explorar o potencial sequestro de carbono na agricultura. Em

regiões temperadas, o aumento do sequestro de carbono envolve aumento na frequência de cultivo (reduzindo o pousio), uso de forragem nas rotações de cultura (redução da intensidade e frequência de preparo da lavoura) e adoção de sistemas agroflorestais. Nos trópicos, o sistema agroflorestal continua sendo o principal método seguido de melhorias da fertilidade dos solos agrícolas e pastagens em sistemas extensivos. Nair *et al.* (2009) relatam que as regiões áridas, semiáridas e locais degradados têm um potencial de sequestro de carbono mais baixo do que aqueles em áreas úmidas férteis.

Por si só, o sequestro de carbono em solos agrícolas pode fazer contribuições modestas, entre 3 e 6% do combustível fóssil, para a mitigação das emissões globais de gases com efeito de estufa (NAIR *et al.*, 2009).

As recentes mudanças climáticas impactaram o sequestro de carbono de diversas regiões. Em regiões turfeiras, conhecidas pelo alto potencial de sequestro e retenção de grandes quantidades de CO₂, Lunt *et al.* (2019) relataram redução do carbono no sudeste da Inglaterra, afetando no balanço de carbono do ecossistema.

As estimativas do potencial de sequestro de carbono acima do solo baseiam-se no pressuposto que 45 a 50% dos ramos e 30% do peso seco da folhagem constituem de carbono. Entretanto, abaixo do solo o carbono pode ser sequestrado de duas maneiras: diretamente e indiretamente. O sequestro direto ocorre por meio de reações químicas inorgânicas que convertem CO₂ em compostos inorgânicos do solo, tais como cálcio e carbonatos de magnésio. O sequestro indireto acontece quando as plantas fotossintetizam CO₂ atmosférico e convertem em biomassa da planta. Parte desta biomassa vegetal é indiretamente isolada como carbono orgânico do solo durante os processos de decomposição (NAIR *et al.*, 2009).

Os benefícios dos sistemas silvipastoris vão além da fixação de carbono (CO₂), pois reduzem a emissão de óxido nitroso (N₂O) e reduzem a emissão do gás metano (CH₄) pelos ruminantes (BONATO; HENKES, 2013).

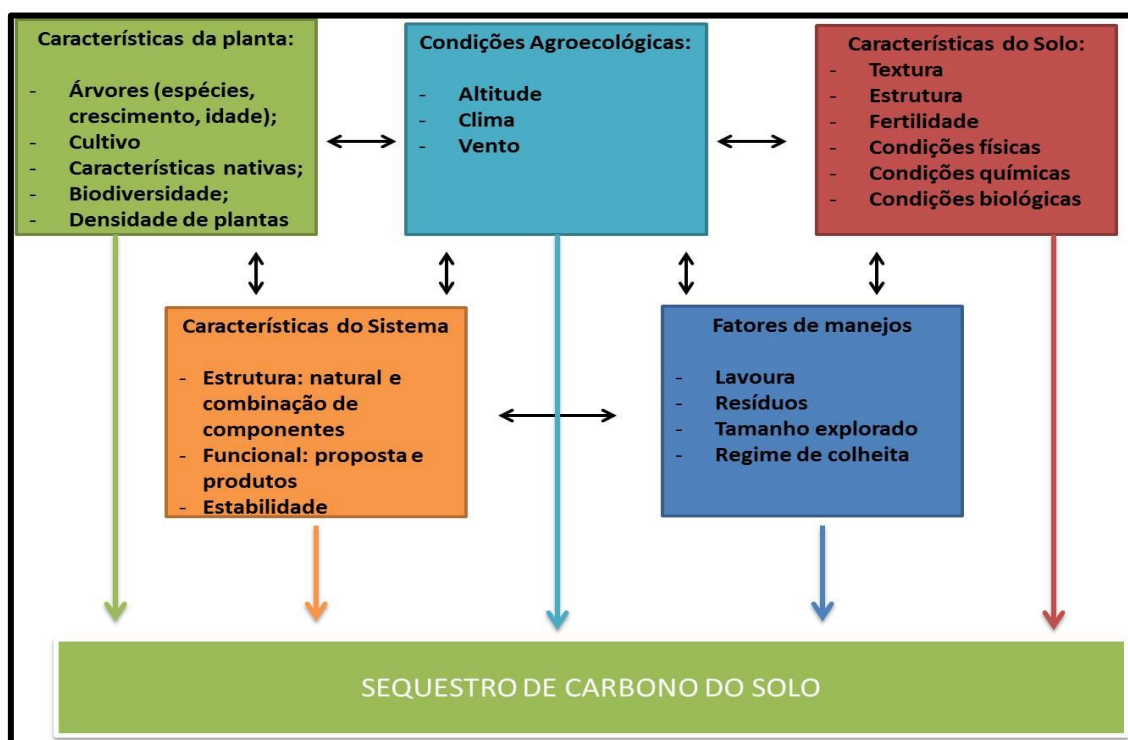
O potencial de estocagem de carbono deve ser considerado na escolha do arranjo dos sistemas integrados, pois o incremento médio de carbono pode atingir toneladas de C ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo da sua estrutura e idade (TORRES *et al.*, 2014).

O eucalipto, a grevilha, os bambus são espécies arbóreas com grande capacidade de sequestrar CO₂ da atmosfera, através do acúmulo de carbono na biomassa e no solo. Uma tonelada de carbono corresponde a 3,67 toneladas de

CO₂ equivalente, que é a moeda de troca no mercado de carbono (MORAIS, 2014).

Os estudos de Nair *et al.* (2009) classificaram em ordem decrescente os sistemas de manejo em termos de quantidade de carbono orgânico do solo como: florestas, sistemas agroflorestais, plantações de árvores, cultivos aráveis. O funcionamento dos sistemas agroflorestais depende de diversos fatores e condições, que influenciam a quantidade de sequestro de carbono do solo. Estes autores demonstraram um esquema (Figura 2.2) que elenca os fatores de influência para o sequestro de carbono e suas interconexões.

Figura 2.2. Representação esquemática das inter-relações holísticas entre os principais fatores que afetam o sequestro de carbono do solo em sistemas agroflorestais.



Fonte: Adaptado de Nair *et al.* (2009).

2.5 FATORES LIMITANTES DO SISTEMA SILVIPASTORIL

O sistema silvipastoril funciona de forma integrada, com o objetivo de potencializar a produtividade animal, proporcionar ambiente adequado às forrageiras e proporcionar a conservação dos solos e da água. Entretanto, essas interações são extremamente complexas (FEY *et al.*, 2015).

A importância da radiação solar no sistema depende da forma como atinge o solo e as plantas. Segundo Gomez *et al.* (2018), a radiação do sol é uma radiação eletromagnética que se propaga no vácuo em todas as direções. Assim, ela atinge a superfície de forma direta e difusa, em que os obstáculos naturais são a atmosfera e as árvores. Conseqüentemente, a energia disponível que incide sobre as forrageiras pode ser limitada pelo seu sombreamento, pois cria condições restritivas de luminosidade e fotossíntese.

Para as plantas, a radiação solar representa praticamente a única fonte de energia para os processos bioquímicos e fisiológicos. Ressalta-se que apenas uma parcela do espectro solar é utilizada pelos vegetais no processo de conversão devido a sensibilidade seletiva dos cloroplastos. Esta parcela é chamada de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), e abrange os comprimentos de onda entre 400 e 700 nm (ROSSI *et al.*, 2018; ASSIS; MENDEZ, 1989). Com a absorção de RFA, as plantas convertem energia luminosa em energia útil, e assim produzem carboidratos e biomassa essenciais para seu crescimento e desenvolvimento (KERBAUY, 2008).

No sistema agroflorestal a radiação solar disponível para as espécies forrageiras influencia o crescimento da forragem. Desta forma, Varella *et al.* (2008) e Radomski e Ribaski (2009) elencaram quatro fatores que se relacionam com a luz solar e interferem no sistema: 1) espaçamento, por meio da densidade arbórea e arranjo do plantio; 2) seleção de espécies com copa não muito densa; 3) desbaste e podas; 4) forrageiras tolerantes ao sombreamento.

Por isso, é necessário conhecer o perfil de interceptação de RFA pelas espécies arbóreas no sistema agrosilvipastoril, de forma que fatores excessivos não comprometam a produtividade e qualidade da forrageira. Para as espécies arbóreo-arbustivas que demonstram frequentes quedas de folhas, o acúmulo dessa matéria orgânica pode interferir no crescimento e rebrotamento da forragem. Da mesma forma, o excesso de sombra ou a alta movimentação de animais sob a copa das árvores pode provocar a compactação do solo, com conseqüente raleamento e perda de cobertura vegetal do mesmo. Por isso, Schembergue *et al.* (2017) defendem o desenvolvimento de modelos de previsão de crescimento no sistema para que a cobertura arbórea atenda o conforto animal e a pastagem.

Para que o sistema silvipastoril atinja ótima relação de planta-animal-solo, é necessário que as propriedades físico-químicas do solo estejam propícias ao ambiente. A qualidade física do solo depende de fatores como:

disponibilidade de água, aeração, resistência à penetração de raízes, teor de oxigênio e nutrientes (MARTINKOSKI *et al.*, 2017). Por isso, a sua deficiência prejudica o desenvolvimento radicular das espécies arbóreas (TORMENA *et al.*, 1998).

Desta maneira, a umidade do solo é um fator relevante no sistema. De acordo com Reichert *et al.* (2007), o sombreamento das áreas florestais e a serapilheira formada contribuem para conservar e concentrar umidade de forma estável. Além disso, Junqueira *et al.* (2013) observaram que o sistema agroflorestal contribui para aumentar a capacidade do solo em reter umidade, principalmente em períodos de seca, quando as espécies arborizadas resistem ao período de estiagem, e outras conseguem reter a umidade do orvalho noturno.

O fato de haver competição por água entre as espécies arbóreas pode limitar o sistema agroflorestal, juntamente com sua produtividade. Os estudos de Nicodemo (2011) relataram interações biofísicas entre árvores, solo e cultivos agrícolas em regiões árida e semiárida. Consequentemente, resultaram em competição por água entre as árvores e o sub-bosque. Por isso, o uso de sistemas agroflorestais com espécies arbóreas de alta densidade não é recomendado nestas regiões.

Solos com baixa disponibilidade de água podem limitar o crescimento de forragem causado pelo fechamento estomático, que é um mecanismo de defesa para reduzir a perda de água pela transpiração (FEY *et al.*, 2015).

Os estudos de Pollock *et al.* (2009) relataram a influência da umidade do solo, baseado no desempenho de um sistema silvipastoril com 660 mm ano⁻¹ de precipitação média e com secas no verão. No início do sistema, as árvores e pastagens demonstraram relação de complementaridade, apresentaram boa umidade de solo e distribuição de raízes. Posteriormente, as árvores passaram a competir por água com as forrageiras do sub-bosque, com absorção de água a profundidades superiores a 1,5 m, em ambas.

A menor disponibilidade de água nos sistemas arborizados pode advir também da perda por gotas de chuva interceptadas pelas copas das árvores, que são evaporadas e resultam em perdas significativas de água (GYENGE *et al.*, 2002; DOUGLAS *et al.*, 2006).

Desta forma, o sistema silvipastoril busca a interação de animais-plantas forrageiras-árvores na mesma área. Por sua complexidade em comparação com outros sistemas, deve-se haver um planejamento rigoroso desde o

desenvolvimento das árvores, de modo a equilibrar o ambiente e prever todos os aspectos morfológicos e climatológicos possíveis.

3 ARTIGO A – SISTEMA SILVIPASTORIL CAUSA ALTERAÇÕES NO MICROCLIMA NO NOROESTE DO PARANÁ, BRASIL

RESUMO

A busca por sistemas de produção mais intensivos e sustentáveis é constante no setor pecuário. Os sistemas silvipastoris apresentam-se potencialmente promissores pois aliam a produção de proteína animal e produtos florestais numa mesma área, propiciando condições térmicas adequadas aos animais. Sendo assim, este trabalho objetivou quantificar as alterações microclimáticas em um sistema silvipastoril na região noroeste do estado do Paraná. O estudo foi realizado em Tapejara – PR (23° 41' S, 52° 53' O, 445 m), durante o período de dezembro de 2016 a abril de 2019. Neste período foram continuamente medidos a radiação solar global, precipitação, temperatura do ar e velocidade do vento, em quatro posições do sistema silvipastoril (abaixo das copas e centro das entre linhas de árvores) em duas distâncias de entre linhas de árvores (20 e 30 m), e em um ponto de pastagem a pleno sol em área adjacente. Os resultados indicaram redução de até 32,9% para precipitação ($P > 40$ mm), 1,01 °C para temperatura média do ar (dias quentes), 1,18 °C para temperatura máxima (dias quentes), 56% para velocidade média do vento (outono) e 56,5% para radiação solar global (inverno). Entre os valores obtidos nas estações meteorológicas TAP1 e TAP4 (pleno sol e centro entre linhas afastadas em 30 m), não houve diferenças significativas, indicando que a partir de distâncias maiores entre linhas de árvores o microclima pode sofrer menores alterações. Concluiu-se que as condições microclimáticas foram alteradas com a implantação do sistema silvipastoril na região noroeste do Paraná.

Palavras-chave: sustentabilidade; sistemas integrados; *Megathyrus maximus*; *Eucalyptus grandis*.

ABSTRACT

The search for more intensive and sustainable production systems is constant in the livestock sector. The silvopastoral systems are potentially promising because they combine the production of animal protein and forest products in the same area, providing adequate thermal conditions for animals. This work aimed to quantify microclimatic changes in a silvopastoral system in northwestern Paraná state, Brazil. The study was conducted in the municipality of Tapejara (23 ° 41 'S, 52 ° 53' O and altitude of 445 m), from December 2016 to April 2019. During this period, global solar radiation, precipitation, air temperature and wind velocity were continuously measured at four positions of the silvopastoral system (below the canopy and center of the tree line) at two tree line distances (20 and 30 m), and at a full sunny pasture in an adjacent area. The results indicated a reduction of up to 32.9% for precipitation ($P > 40$ mm), 1.01 °C for average air temperature (hot days), 1.18 °C for maximum temperature (hot days), 56% for average speed wind (autumn) and 56.5% for global solar radiation (winter). Among the values obtained at TAP1 and TAP4 weather stations (full sun and center between lines 30 m apart), there were no significant differences, indicating that from longer distances between tree lines the microclimate may undergo less change. It was concluded that the microclimatic conditions are changed with the implantation of the silvopastoral system in northwestern Paraná.

Keywords: sustainability; integrated systems; *Megathyrus maximus*; *Eucalyptus grandis*.

3.1 INTRODUÇÃO

A busca por sistemas de produção mais intensivos e sustentáveis é constante no setor pecuário. Dentre as alternativas está o sistema silvipastoril, que abrange a atividade pecuária conjuntamente à silvicultural (BERNARDINO; GARCIA, 2009). Sistemas complexos que envolvem a interação de culturas forrageiras, árvores e animais em microclimas distintos, tanto na dimensão espacial, quanto temporal (BALBINO *et al.*, 2011). Além de propiciar melhoria do conforto térmico e das condições físicas do solo e ampliação da fixação de carbono, com consequente adaptação aos efeitos do aquecimento global (OLIVEIRA *et al.*, 2015; PACIULLO *et al.*, 2011).

Estes têm como objetivo incrementar a produtividade, beneficiando-se da rapidez da produção de proteína animal pela pecuária, com as características favoráveis do mercado de produtos florestais (CASTRO SANTOS *et al.*, 2018).

A região noroeste do Paraná conta com 23% (2,14 milhões de cabeças) do rebanho bovino em uma área territorial de 13% (24,7 mil km²) do estado (IPARDES, 2020). Possui solos frágeis, arenosos, com baixa retenção hídrica que não correspondem às expectativas de produção esperada, principalmente se comparado ao restante do estado do Paraná (FIDALSKI *et al.*, 2013). Associado a estes fatores, é uma região que registra altas temperaturas do ar e valores de precipitação e evapotranspiração próximos (NITSCHKE *et al.*, 2019).

Em regiões quentes a adoção desse sistema mostra-se promissora pois podem amenizar os efeitos das altas temperaturas que os animais ruminantes estão expostos, pois fatores ambientais podem ocasionar estresse aos animais e perdas produtivas (VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2019). Alguns trabalhos apontam inclusive, que o clima é o principal fator que afeta a produção animal (SILVA *et al.*, 2007; LEME *et al.*, 2005).

As principais interações dos sistemas silvipastoris com o meio ambiente ocorrem entre os componentes do microclima, compostos pelos elementos meteorológicos (radiação solar, temperatura e umidade do ar e vento) e componentes do solo (fertilidade e umidade) (YOUNG, 1990). Interações estas comprovadas por Pezzopane *et al.* (2015), onde a ação combinada dos elementos meteorológicos promoveu mudanças térmicas e de umidade do ar em pastagens em sistema silvipastoril.

No entanto, as interações e condições ambientais ao nível microclimático dentro dos sistemas silvipastoris ainda devem ser melhor conhecidas, em função

da elevada variabilidade espaço-temporal. Desta forma será possível subsidiar e apoiar as estratégias de implantação e condução desses sistemas. Neste contexto, este trabalho objetivou quantificar as alterações microclimáticas em um sistema silvipastoril na região noroeste do estado do Paraná.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Local De Experimentação

O trabalho foi realizado na região noroeste do Paraná, município de Tapejara, latitude 23° 41' 33" S, longitude 52° 53' 27" O e altitude de 445 m, entre dezembro de 2016 e abril de 2019, perfazendo 29 meses. O clima da região é Cfa, segundo classificação climática de Köppen, descrito como subtropical úmido, onde as temperaturas médias do ar no mês mais frio ocorrem entre 0 °C e 18 °C e, no mês mais quente de 22 °C ou superior (NITSCHE *et al.*, 2019).

O estudo foi conduzido em uma área de 13 ha de sistema silvipastoril em uma propriedade particular que possuía área total de aproximadamente 36 ha, cujo solo foi classificado como Argissolo (FIDALSKI *et al.*, 2010).

A espécie florestal utilizada foi o *Eucalyptus grandis*, cultivado em filas simples no espaçamento de 1,5 m entre árvores. As árvores foram plantadas no ano de 2007 acompanhando os terraços, resultando em distâncias entre filas de 20 a 30 m e densidade arbórea de 333 a 222 árvores ha⁻¹, respectivamente. Atualmente as árvores estão com altura variando entre 21,1 a 22,6 m. A espécie forrageira presente na área era a *Megathyrsus maximus* (capim-mombaça), em sistema contínuo de pastejo com animais da raça pardo suíço com objetivo de produção leiteira.

3.2.2 Caracterização Microclimática

Para caracterizar o microclima do sistema silvipastoril e analisar o efeito da associação de árvores com a pastagem foram instaladas cinco estações meteorológicas automáticas ref. Comercial Campbell Scientific® (Figura 3.1). Uma delas (TAP1) foi alocada em pastagem exposta a pleno sol, caracterizando o sistema convencional de exploração pecuária em monocultivo. As outras quatro estações (TAP2, TAP3, TAP4 e TAP5) foram dispostas na pastagem sombreada, em 2 distanciamentos entre as linhas de árvores (20 e 30 m), e

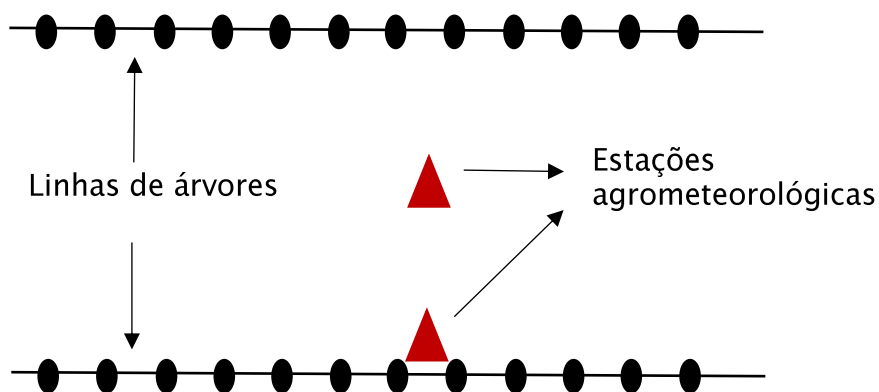
posicionadas abaixo da copa das árvores e no centro das entre linhas (Figuras 3.2).

Figura 3.1. Posicionamento das estações meteorológicas no experimento em sistema silvipastoril, Tapejara – PR, Brasil.



Fonte: Google Earth – adaptado pelo autor.

Figura 3.2. Esquema de alocação das estações meteorológicas entre as linhas de árvores nas áreas de pastagens sombreadas.



As estações TAP2 e TAP3 foram posicionadas em secção transversal às linhas de árvores cuja distância era de 20 m, enquanto as estações TAP4 e TAP5 a distância entre as linhas era de 30 m.

Em cada uma das estações meteorológicas, foram coletados, entre os meses de dezembro de 2016 a abril de 2019, dados dos principais elementos

meteorológicos: radiação solar global, temperatura do ar (média, mínima e máxima), precipitação pluvial e velocidade do vento. Estes foram coletados a cada 10 segundos, armazenados em datalogger, arquivados a cada 15 minutos, e transmitidos por sinal GPRS a cada 1 hora, ou seja, foram gerados 4 arquivos a cada hora e 96 arquivos por dia. Na Tabela 3.1 são apresentados os sensores utilizados (modelo/fabricante) nas estações meteorológicas para cada elemento medido e sua altura em relação ao solo.

Tabela 3.1. Elementos meteorológicos, sensores utilizados (modelo/fabricante) e sua posição em relação ao solo.

Elemento Meteorológico	Sensor	Altura do solo
Temperatura e Umidade relativa do ar	CS215 (Campbell Scientific)	2 m
Radiação solar global	CMA11 (Kipp & Zonen)	2 m
Precipitação pluvial	TE525MM-L (Texas Electronics)	1,5 m
Velocidade do vento	03002-L (R. M. Young Wind)	2 m

3.2.3 Análise Estatística

Para as análises dos microclimas, os dados coletados nas estações meteorológicas foram filtrados em grupos e em escalas temporais diferenciadas. As repetições dos tratamentos foram as escalas temporais utilizadas. Segue abaixo descrição dos grupos e escala temporal para cada elemento meteorológico:

- Radiação solar global acumulada (RAD) e Velocidade média do vento (Vmed) – escala decendial e grupos trimestrais, denominados primavera, verão, outono e inverno. Sendo a primavera composta pelos meses setembro, outubro e novembro; verão os meses dezembro, janeiro e fevereiro; outono os meses março, abril e maio; e inverno os meses junho, julho e agosto.
- Precipitação pluvial acumulada (P) – escala decendial e dois grupos, chuvoso e seco. Chuvoso quando P maior que 40 mm, e seco quando P menor que 40 mm.
- Temperatura média (Tmed) e temperatura máxima (Tmax) – escala diária e dois grupos, quente e ameno. Quente quando dias apresentavam Tmax maior que 33 °C em meses que atingiam altas temperaturas, e ameno quando Tmax

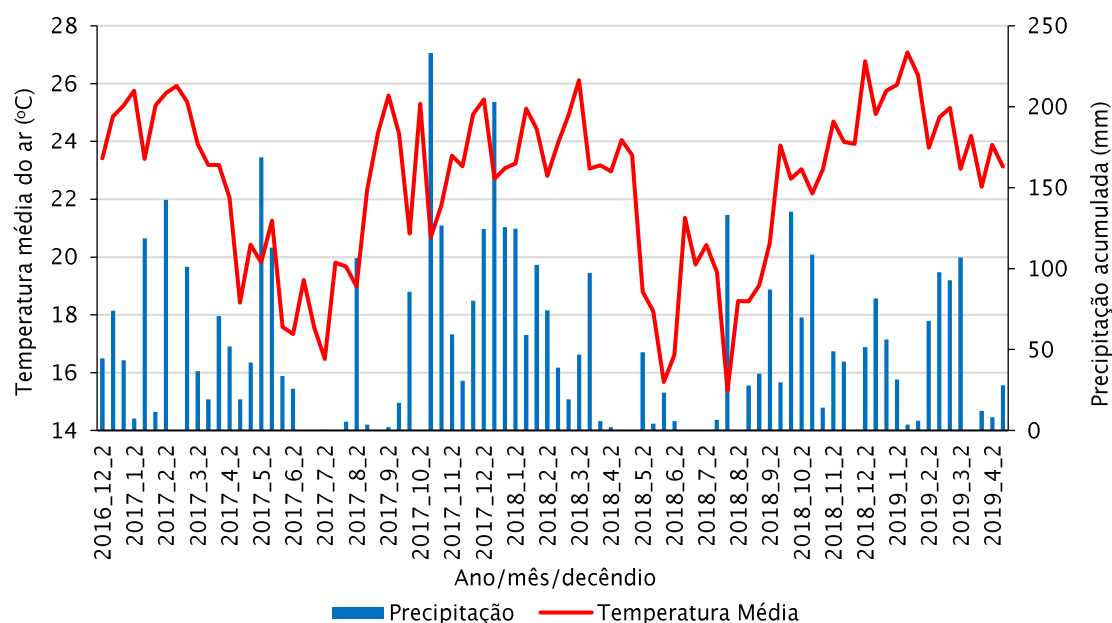
maior que 29 °C e menor que 33 °C ($29\text{ °C} \geq T_{\text{max}} < 33\text{ °C}$) em meses com temperaturas amenas.

Após a aplicação dos filtros e separação dos grupos de análise, os resultados foram submetidos ao teste t a 5% de significância, com o auxílio do programa Statistica®.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de caracterizar as condições meteorológicas no decorrer do experimento, optou-se por mostrar os dados da estação meteorológica TAP1 que caracterizava a condição sem as árvores (Figura 3.3). A temperatura média do ar decendial oscilou entre 22 e 26 °C nos meses mais quentes (outubro a março) e, entre 16 e 23 °C nos meses mais frios (maio a julho). A precipitação acumulada decendial teve variabilidade maior, oscilando entre zero e 233 mm, sendo os períodos de outubro a março os mais chuvosos, com média de 69 mm e os menos chuvosos entre junho e agosto, com média de 20 mm.

Figura 3.3. Temperatura média do ar (°C) e precipitação acumulada (mm) na escala decendial para o período do experimento, Tapejara - PR, Brasil.



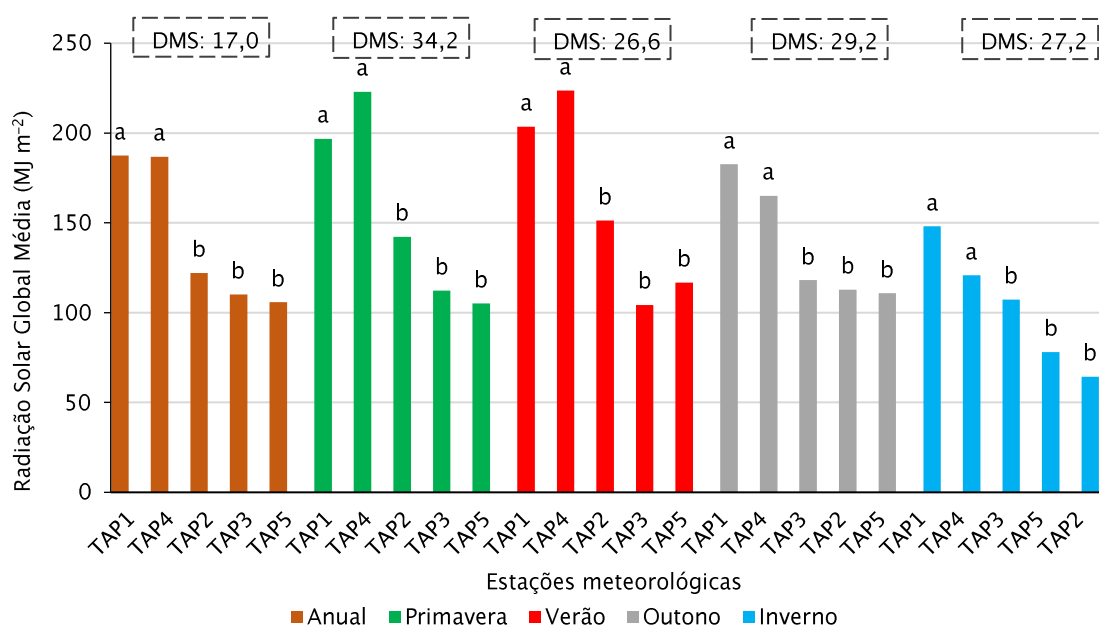
Os resultados experimentais da radiação solar global acumulada (RAD), na escala decendial, indicam que o sistema silvipastoril proporcionou reduções máximas de 43,5% (anual), 52,8% (primavera), 53,4% (verão), 39,3% (outono) e 56,5% (inverno) em relação aos dados da estação meteorológica TAP1 (Figura

3.4). Valores de RAD para as estações meteorológicas TAP1 e TAP4 não apresentaram diferenças significativas. Destaque-se que isto deve-se ao fato da estação meteorológica TAP4 ser o ponto central das entre linhas de árvores afastadas em 30 m, ou seja, o ponto de maior similaridade ao pleno sol. Ou seja, a partir de 30 m as faixas centrais nos sistemas silvipastoris podem não ter a radiação solar global afetada pelo componente arbóreo.

Observa-se ainda que em algumas estações do ano, tais como primavera e verão, os valores absolutos de RAD são maiores em TAP4 que em TAP1, mostrando a similaridade entre os pontos amostrais.

Foram verificadas diferenças significativas entre as estações TAP4 e TAP5 (30 m entre linhas), e não entre TAP2 e TAP3 (20 m entre linhas), para todas as escalas temporais analisadas. Reforçando a hipótese de que a partir de 30 m entre linhas de árvores as faixas centrais não apresentam redução da radiação.

Figura 3.4. Radiação solar global acumulada média, em MJ m⁻², anual e estações do ano, na escala decencial, entre as estações meteorológicas, Tapejara - PR, Brasil.



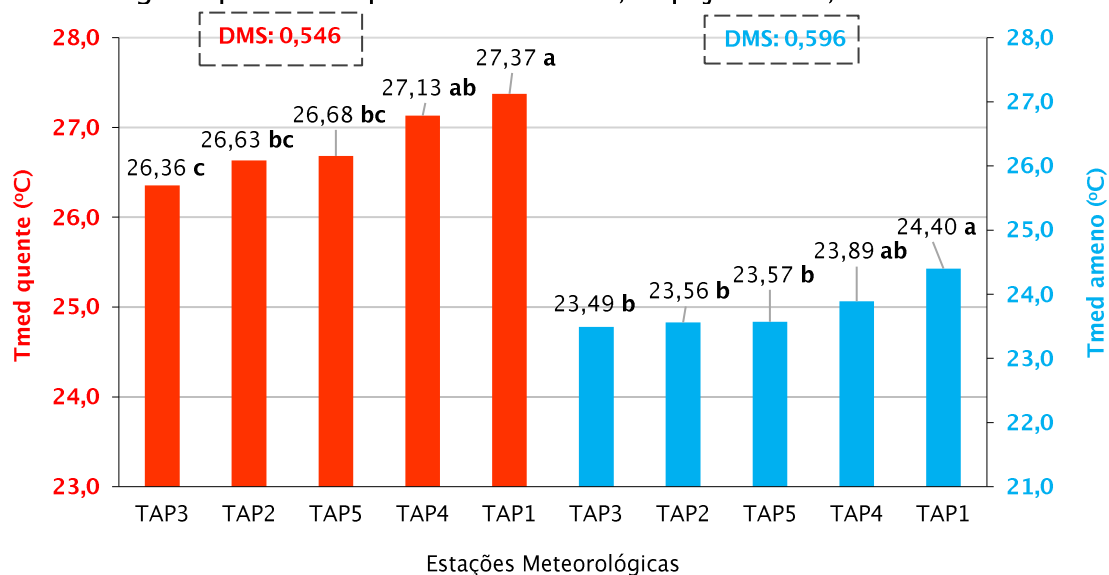
*Colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância para cada época do ano. DMS = Diferença Mínima Significativa.

Os resultados corroboram com os obtidos em sistema silvipastoril no interior de São Paulo, onde o padrão de incidência de radiação fotossinteticamente ativa na pastagem foi alterado, com redução de até 40% da incidência no ponto mais próximo das árvores e de 8% no centro das entre linhas

de árvores (PEZZOPANE *et al.*, 2015), redução tolerável para as espécies forrageiras (PACIULLO *et al.* 2008; 2011). A radiação solar interceptada pelas copas das árvores em sistemas silvipastoris tem impacto significativo na produção de forragem (SILVA-PANDO *et al.*, 2002).

A modelagem pode ser uma ferramenta na busca de respostas mais rápidas para avaliação dos sistemas integrados. No entanto, avaliando o modelo CROPGRO-Foreennial Forage em sistemas silvipastoris, Bosi *et al.* (2020) verificaram que o crescimento da pastagem foi bem simulado quando a competição por radiação solar foi o principal fator determinante. Mas o modelo não representou corretamente o crescimento da pastagem quando o déficit hídrico assumiu maior importância.

Figura 3.5. Temperatura média do ar (Tmed), em °C, nas estações meteorológicas para dias quentes e amenos, Tapejara - PR, Brasil.



*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância. DMS = Diferença Mínima Significativa.

Nas análises dos resultados da temperatura média do ar (Tmed) verificou-se que, tanto para o agrupamento dias quentes, quanto amenos, as temperaturas registradas nas estações meteorológicas localizadas no sistema silvipastoril foram significativamente menores em relação à localizada a pleno sol (TAP1), à exceção da estação TAP4 (Figura 3.5). Tais resultados são coerentes com a redução da radiação solar global pelas árvores de eucalipto.

Observa-se ainda que as reduções máximas registradas para a temperatura média do ar ocorreram entre as estações meteorológicas TAP1

(pleno sol) e TAP3, estação abaixo da copa das árvores no espaçamento mais estreito entre linhas (20 m). Redução de 1,01 °C e 0,91 °C para o agrupamento quente e ameno, respectivamente. Resultados semelhantes na redução na temperatura do ar foram obtidos por VIEIRA JUNIOR *et al.* (2019) em sistema silvipastoril com o sombreamento de *Eucalyptus grandis* na região norte do Paraná, entre 0,4 e 1,6 °C.

Estes resultados se contrapõem aos obtidos por Baliscai *et al.* (2013) em estudos na região noroeste do Paraná. Os autores não obtiveram diferenças na temperatura e umidade relativa do ar, quando comparando coletas em área a pleno sol e em sistema silvipastoril com eucalipto. Barbosa *et al.* (2004) explicaram que o uso da sombra altera o balanço de radiação dos animais em sistemas integrados, mas não afeta a temperatura e a umidade do ar.

No entanto, independente das alterações na temperatura do ar, o principal objetivo da sombra é proteger os animais da radiação solar direta (NOBREGA *et al.*, 2011), fornecendo a eles maior conforto térmico. Segundo Mavi e Tupper (2004), a energia da radiação solar atinge a superfície terrestre, que aquece e transfere para a atmosfera na forma de calor essa energia acumulada, aumentando a temperatura do ar.

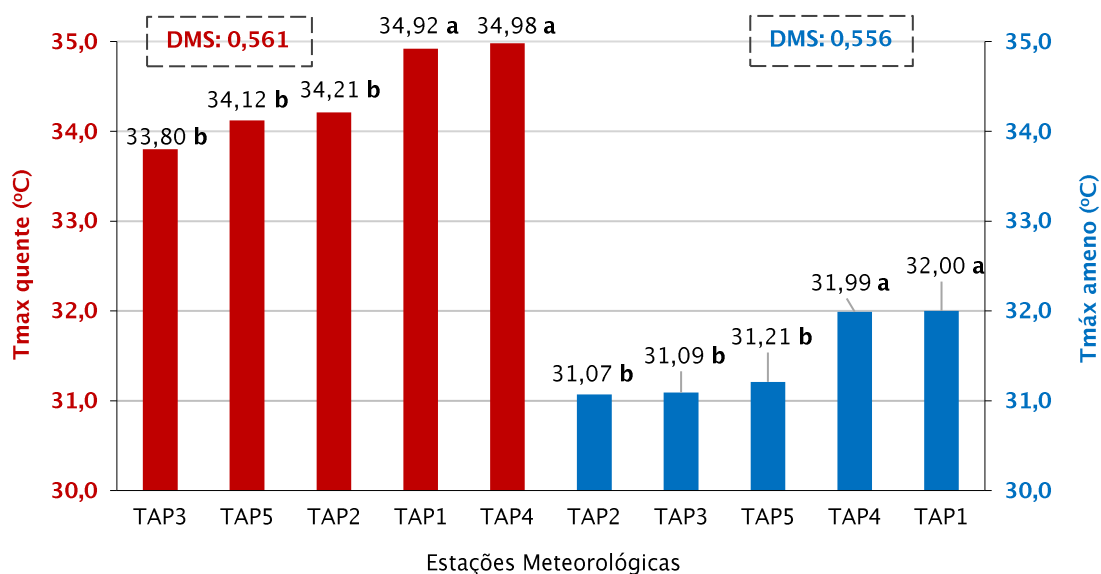
Diferentemente da radiação solar global, observa-se que não houve diferença significativa entre a Tmed nas estações meteorológicas localizadas abaixo das copas das árvores e no centro das entre linhas para ambos os espaçamentos entre linhas, TAP2xTAP3 e TAP4xTAP5, tanto para o grupo quente quanto ameno. Estes resultados indicam que os espaçamentos de 20 e 30 m entre linhas de árvores não foi suficiente para alterar a Tmed nas faixas centrais das entre linhas, possivelmente pelos efeitos causados pela projeção de sombra nos primeiros e últimos horários do dia.

Quando são analisadas as diferenças registradas para as médias da temperatura máxima do ar (Tmax) para os grupos quente e ameno, os valores encontrados nas estações meteorológicas TAP1 e TAP4 não foram significativamente diferentes. Observa-se que as reduções máximas foram de 1,18 °C e 0,93 °C para os agrupamentos quente e ameno, respectivamente (Figura 3.6).

Em similaridade aos resultados obtidos para a radiação solar global verifica-se que apareceram diferenças significativas entre os valores encontrados nas estações meteorológicas TAP4 e TAP5, e não entre TAP2 e TAP3, espaçamento entre linhas de 30 m e 20 m, respectivamente. Resultados

esperados em função da relação entre temperatura do ar e radiação solar. Nos primeiros horários da tarde, sem a projeção de sombra das árvores, normalmente a incidência de radiação solar atinge seu máximo, conseqüentemente são registrados os valores máximos de temperatura do ar.

Figura 3.6. Médias da temperatura máxima do ar (Tmax), em °C, nas estações meteorológicas para dias quentes e amenos, Tapejara – PR, Brasil.



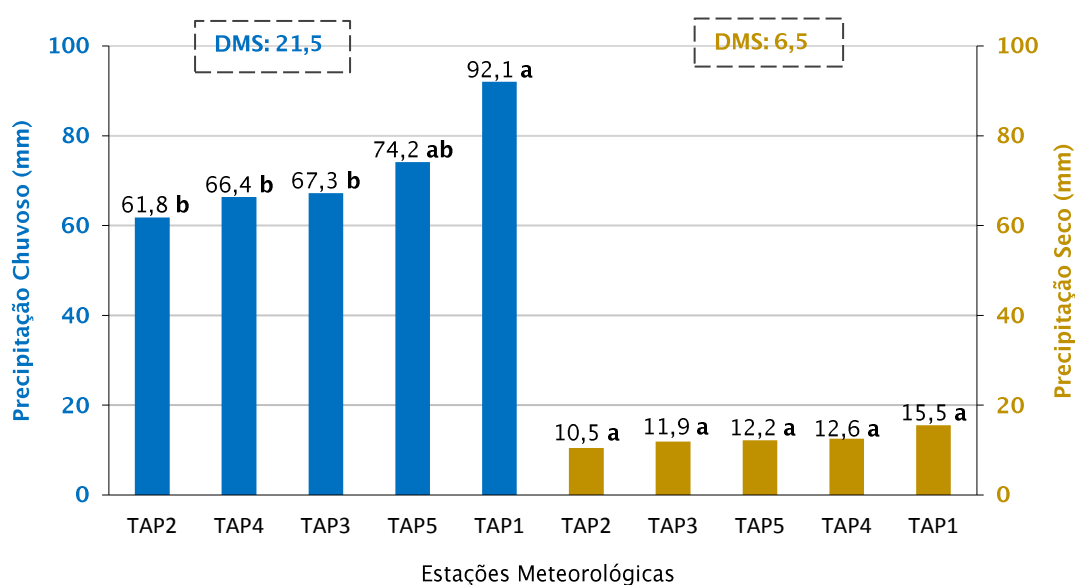
*Colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância. DMS = Diferença Mínima Significativa.

Os resultados experimentais da precipitação indicaram que há diferenças significativas apenas quando ocorreram precipitações decendiais superiores a 40 mm ($P > 40$ mm), agrupamento chuvoso (Figura 3.7), com redução máxima de 32,9%. Para o agrupamento seco os resultados não evidenciaram diferenças significativas entre as estações meteorológicas. Ou seja, houve interferências do componente arbóreo na interceptação da precipitação apenas em precipitações mais intensas, neste caso, acima de 40 mm por decêndio, indicando que para menores precipitação decendiais o componente arbóreo não intercepta quantidades significativas.

Para o grupo chuvoso, houve diferença significativa entre os valores obtidos na estação meteorológica TAP1 (pleno sol) e todas as demais, à exceção dos registrados em TAP5 (17,9 mm ou 19,4%). Observa-se ainda que não houve diferença significativa para a precipitação decendial entre as estações meteorológicas localizadas abaixo das copas e no centro das entre linhas das

árvores, TAP2xTAP3 e TAP4xTAP5, respectivamente, ou seja, para as condições estudadas, o espaçamento entre linhas de árvores não interferiu na interceptação da precipitação. A menor disponibilidade de água nos sistemas arborizados pode advir também da perda por gotas de chuva interceptadas pelas copas das árvores, que escorrem pelos troncos e galhos ou são evaporadas e resultam em perdas significativas de água (GYENGE *et al.*, 2002; DOUGLAS *et al.*, 2006).

Figura 3.7. Precipitação pluvial acumulada (P), em mm, na escala decenal entre as estações meteorológicas para grupo chuvoso ($P \geq 40$ mm) e seco ($P < 40$ mm), Tapejara – PR, Brasil.



*Colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância. DMS = Diferença Mínima Significativa.

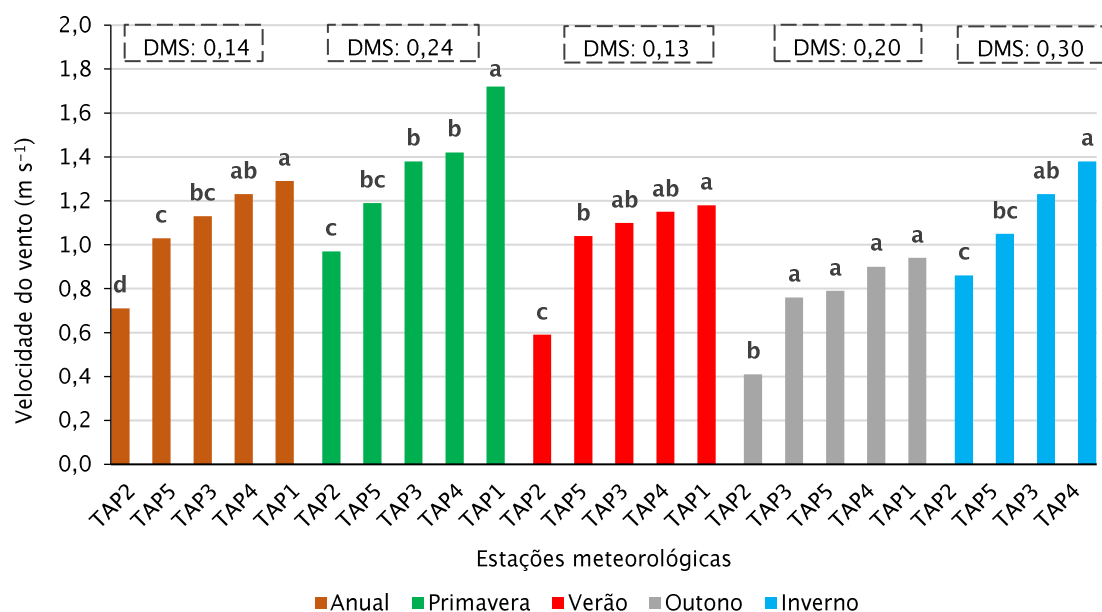
Estudos comparando a precipitação efetiva em sistemas florestais em relação à precipitação sem interceptação (TONELLO *et al.*, 2014) em *Eucalyptus cloeziana*, *Pinus caribea* var. *hondurensis* e Floresta Estacional Semidecidual, mostraram interceptação de 13,8, 15,0 e 22,8%, respectivamente, mostrando similaridade com os obtidos por este trabalho. Na mesma linha, a interceptação estimada foi de 14,5% da precipitação em floresta de eucalipto na região sul do Brasil (SARI *et al.*, 2016).

Resultados para a velocidade média do vento (V_{med}) nas escalas temporais anual e estações do ano são apresentados na Figura 3.8. Observa-se que durante a primavera a V_{med} é maior em relação às outras estações do ano,

seguido pelo inverno, verão e outono, resultados coerentes com Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (BRASIL, 2001).

O sistema silvipastoril estudado proporcionou reduções máximas de Vmed de 45; 43,6; 50; 56 e 37,7% para escalas anual, primavera, verão, outono e inverno, respectivamente.

Figura 3.8. Velocidade média do vento (Vmed), em $m s^{-1}$, anual e nas estações do ano, entre as estações meteorológicas, Tapejara - PR, Brasil.



*Colunas seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância. DMS = Diferença Mínima Significativa.

Verifica-se ainda que, quando a análise dos dados é realizada entre as estações meteorológicas houve diferença significativa para Vmed entre TAP1 e TAP4 apenas na primavera, entre TAP4 e TAP5 na escala anual e inverno e, como destaque negativo, a estação TAP2, com valores significativos inferiores em todos os casos. Supõe-se que este fato possa estar relacionado a um desgaste prematuro do rolamento do sensor que ocasionou algum travamento ou maior atrito mecânico.

Esta variabilidade de resultados mostra que o componente arbóreo impactou na velocidade média do vento, tal qual obtiveram Soares *et al.* (2009). Estes autores encontraram valores inferiores de Vmed no centro das entre linhas afastadas em 15 m em sistema silvipastoril de 1,81 para 1,11 $m s^{-1}$, respectivamente, e concluíram que a presença de árvores causa a formação de

microclima com menor velocidade do vento. Resultados similares encontraram Pezzopane *et al.* (2015), verificando que as fileiras de árvores nativas reduziram a velocidade do vento em 47% em comparação ao sistema sem árvores.

Pode-se afirmar então, que a redução da incidência de ventos implica em alterações microclimáticas nos sistemas silvipastoris, alterando gradientes térmicos e promovendo melhor conforto animal (BALISCEI *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2010).

3.4 CONCLUSÕES

A implantação de linhas de eucalipto na pastagem com capim-mombaça reduziu a incidência de radiação solar global, diminuiu valores de temperatura do ar, interceptou a precipitação e diminuiu a velocidade do vento. Conclui-se que as condições microclimáticas foram alteradas no sistema silvipastoril na região noroeste do Paraná.

4 ARTIGO B – COMPETIÇÃO POR ÁGUA E LUZ SÃO FATORES LIMITANTES PARA PRODUÇÃO FORRAGEIRA EM SISTEMA SILVIPASTORIL NO NOROESTE DO PARANÁ, BRASIL

RESUMO

Entre os vários fatores que influenciam os sistemas agroflorestais a radiação solar interceptada pelas árvores e a competição pela água disponível no solo são os fatores mais relevantes para o desenvolvimento das forrageiras. A estimativa do real impacto causado por esses fatores é essencial para a correta implantação e sucesso do sistema. Desta forma, este trabalho teve como objetivo quantificar a redução de radiação fotossinteticamente ativa, da umidade do solo e o impacto causado na produção de matéria seca da forrageira, num sistema silvipastoril de eucalipto com capim-mombaça na região noroeste do estado do Paraná. O estudo foi realizado em um sistema silvipastoril em Tapejara – PR (23° 41' S, 52° 53' O, 445 m), durante o período de junho de 2017 a março de 2019. Neste período foram medidas a radiação fotossinteticamente ativa (RFA), a umidade do solo e a produção de matéria seca (MS) da forrageira em quatro pontos amostrais do sistema silvipastoril (abaixo das copas e centro das entre linhas de árvores) em duas distâncias de entre linhas de árvores (20 e 30 m), e em um ponto de pastagem a pleno sol em área adjacente. Os resultados indicaram que as copas das árvores interceptam com mais intensidade a RFA à medida que o espaçamento entre linhas de árvores diminui, sendo valores médios de 51% e 39% para espaçamento de 20 e 30 m, respectivamente. A umidade do solo registrou valores inferiores em comparação ao ponto a pleno sol (TAP1) nas camadas de solo 0-0,8; 0-0,4 e 0,5-0,8 m de profundidade. A exceção foi o ponto TAP4 nas profundidades 0-0,8 e 0,5-0,8 m, e em ambas as distâncias entre linhas (20 e 30 m), onde a umidade do solo foi maior na faixa central. A produção média de MS da forrageira foi significativamente menor em todos os pontos amostrais com redução de 41 a até 69,2%. Conclui-se que o sombreamento causado pelas árvores e a competição por água reduz a produção forrageira em um sistema silvipastoril na região noroeste do estado do Paraná, sendo estes fatores limitantes, mas não impeditivos, para a condução do sistema.

Palavras-chave: sistemas integrados; produção forrageira; radiação fotossinteticamente ativa; umidade do solo.

ABSTRACT

Among the various factors that influence agroforestry systems, solar radiation intercepted by trees and competition for available water in the soil are the most relevant factors for forage development. Estimating the actual impact caused by these factors is essential for the correct deployment and success of the system. Thus, this work aimed to quantify the reduction of photosynthetically active radiation and soil moisture, as well as to estimate the impact on forage production in a silvopastoral system in the northwestern Paraná state, Brazil. The study was conducted in the municipality of Tapejara (23 ° 41 'S, 52 ° 53' O, 445 m), from June 2017 to March 2019. During this period, photosynthetically active radiation (RFA), soil moisture and dry matter production (DM) were measured at four sampling points of the silvopastoral system (below the crowns and center of the inter-tree lines) at two inter-line distances of trees (20 and 30 m), and in a grazing spot in full sun in adjacent area. The results indicated that the treetops more strongly intercept the RFA as the tree line spacing decreases, with mean values of 51% and 39% for spacing of 20 and 30 m, respectively. Soil moisture recorded lower values compared to full sun point (TAP1) in soil layers 0–0.8, 0–0.4 and 0.5–0.8 m deep. The exception was the TAP4 point at depths 0–0.8 and 0.5–0.8 m, and at both line distances (20 and 30 m), where soil moisture was higher in the central range. The average DM production was significantly lower in all sample points with reduction from 41 to 69.2%. It can be concluded that shading caused by trees and competition for water reduces forage production in a silvopastoral system in northwestern Paraná State. These factors are limiting, but not impeding, for the conduction of the system.

Keywords: integrated systems; fodder production; photosynthetically active radiation; soil moisture.

4.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas silvipastoris são uma modalidade de exploração agropecuária onde animais, plantas forrageiras e árvores dividem a mesma área ao mesmo tempo (BALBINO *et al.*, 2011). Há a necessidade de buscar o equilíbrio entre os seus componentes e suas interações (BOSI *et al.*, 2014) pois a complexidade é maior em relação aos sistemas convencionais (FEY *et al.*, 2015).

Entre os vários fatores que influenciam os sistemas agroflorestais, a radiação solar interceptada pelas árvores e o espaçamento entre elas estão entre os principais (VARELLA *et al.*, 2008; RADOMSKI; RIBASKI, 2009). A redução da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é uma característica dos sistemas integrados e é determinada pela densidade arbórea. Este fator limita o crescimento forrageiro (DEVKOTA *et al.*, 2009), além da temperatura do ar e a disponibilidade hídrica no solo (PACIULLO *et al.*, 2008).

A escolha adequada das espécies forrageiras baseia-se na capacidade destas em crescer em diferentes condições de oferta de radiação e água (FEY *et al.*, 2015). Algumas destas espécies podem se adaptar morfológicamente ao sistema, reduzindo a espessura do limbo foliar e aumentando a densidade das clorofilas, a fim de potencializar a eficiência da captação luminosa (BENAVIDES *et al.*, 2009).

No entanto, não se trata apenas de escolher as espécies mais tolerantes ao sombreamento; a forragem também precisa ser produtiva, a fim de atender às demandas dos animais (SOARES *et al.*, 2009). A competição por água entre as espécies arbóreas e forrageiras pode limitar o sistema silvipastoril, especialmente na produção forrageira (LUCAS *et al.*, 2015).

A pecuária é uma das principais atividades econômicas da região noroeste do estado do Paraná, com rebanho de 2,14 milhões de cabeças em uma área territorial de 24,7 mil km² (IPARDES, 2020). No entanto, possui solos frágeis, com baixa retenção hídrica (FIDALSKI *et al.*, 2013), altas temperaturas do ar e valores de precipitação e evapotranspiração próximos (NITSCHKE *et al.*, 2019).

Desta forma, conhecer os impactos causados pelos componentes no sistema silvipastoril, possibilita o correto dimensionamento das distâncias adequadas entre linhas de árvores e a escolha da espécie forrageira mais tolerante à menor oferta de radiação solar e à disponibilidade hídrica.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo quantificar a redução de radiação fotossinteticamente ativa, da umidade do solo e o impacto causado na

produção de matéria seca da forrageira, num sistema silvipastoril de eucalipto com capim-mombaça na região noroeste do estado do Paraná.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Local De Experimentação

O trabalho foi realizado na região noroeste do Paraná, município de Tapejara, latitude 23° 41' 33" S, longitude 52° 53' 27" O e altitude de 445 m, entre os meses de janeiro de 2017 e abril de 2019. O clima da região é Cfa, segundo classificação climática de Köppen, descrito como subtropical úmido, com temperaturas médias do ar no mês mais frio entre 0 °C e 18 °C e, mês mais quente de 22 °C ou superior (NITSCHKE *et al.*, 2019).

O estudo foi conduzido em uma área de 13 ha de sistema silvipastoril em uma propriedade particular que possuía área total de aproximadamente 36 ha.

A espécie florestal utilizada foi o *Eucalyptus grandis*, cultivado em filas simples no espaçamento de 1,5 m entre árvores. As árvores foram plantadas no ano de 2007 acompanhando os terraços, resultando em distâncias entre filas de 20 a 30 m e densidade arbórea de 333 a 222 árvores ha⁻¹, respectivamente. Atualmente as árvores estão com altura variando entre 21,1 a 22,6 m. A espécie forrageira presente na área era a *Megathyrsus maximus* (capim-mombaça), em sistema contínuo de pastejo com animais da raça pardo suíço com objetivo de produção leiteira.

O solo foi classificado como Argissolo (FIDALSKI *et al.*, 2010) e tem as características texturais e químicas apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2. As análises foram realizadas no Laboratório de Solos do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), segundo metodologia proposta por Pavan *et al.* (1992).

Tabela 4.1. Análise textural do solo da área experimental, em diferentes camadas, em g kg⁻¹.

Camadas (m)	Argila	Silte	Areia
	g kg ⁻¹		
0,0 – 0,1	4,3	1,3	94,4
0,1 – 0,2	4,3	1,3	94,4
0,2 – 0,3	4,3	1,3	94,4
0,3 – 0,4	4,0	1,4	94,6
0,4 – 0,5	4,9	1,1	94,0

Tabela 4.2. Análise química do solo da área experimental, nas camadas 0,0–0,1 (1), 0,1–0,2 (2), 0,2–0,3 (3), 0,3–0,4 (4) e 0,4–0,5 m (5).

Prof.	P	pH	Al ³⁺	H ⁺ Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC	V	m
	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³ de solo							%	
1	2,5	4,86	0,03	2,95	1,24	0,34	0,13	1,71	4,65	36,67	1,85
2	2,3	4,84	0,04	2,91	1,24	0,30	0,11	1,65	4,56	35,56	2,89
3	1,5	4,83	0,05	2,73	1,18	0,25	0,09	1,52	4,25	35,58	3,05
4	1,2	4,94	0,03	2,62	1,04	0,20	0,08	1,32	3,95	33,53	2,52
5	1,4	4,93	0,03	2,52	1,07	0,21	0,08	1,36	3,87	34,98	2,28

Observações: SB = Soma de bases; CTC = Capacidade de trocas de cátions; V = Saturação por bases; m = Saturação por Alumínio; P e K por Mehlich I; Ca, Mg e Al por KCl M; pH por CaCl₂ 0,01 M

4.2.2 Experimentação

Para a análise dos efeitos da associação de árvores com a pastagem foram determinados cinco pontos amostrais (Figura 4.1), sendo um em pastagem exposta a pleno sol (TAP1), e outros quatro dispostos em pastagem sombreada, em dois distanciamentos entre as linhas de árvores (20 e 30 m), posicionados no centro das entre linhas (TAP2 e TAP4) e abaixo da copa das árvores (TAP3 e TAP5). Para a obtenção das diferenças entre os pontos amostrais foi utilizado o teste t a 5% de significância para todas as variáveis analisadas, por meio do software Statística®.

4.2.3 Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA)

Para a obtenção da RFA nos cinco pontos amostrais foi utilizado equipamento portátil, denominado ceptômetro, marca Apogee®, modelo MQ-301. Este é constituído de uma barra horizontal de 0,80 m com dez sensores equidistantes em linha, fornecendo o valor médio instantâneo no momento da medição.

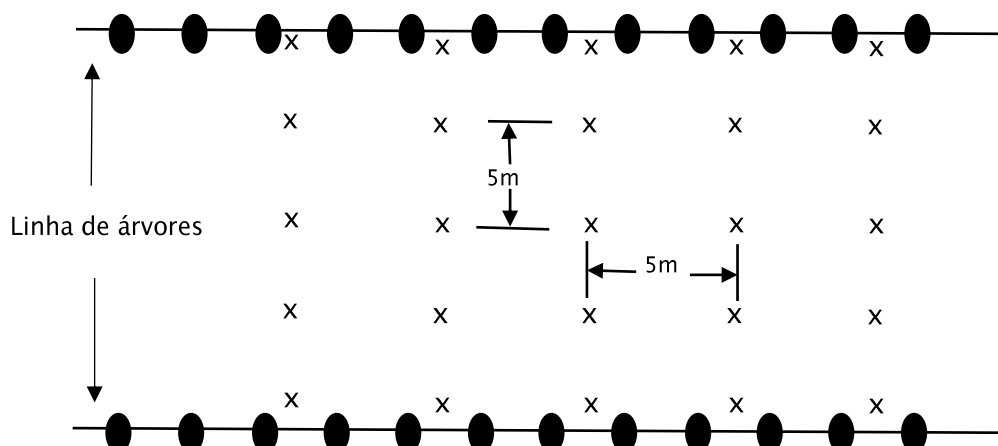
Realizou-se campanhas de medições ao longo do experimento, em dias sem nenhuma nebulosidade do nascer ao pôr do sol. A altura de coleta foi de aproximadamente 1 m acima do solo. As medições foram realizadas de hora em hora, em coletas obedecendo uma malha de 5 x 5 m entre as linhas das árvores (Figura 4.2), nas datas 21/06/2017, 22/09/2017, 25/04/2018 e 20/11/2018.

Figura 4.1. Posicionamento dos pontos amostrais no experimento em sistema silvipastoril, Tapejara - PR, Brasil.



Fonte: Google Earth - adaptado pelo autor.

Figura 4.2. Esquema representativo da malha de pontos de coleta da radiação fotossinteticamente ativa (RFA).



4.2.4 Umidade do Solo

Para a determinação e quantificação da umidade do solo no sistema silvipastoril, foram inseridos no solo, nos cinco pontos amostrais (TAP1, TAP2, TAP3, TAP4 E TAP5) (Figura 4.1), tubos de acesso para sonda portátil medidora de umidade do solo, modelo DIVINER 2000®. Para a garantia da confiabilidade dos dados coletados, a sonda foi calibrada em laboratório com o solo do local do experimento anteriormente às coletas de campo, obedecendo a equação:

$$US = -0,000010849 \times RC + 1,756236476 \quad (R^2 = 0,996339859)$$

Em que,

US = umidade do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

RC = contagem bruta de pulsos (raw count)

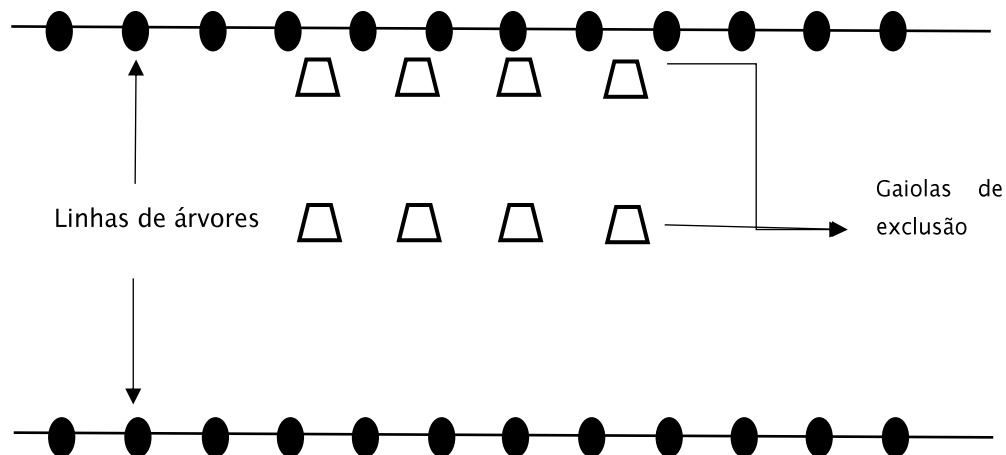
Foram realizadas medidas pontuais e aleatórias ao longo do tempo a fim de obter o maior número de repetições, ocorridas em 23/01/18, 08/03/18, 25/04/18, 11/06/18, 17/09/18, 04/10/18, 20/11/18, 10/01/19, 07/03/19, totalizando 9 datas. Em cada coleta, foram medidos os valores de umidade do solo nas camadas de 0,0–0,80 de profundidade com intervalos de 0,10 m entre camadas.

4.2.5 Estimativa Da Produção Forrageira

As amostras para a quantificação da produção forrageira foram obtidas com o auxílio de gaiolas de exclusão de 1,0 x 1,0 x 1,0 m, que foram alocadas paralelamente aos pontos amostrais, com quatro repetições (Figura 4.3).

Na área das gaiolas de exclusão foram aplicados, imediatamente após o corte da pastagem, 100 kg de N ha⁻¹ divididos em quatro doses, ao longo dos meses de setembro de 2018 a março de 2019.

Figura 4.3. Esquema de alocação das gaiolas de exclusão entre as linhas e abaixo das copas das árvores nas áreas de pastagens sombreadas.

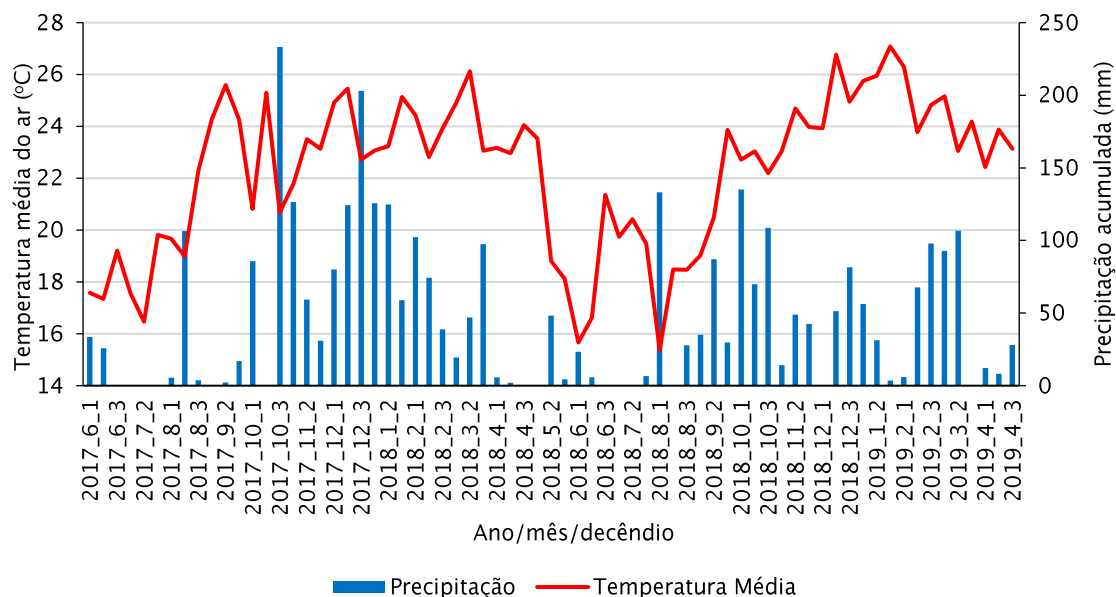


Foram coletadas a biomassa verde ao longo do ano de 2018/2019, em intervalos de tempo variados em função do crescimento desigual da forrageira, a saber: 08/03/18, 05/07/18, 17/09/18, 19/11/18, 10/01/19, 7/03/19 e 29/04/19, totalizando 7 cortes. Após o corte as amostras foram levadas à estufa a 65 °C por 24 h ou até atingir massa constante, e medidas a massa seca (MS) com balança de precisão.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

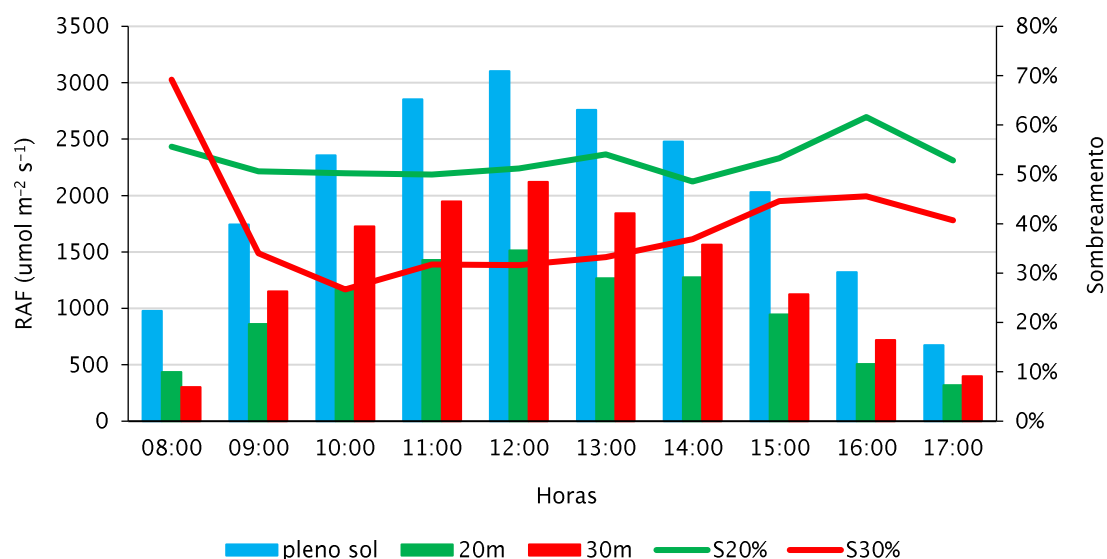
Com o intuito de caracterizar as condições meteorológicas no decorrer do experimento, optou-se por apresentar os dados da estação meteorológica TAP1 que representava a condição sem as árvores (Figura 4.4). A temperatura média do ar decendial oscilou entre 22 e 26 °C nos meses mais quentes (outubro a março) e, entre 16 e 23 °C nos meses mais frios (maio a julho). A precipitação acumulada decendial teve variabilidade maior, oscilando entre zero e 233 mm, sendo que os períodos de outubro a março foram os mais chuvosos, com média de 69 mm e os menos chuvosos entre junho e agosto, com média de 20 mm.

Figura 4.4. Temperatura média do ar, em °C, e precipitação acumulada, em mm, na escala decendial, para o período do experimento, Tapejara - PR, Brasil.



Os resultados da RFA na escala horária (Figura 4.5) mostraram que as copas das árvores no sistema silvipastoril interceptaram com mais intensidade essa radiação à medida que o espaçamento entre linhas de árvores diminuiu, sendo a redução média de 51 e 39% para espaçamento de 20 e 30 m, respectivamente. Também foi perceptível que a redução percentual da RFA em relação ao pleno sol, ou sombreamento, para o espaçamento 20 m (S20%) foi praticamente constante ao longo do dia, com pequeno aumento a partir das 16 h. Enquanto que para o espaçamento 30 m, a redução percentual (S30%) foi mais elevada nas primeiras horas do dia, estabilizando a partir das 9 h e tornando a aumentar após às 15 h. Este fato ocorreu, provavelmente, devido a pequena diferença na direção das linhas de árvores entre os dois tratamentos.

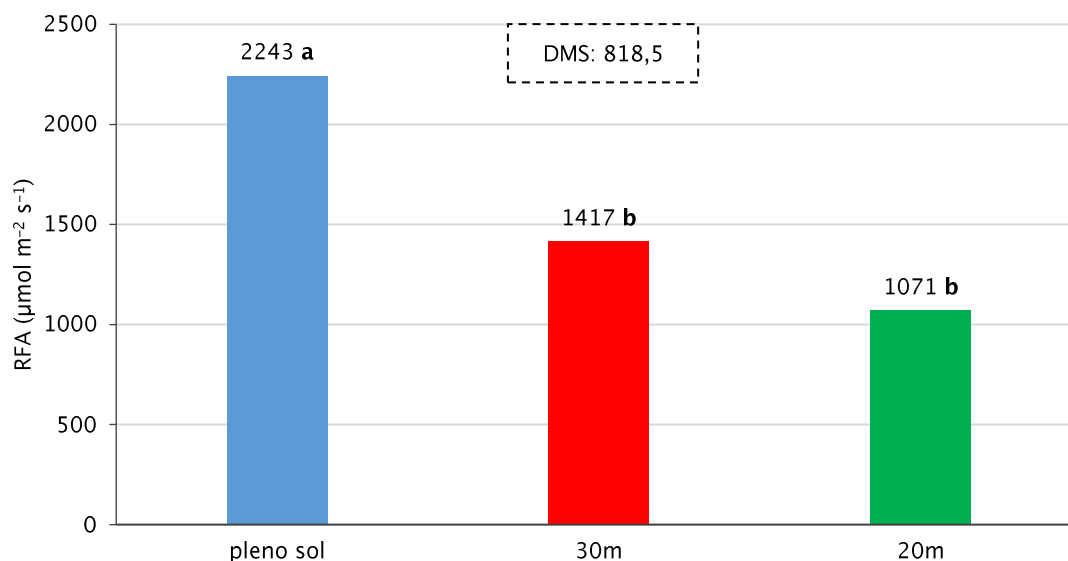
Figura 4.5. Média horária da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, e sombreamento, em %, para os tratamentos pleno sol, distâncias entre linhas de árvores de 20 m e 30 m, das 8 às 17 horas, para as quatro datas de coletas, entre junho de 2017 e novembro de 2018, Tapejara – PR, Brasil.



Quando a análise foi realizada com a RFA em escala diária, observa-se que as árvores reduziram significativamente a radiação tanto para o espaçamento de 20 m quanto para o de 30 m, sendo a redução média de 52,3 e 36,8%, respectivamente (Figura 4.6).

A Diferença Mínima Significativa (DMS) entre os tratamentos foi de 818,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valor próximo da diferença obtida entre o pleno sol e o tratamento de 30 m (826 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ou seja, espaçamentos superiores a 30 m entre linhas de árvores tendem a não reduzir a RFA sobre as pastagens. Estes resultados corroboram com Oliveira *et al.* (2007), que afirmaram que o espaçamento do componente arbóreo é um fator relevante para a produtividade da pastagem, uma vez que o arranjo espacial das árvores afeta diretamente o nível de sombra imposto pelo sistema. De forma generalista, a maioria dos estudos relatados em literatura revelou que um maior espaçamento entre linhas de árvores proporcionou maiores taxas de radiação solar e proporcionalmente, maiores rendimentos das forrageiras. A diminuição da produção forrageira está ligada à baixa quantidade e qualidade da radiação que atingiu o dossel das forragens (SOARES *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2011).

Figura 4.6. Média diária da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para os tratamentos pleno sol, distâncias entre linhas de árvores de 20 m e 30 m, das 8 às 17 horas, para as quatro datas de coletas, entre junho de 2017 e novembro de 2018, Tapejara – PR, Brasil



*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância.

Corroboram também com estes resultados o trabalho de Pezzopane *et al.* (2015), onde o sistema silvipastoril alterou o padrão de incidência da RFA com redução de até 40% da incidência no ponto mais próximo das árvores e de 8% no centro das entre linhas de árvores, quando o espaçamento entre as linhas foi de 17 m.

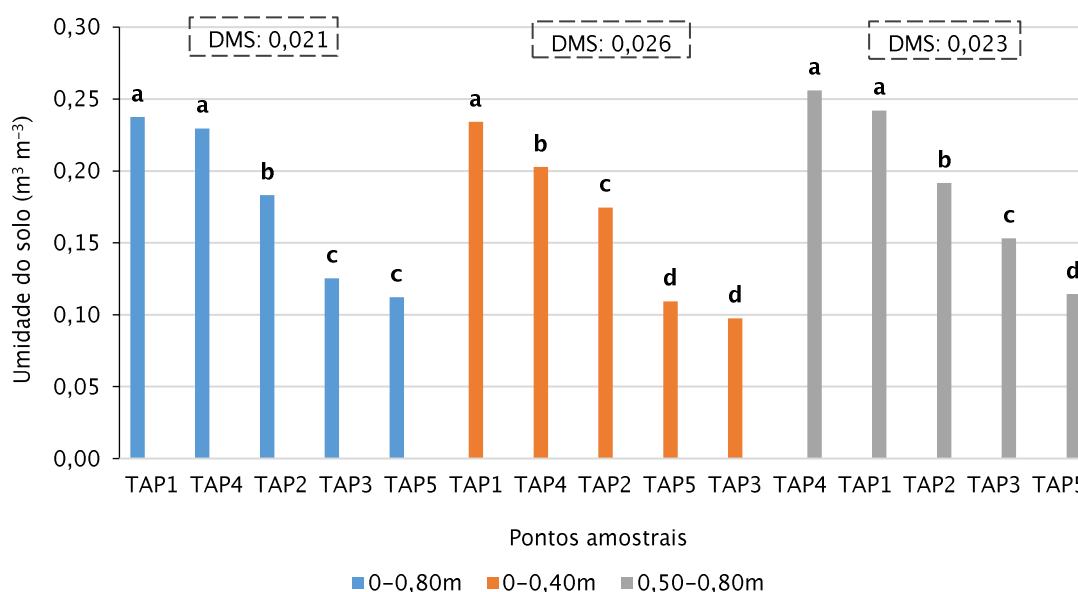
Da mesma forma, em estudos do impacto da luminosidade sobre forrageiras perenes em sistema silvipastoril em Santa Catarina, com espaçamentos de 15x3 e 9x3 m, a redução da RFA foi de 67 e 83%, respectivamente (SOARES *et al.*, 2009). Avaliando a influência de diferentes arranjos espaciais de árvores em sistemas silvipastoris no estado de Minas Gerais, com amostragens no centro e lateral das entrelinhas, Rodrigues *et al.* (2014) constaram reduções de 39% da RFA.

Estas reduções têm significado importante, pois a radiação solar interceptada pelas copas das árvores em sistemas silvipastoris tem reduzido a produção de matéria seca das forragens (SILVIA PANDO *et al.*, 2002; SANTOS *et al.*, 2018), além de alterar o comportamento de ingestão dos animais em função da preferência dos mesmos em realizar atividades sob a sombra das árvores (VIEIRA JUNIOR *et al.*, 2019).

Com relação aos resultados obtidos de umidade do solo (Figura 4.7) percebeu-se que o sistema silvipastoril registrou valores inferiores em comparação ao ponto amostral a pleno sol (TAP1) nas camadas de 0–0,8; 0–0,4

e 0,5–0,8 m de profundidade. Sendo a exceção o ponto TAP4 nas camadas 0–0,8 e 0,5–0,8 m. Estes resultados demonstraram que o espaçamento acima de 30 m entre linhas de árvores pode propiciar menor impacto competitivo por água em comparação ao sistema totalmente exposto ao sol. Não obstante, comparando-se os pontos abaixo das copas e na faixa central das entre filas (TAP3xTAP2 e TAP4xTAP5), percebe-se que em ambas as distâncias entre linhas (20 e 30 m) a umidade do solo foi maior na faixa central, para todas as camadas de solo analisadas. Há maior remoção de umidade do solo nos pontos de amostragem próximos às fileiras de árvores sob o sistema silvipastoril, principalmente devido à exploração aprimorada das raízes das árvores em maiores profundidades (PEZZOPANE *et al.*, 2015).

Figura 4.7. Valores médios de umidade do solo, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, nas camadas de solo a 0–0,8, 0–0,4 e 0,5–0,8 m, para os pontos amostrais, Tapejara – PR, Brasil.



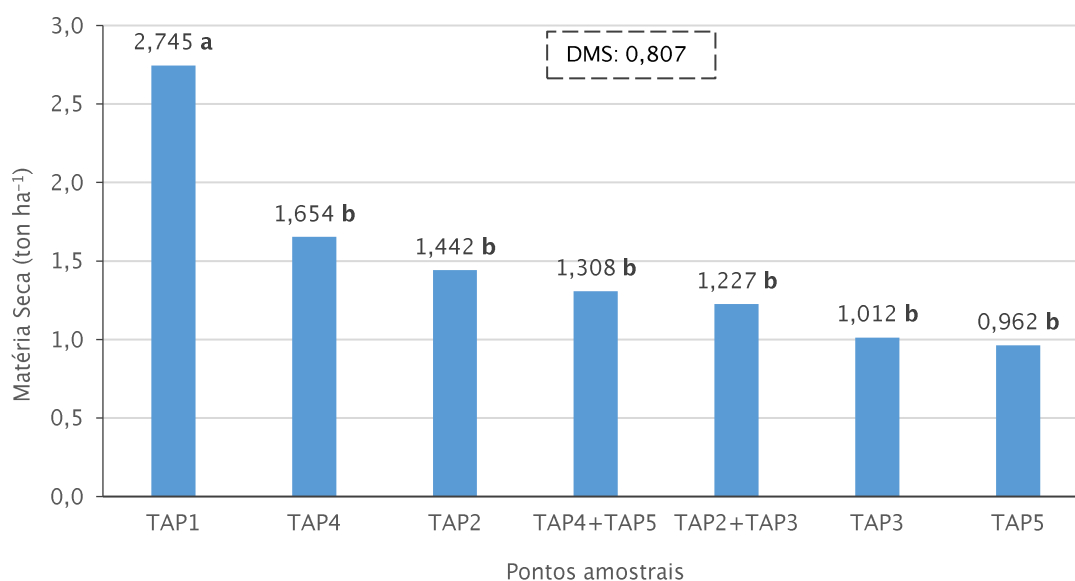
*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância.

Modelos matemáticos podem ampliar e agilizar o entendimento da dinâmica das interações forragem/árvores-água. No entanto, a modelagem aplicada à sistemas silvipastoris não representou corretamente o crescimento da pastagem quando o déficit hídrico foi preponderante sobre a radiação solar (BOSI *et al.*, 2020).

Analisando a produção média de MS após os sete cortes realizados ao longo do ano agrícola de 2018/2019, verificou-se que a produção forrageira foi

significativamente menor comparada com a obtida a pleno sol, em todos os pontos amostrais (Figura 4.8), sendo a redução de 41 a até 69,2% (Tabela 4.3). Portanto, as árvores introduzidas no sistema, diminuíram a RFA e a umidade do solo, impactando negativamente na produção forrageira. Observa-se que a produtividade obtida neste trabalho foi superior ao limite mínimo recomendado para pastagens de gramíneas tropicais ($2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), de modo a não restringir o consumo voluntário de forragem pelos animais (MINSON, 2012). Possivelmente esta produção elevada relaciona-se ao fato que, durante o experimento, as precipitações foram adequadas ao bom desenvolvimento da forrageira, conforme mostra a Figura 4.4. Produtividades menores foram obtidas por Müller *et al.* (2002) em trabalho com capim Mombaça irrigado, onde a MS foi $4,958 \text{ ton ha}^{-1}$.

Figura 4.8. Matéria seca (MS) de forragem, média de sete cortes, em ton ha^{-1} , para os pontos amostrais, para o período de março de 2018 a abril de 2019, Tapejara – PR, Brasil.



*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância.

Tabela 4.3. Produção de matéria seca (MS), em $\text{ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e redução percentual em relação ao pleno sol (TAP1), de *Megathyrsus maximus* (capim-mombaça), para o período de março de 2018 a abril de 2019, Tapejara – PR, Brasil.

Pontos amostrais	TAP1	TAP2	TAP3	TAP4	TAP5
------------------	------	------	------	------	------

Matéria seca (ton.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	16,47	8,60	5,38	9,71	5,08
Redução em relação ao pleno sol (TAP1)	-	47,8%	67,3%	41,0%	69,2%

Valores compatíveis foram encontrados em trabalho comparando a MS em função de dois níveis de sombreamento (20 e 30%) ao longo das estações do ano no estado de Minas Gerais (CASTRO *et al.*; 2009). Os autores constataram que na primavera (1,187 ton ha⁻¹) e verão, (2,003 ton ha⁻¹) houve influência do sombreamento sobre a produção de MS, mas não no inverno (0,357 ton ha⁻¹).

Diferentemente dos resultados obtidos neste trabalho, o sombreamento sob a copa de pau-d'arco (*Tabebuia serratifolia Vahl*) e de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) não afetou a produção de matéria seca do capim-andropogon (*Andropogon gayanus*), contudo reduziu a altura do pasto aos 63 dias de rebrota (VERAS *et al.*, 2010).

Em arranjos diferenciados, percebeu-se que o uso de linhas duplas de eucalipto implica em redução na quantidade de radiação incidente no sub-bosque, mas não implica em redução da produtividade do pasto em relação ao arranjo simples. Estes resultados indicam que o uso de arranjos duplos pode permitir a colheita de maior quantidade de árvores sem prejudicar a produtividade do pasto (COELHO *et al.*, 2014).

No entanto, algumas alternativas são vislumbradas. As massas seca e fresca das cultivares Tanzânia e Planaltina foram superiores em ambientes sombreados, quando comparadas ao pleno sol. Ou seja, a adaptação positiva em ambientes sombreados das cultivares torna-se promissora em sistemas de integração silvipastoris (DE OLIVEIRA *et al.*, 2013). Na mesma linha, a *Brachiaria decumbens* apresenta plasticidade fenotípica em resposta às variações sazonais das condições climáticas e de sombreamento, o que confere a essa espécie elevado potencial para uso em sistemas silvipastoris (PACIULLO *et al.*, 2008)

4.4 CONCLUSÕES

Conclui-se que o sombreamento causado pelas árvores e a competição por água reduz a produção forrageira em sistema silvipastoril na região noroeste do estado do Paraná. São necessários avanços científicos na definição de espaçamentos mínimos entre filas de árvores, escolha de espécies forrageiras

produtivas e tolerantes à baixa radiação solar para o sucesso dos sistemas silvipastoris.

5 **ARTIGO C – SEQUESTRO DE CARBONO EM SISTEMA SILVIPASTORIL DE EUCALIPTO NO NOROESTE PARANAENSE**

RESUMO

A intensificação do aquecimento global é determinada por diversos fatores, com destaque para o aumento da emissão dos gases de efeito estufa (GEE). Uma das principais alternativas para a mitigação de GEE é o sequestro de carbono pelas árvores. Os sistemas silvipastoris têm sido reconhecidos como importantes técnicas na estratégia de sequestrar e fixar carbono da atmosfera. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi estimar o carbono sequestrado num sistema silvipastoril com eucalipto em comparação ao sistema de pastagem a pleno sol na região noroeste do estado do Paraná. Foram estimados o sequestro de carbono do componente florestal, das forrageiras e estocado no solo. O estudo foi realizado em um sistema silvipastoril em Tapejara – PR (23° 41' S, 52° 53' O, 445 m), durante o período de junho de 2017 a março de 2019. Neste período foram estimados o carbono sequestrado em quatro posições do sistema silvipastoril (abaixo das copas e centro das entre linhas de árvores) em duas distâncias de entre linhas de árvores (20 e 30 m), e em um ponto de pastagem a pleno sol em área adjacente. Os teores de carbono capturado pelo eucalipto foram de 25,781 e 17,773 ton C ha⁻¹ nos espaçamentos de 20 e 30 m, respectivamente. O carbono capturado pela forrageira foi maior no tratamento a pleno sol em relação ao sistema silvipastoril. Não houve diferença significativa nos estoques de carbono no solo entre os tratamentos. Conclui-se que o sistema silvipastoril com eucalipto na região noroeste do Paraná proporciona valores de sequestro de carbono maiores em comparação ao sistema de pastagem em monocultivo.

Palavras-chave: Mitigação climática; sistemas integrados; sistemas de produção.

ABSTRACT

The intensification of global warming is determined by several factors, with emphasis on the increase in the emission of greenhouse gases (GHG). One of the main alternatives for GHG mitigation is the sequestration of carbon by trees. The silvopastoral systems have been recognized as important techniques in the strategy of sequestering and fixing carbon from the atmosphere. In this context, the objective of the work was to estimate the carbon sequestered in a silvopastoral system with eucalyptus compared to the system of grazing under full sun in the northwestern region of the state of Paraná, Brazil. The carbon sequestration of the forest component, of the forages and stored in the soil was estimated. The study was carried out in a silvopastoral system in the municipality of Tapejara (23° 41' S, 52° 53' O, 445 m), from June 2017 to March 2019. During this period, carbon sequestered by eucalyptus was estimated, by forage and stored in the soil, in four positions of the silvopastoral system (below the crowns and center of between tree lines) at two distances between tree lines (20 and 30 m), and at a point of grazing in full sun in an adjacent area. The carbon content captured by the eucalyptus was 25.781 and 17.773 ton C ha⁻¹ in the spacing of 20 and 30 m, respectively. The carbon captured by the forage was higher in the treatment under full sun in relation to the silvopastoral system. There was no significant difference in carbon stocks in the soil between treatments. It is concluded that the silvopastoral system with eucalyptus in the northwestern region of Paraná provides higher carbon sequestration values compared to the monoculture pasture system.

Keywords: Climate mitigation; production systems; eucalyptus.

5.1 INTRODUÇÃO

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) está entre os principais causadores de alterações climáticas globais (IPCC, 1995). Estratégias para a redução destas emissões e, principalmente, atividades de maximização do sequestro de carbono da atmosfera são ações necessárias de todos, inclusive do setor agrícola (IPCC, 2007).

Uma das principais alternativas para a mitigação das emissões de GEE é o sequestro de carbono da atmosfera e armazenamento no solo. O IPCC (2007) indicou que as florestas podem contribuir ativamente para o sequestro de carbono, em virtude do papel reconhecido das árvores na transformação de carbono em biomassa, conseqüentemente, mitigar a emissão de GEE. O quinto relatório de avaliação do IPCC estimou que até 2040 a agrossilvicultura ofereceria alto potencial de sequestro de carbono nos países em desenvolvimento. No entanto, o papel da agrossilvicultura tropical no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas foi reconhecido apenas recentemente pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Isso se deve em parte à falta de estimativas confiáveis sobre o potencial de sequestro nas reservas de biomassa e carbono do solo ao longo do tempo (NEGASH; KANNINEN, 2015).

Estima-se que o potencial para sequestrar carbono em componentes acima do solo por sistemas agroflorestais seja de $2,1 \times 10^9$ ton C ano⁻¹ nos trópicos e de $1,9 \times 10^9$ ton C ano⁻¹ em biomas temperados. No entanto, o tipo de sistema agroflorestal e sua capacidade de sequestrar carbono varia globalmente (OELBERMANN *et al.*, 2004).

A região noroeste do Paraná tem potencial para implantação de sistemas silvipastoris, pois a pecuária é uma das principais atividades econômicas, com 2,14 milhões de cabeças de bovinos em uma área territorial de 24,7 mil km² (IPARDES, 2020). A inclusão de sistema silvipastoril nas áreas que hoje estão em sistema de monocultivo, pode contribuir para atingir as metas de sequestro de carbono firmadas pelo Brasil em acordos ambientais (Brasil, 2012).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar o carbono sequestrado num sistema silvipastoril com eucalipto em comparação ao sistema de pastagem a pleno sol na região noroeste do estado do Paraná.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Local de Experimentação

O trabalho foi realizado na região noroeste do Paraná, município de Tapejara, latitude 23° 41' 33" S, longitude 52° 53' 27" O e altitude de 445 m, entre os meses de janeiro de 2017 e abril de 2019. O clima é Cfa, segundo classificação climática de Köppen, descrito como subtropical úmido, com temperaturas médias do ar no mês mais frio entre 0 °C e 18 °C e, no mês mais quente de 22 °C ou superior (NITSCHKE *et al.*, 2019).

O estudo foi conduzido em uma área de 13 ha de sistema silvipastoril em uma propriedade particular que possui área total de aproximadamente 36 ha.

A espécie florestal utilizada foi o *Eucalyptus grandis*, em fila única, 1,5 m entre árvores, com distâncias de 20 a 30 m entre linhas, altura de 21,1 a 22,6 m e densidade arbórea de 333 a 222 árvores ha⁻¹, respectivamente, com 12 anos de idade. A espécie forrageira presente na área era a *Megathyrsus maximus* (capim-mombaça).

O solo foi classificado como Argissolo (FIDALSKI *et al.*, 2010) e tem as características texturais e químicas apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2. As análises foram realizadas no Laboratório de Solos do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), segundo metodologia proposta por Pavan *et al.* (1992).

Tabela 5.4. Análise textural do solo da área experimental, em diferentes camadas, em g kg⁻¹.

Camadas (m)	Argila	Silte	Areia
	g kg ⁻¹		
0,0 – 0,1	4,3	1,3	94,4
0,1 – 0,2	4,3	1,3	94,4
0,2 – 0,3	4,3	1,3	94,4
0,3 – 0,4	4,0	1,4	94,6
0,4 – 0,5	4,9	1,1	94,0

Tabela 5.5. Análise química do solo da área experimental, nas camadas 0,0-0,1 (1), 0,1-0,2 (2), 0,2-0,3 (3), 0,3-0,4 (4) e 0,4-0,5 m (5).

Prof.	P	pH	Al ³⁺	H ⁺ Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC	V	m
	mg dm ⁻³									cmol _c dm ⁻³ de solo	
1	2,5	4,86	0,03	2,95	1,24	0,34	0,13	1,71	4,65	36,67	1,85
2	2,3	4,84	0,04	2,91	1,24	0,30	0,11	1,65	4,56	35,56	2,89
3	1,5	4,83	0,05	2,73	1,18	0,25	0,09	1,52	4,25	35,58	3,05
4	1,2	4,94	0,03	2,62	1,04	0,20	0,08	1,32	3,95	33,53	2,52
5	1,4	4,93	0,03	2,52	1,07	0,21	0,08	1,36	3,87	34,98	2,28

Observações: SB = Soma de bases; CTC = Capacidade de trocas de cátions; V = Saturação por bases; m = Saturação por Alumínio; P e K por Mehlich I; Ca, Mg e Al por KCl M; pH por CaCl₂ 0,01 M

5.2.2 Sequestro de Carbono

Para a quantificação do carbono sequestrado pelo sistema silvipastoril, foram considerados os componentes arbóreo, solo e forrageira.

5.2.2.1 Estimativa do estoque de biomassa e carbono do tronco do componente arbóreo

Para a estimativa do volume do tronco do componente arbóreo foram medidas a altura total das árvores (Ht) e respectivo diâmetro a 1,3 m de altura do solo (DAP), de uma amostra de 100 árvores próximas aos pontos amostrais para cada espaçamento entre linhas (20 e 30 m), equivalente a 18% da totalidade de unidades arbóreas do experimento. O método para a estimativa do teor de carbono armazenado foi o proposto por Müller *et al.* (2009), sendo que o modelo volumétrico adotado para esta estimativa foi o proposto por Miranda *et al.* (2015) (Equação 01).

$$V = -0,05504 + 0,00055 \times \text{DAP}^2 + 0,0000006 \times \text{DAP}^2 \times \text{Ht},$$

eq. 01

Em que,

V = volume da madeira, em m³;

DAP = diâmetro a 1,3 m do solo, em cm;

Ht = altura total da árvore, em m.

As estimativas de biomassa do tronco das árvores foram calculadas multiplicando-se os valores de densidade básica da madeira pelos respectivos volumes (MÜLLER *et al.*, 2009) (Equação 02):

$$\text{MSE} = V \times \text{DBM} \quad \text{eq. 02}$$

Em que,

MSE = biomassa eucalipto, em kg;

V = volume da madeira, em m³;

DBM = densidade básica média da madeira, em kg m⁻³.

Para o cálculo do carbono estocado na biomassa pelo tronco das árvores, foi considerado o índice de 50% da biomassa. Este percentual tem sido aceito pela United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) como base de estimativas de carbono em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (MÜLLER *et al.*, 2009).

5.2.2.2 Estimativa do estoque de biomassa e carbono no componente forrageiro

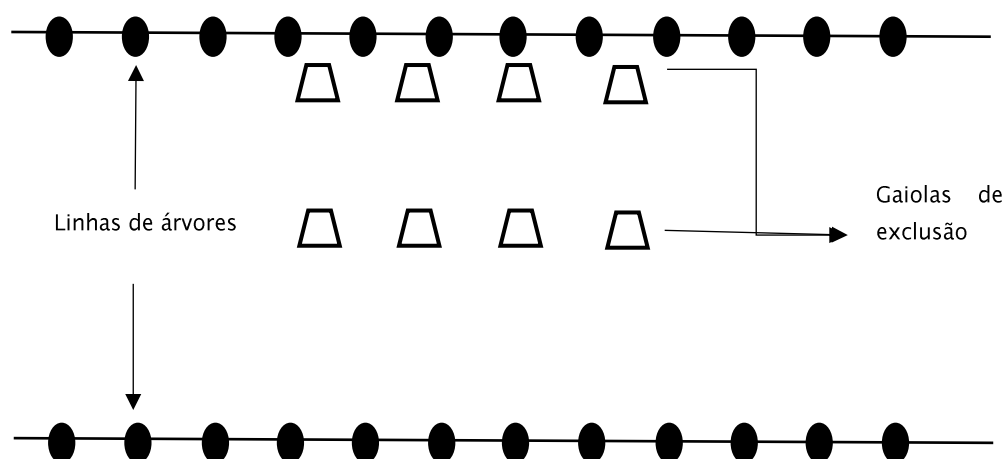
As amostras para a avaliação da produção de biomassa e sequestro de carbono pelo componente forrageiro foram obtidas com auxílio de gaiolas de exclusão de 1,0 x 1,0 x 1,0 m, com quatro repetições, em cinco pontos amostrais. Um ponto em pastagem exposta a pleno sol (TAP1), e outros quatro dispostos em pastagem sombreada, em dois distanciamentos entre linhas de árvores (20 e 30 m), posicionados no centro das entre linhas (TAP2 e TAP4) e abaixo da copa das árvores (TAP3 e TAP5) (Figura 5.1 e 5.2).

Figura 5.1. Posicionamento dos pontos amostrais no experimento em sistema silvipastoril, Tapejara - PR, Brasil.



Fonte: Google Earth - adaptado pelo autor.

Figura 5.2. Esquema de alocação das gaiolas de exclusão entre as linhas e abaixo das copas das árvores nas áreas de pastagens sombreadas.



Foram coletadas a biomassa verde ao longo do ano de 2018/2019, em intervalos de tempo variados em função do crescimento da forrageira, a saber: 05/07/18, 17/09/18, 19/11/18, 10/01/19, 7/03/19 e 29/04/19, totalizando seis cortes. Após o corte as amostras foram levadas à estufa a 65 °C por 24 h ou

até atingir massa constante, e medida a massa seca (MS) com balança de precisão.

Na área das gaiolas de exclusão foram aplicados, imediatamente após o corte da pastagem, 100 kg de N ha⁻¹ divididos em quatro doses, ao longo dos meses de setembro de 2018 a março de 2019.

Para o cálculo do carbono existente, foi considerado o mesmo índice da biomassa do componente arbóreo, ou seja, 50%.

5.2.2.3 Estimativa do estoque de carbono no solo

Foram coletadas amostras de solo nas camadas 0–0,1, 0,1–0,2, 0,2–0,3, 0,3–0,4, 0,4–0,5 m para a quantificação de carbono presente no solo, nos cinco pontos amostrais (Figura 5.1), com 4 repetições, em março de 2019. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Solos do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), sendo o método utilizado o de Walkley–Black.

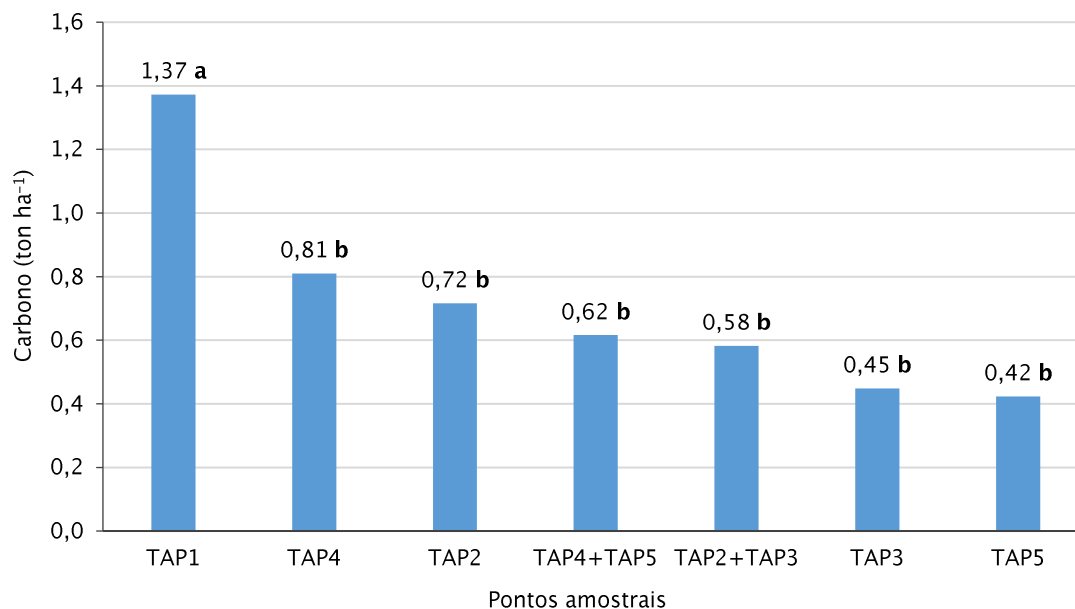
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O carbono sequestrado pelas árvores de eucalipto no sistema silvipastoril em ambos os espaçamentos entre linhas de árvores, 20 e 30 m, foi estimado em 25,781 e 17,773 ton C ha⁻¹ ou na forma de CO₂ equivalente de 0,094 e 0,065 ton CO₂eq ha⁻¹, respectivamente. Em quantificação do estoque de carbono no estado de Minas Gerais, obteve-se valores de 47,7 ton C ha⁻¹ estocadas na parte aérea das árvores, 14,71 nas raízes e 8,72 na manta orgânica, totalizando 71,13 ton C ha⁻¹ (PAIXÃO *et al.*, 2006). No entanto, os valores são superiores aos 0,1 a 0,25 ton C ha⁻¹ estimados para regiões tropicais em consórcios com 10 anos de idade (NAIR *et al.*, 2009).

Os sistemas agroflorestais têm um potencial maior de sequestrar carbono do que os pastos ou as culturas anuais, porque a incorporação de árvores, em áreas de cultivo e pastagens, resulta em maior superfície líquida para absorção de radiação solar (SARKAR, 2019). Destaca-se ainda o alto potencial de crescimento inicial do eucalipto em sistemas integrados em comparação à outras espécies florestais (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

O carbono sequestrado pela forrageira mostrou diferença estatística entre os valores do tratamento a pleno sol em relação a todos os pontos amostrais do sistema silvipastoril (Figura 5.3).

Figura 5.3. Carbono capturado da atmosfera pela forrageira, média de seis cortes, em ton ha⁻¹, para os pontos amostrais entre julho de 2018 e abril de 2019, Tapejara – PR, Brasil.

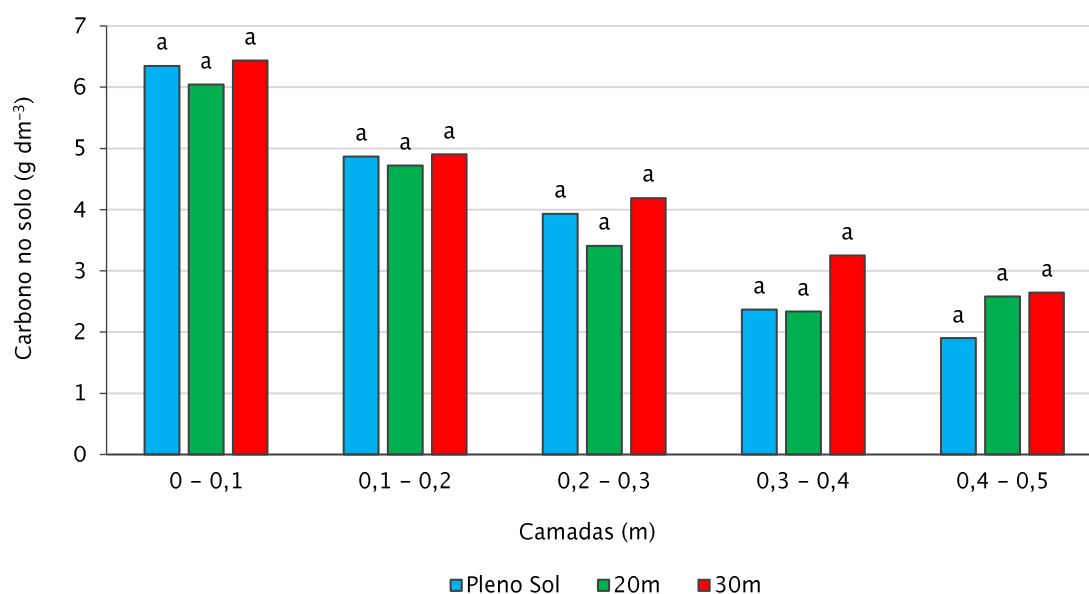


Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância.

Estas diferenças eram esperadas em função do sombreamento e da competição hídrica causado pelo componente arbóreo nos pontos amostrais do sistema silvipastoril. Destaque para os pontos abaixo das copas das árvores (TAP3 e TAP5), onde obteve-se os menores valores de sequestro de carbono, sendo máxima a competição hídrica e interceptação da radiação solar pelas copas das árvores.

O estoque de carbono no solo foi maior na camada superficial e decresceu à medida que se aprofundou no solo (Figura 5.4). Em camadas mais superficiais a fração de matéria orgânica do solo, que é geralmente maior na superfície, resulta em valores maiores de carbono (SCHIAVO *et al.*, 2011) em função da alta densidade do sistema radicular da forrageira (NEVES *et al.*, 2004). No entanto, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos para nenhuma camada de solo analisada. Esse resultado indica que a implantação das árvores na pastagem não alterou o armazenamento de carbono no solo.

Figura 5.4. Médias de estoque de carbono no solo, em g dm^{-3} , nas camadas 0–0,1, 0,1–0,2, 0,2–0,3 e 0,4–0,5 m, para os tratamentos pleno sol, linhas de árvores a 20 m e 30 m, em março de 2019, Tapejara – PR, Brasil.

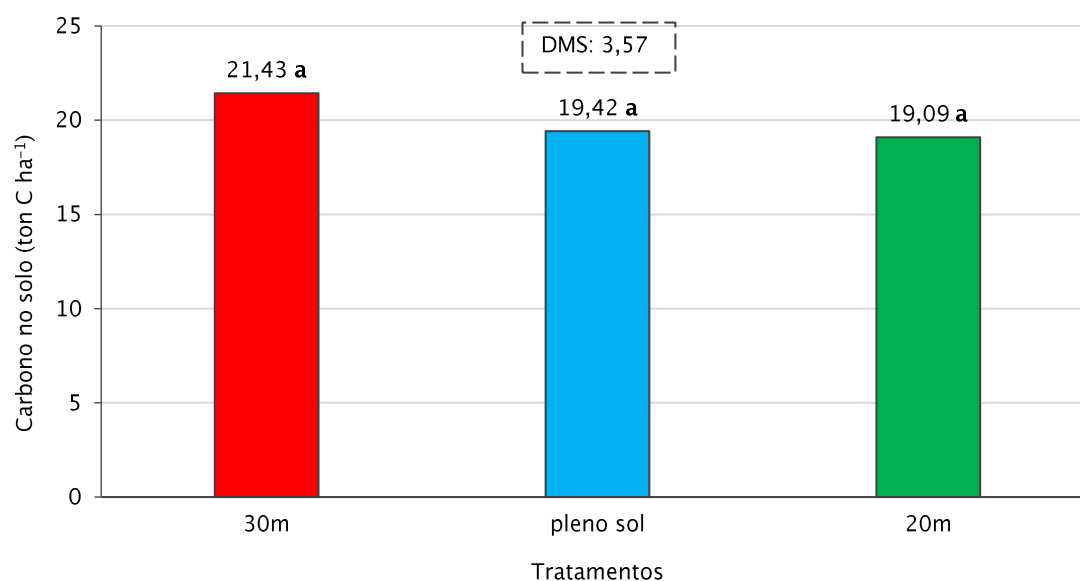


Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância.

Quando se compara os estoques de carbono armazenados na camada de 0–0,5 m do solo percebe-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos analisados (Figura 5.5).

Valores superiores foram estimados para estoque de carbono nos solos em sistemas silvipastoris com 10 anos, entre 60 e 95 ton C ha^{-1} em camada de 0–0,5 m de profundidade, com potencial para adicionar mais 30 a 60 ton C ha^{-1} em 1 m (NAIR *et al.*, 2009). No entanto, valores ligeiramente inferiores (17,9 ton C ha^{-1}) foram obtidos em estudos no noroeste do estado de Minas Gerais em trabalho com sistema agrosilvipastoril (NEVES *et al.*, 2004). Diferentes resultados também foram obtidos por Mangalassery *et al.* (2014), em estudos na Índia, onde o sistema silvipastoril sequestrou 36,3 a 60% mais estoque total de carbono orgânico no solo em comparação com o sistema arbóreo e 27,1 a 70,8% mais em comparação com o sistema de pastagem.

Figura 5.5. Estoque de carbono no solo, em ton C ha^{-1} , para a camada de 0–0,5 m, para os tratamentos pleno sol, linhas de árvores a 20 m e 30 m, em março de 2019, Tapejara – PR, Brasil.



Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5% de significância.

5.4 CONCLUSÕES

O sistema silvipastoril com eucalipto na região noroeste do Paraná proporciona valores de sequestro de carbono maiores em comparação ao sistema de pastagem em monocultivo.

6 CONCLUSÕES GERAIS

A implantação de um sistema silvipastoril de eucalipto com pastagem de capim-mombaça alterou as condições microclimáticas, pois reduziu a incidência de radiação solar global, diminuiu os valores de temperatura média e máxima do ar, da precipitação pluviométrica e da velocidade média do vento. Sendo assim, conclui-se que as condições microclimáticas foram alteradas no sistema silvipastoril na região noroeste do Paraná.

Foram identificados como fatores limitantes para a condução do sistema silvipastoril o sombreamento causado pelas árvores e a competição por água. Estes reduzem a produção forrageira, mas destaca-se, não são impeditivos para o sucesso do sistema. São necessários avanços científicos na definição de espaçamentos mínimos entre linhas de árvores, escolha de espécies forrageiras produtivas e tolerantes à baixa radiação solar para o sucesso dos sistemas silvipastoris.

A introdução do componente arbóreo em pastagens proporciona o sequestro de carbono em valores superiores quando comparados a um sistema de pastagem a pleno sol tornando-se uma estratégia importante na busca de sistemas sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALTO, J.; RIIHIMAKI, H.; MEINER, E.; HYLANDER, K.; LUOTO, M. Revealing topoclimatic heterogeneity using meteorological station data. **International Journal of Climatology**, v.37, p.544–556, 2017.

ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.24, n.7, p.797–800, 1989.

AZEVEDO, T. R.; ANGELO, C. SEEG – Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris. Observatório do Clima, 2018.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFIRIO DA SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura–pecuária–floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.i–xii, 2011.

BALISCEI, M. A.; BARBOSA, O. R.; SOUZA, W.; COSTA, M. A. T.; KRUTZMANN, A.; QUEIROZ, E. O. Microclimate without shade and silvopastoral system during summer and winter. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.35, n.1, p.49–56, 2013.

BARBOSA, O. R.; BOZA, P. R.; SANTOS, G. T.; SAKAGUSHI, E. S.; RIBAS, N. P. Efeitos da sombra e da aspersão de água na produção de leite de vacas da raça Holandesa durante o verão. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.26, n.1, p.115–122, 2004.

BARRETO, L. V.; FREITAS, A. C. S.; PAIVA, L. C. Sequestro de Carbono. Centro Científico Conhecer, Goiânia, **Enciclopédia Biosfera**. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2009/sequestro.pdf>, N.07, 2009, ISSN 1809–058351>. Acessado em: 21 jun. 2017.

BENAVIDES, R.; DOUGLAS, G. B.; OSORO, K. Silvopastoralism in New Zealand: review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. **Agroforest Systems**, Springer, v.76, n.2, p.327–350, 2009.

BERNARDINO, F. S.; GARCIA, R. Sistemas silvipastoris. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.60, p.77–87, 2009.

BONATO, J. A., HENKES, J. A. O sequestro de carbono (CO₂) proporcionado pelo sistema silvipastoril, com ênfase no aumento da renda familiar, com integração das atividades de lavouras e pecuária e a produção da madeira, carne e leite. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.2, n.1, p.222–249, 2013.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C.; SANTOS, P. M.; NICODEMO, M. L. F. Produtividade e características biométricas do capim–braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.6, p.449–456, jun. 2014.

BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. CROPGRO–Perennial Forage model parameterization for simulating Piata palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v.177, 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Atlas do potencial eólico brasileiro. Brasília: MME, 45p., 2001.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS, 173p., 2012.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.277–289, 2010.

CASTRO SANTOS, D.; GUIMARAES JUNIOR, R.; VILELA, L.; MACIEL, G. A.; FRANÇA, A. F. S. Implementation of silvopastoral systems in Brazil with *Eucalyptus urograndis* and *Brachiaria brizantha*: Productivity of forage and an exploratory test of the animal response. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.266, p.174–180, 2018.

CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; MÜLLER, M. D.; NASCIMENTO JUNIOR, E. R. Características Agronômicas, Massa de Forragem e Valor Nutritivo de *Brachiaria decumbens* em Sistema Silvopastoril. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.60. 2009.

CHATTERJEE, N.; NAIR, P. K. R.; CHAKRABORTY, S.; NAIR, V.D. Changes in soil carbon stocks across the Forest–Agroforest–Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.266, p.55–67, 2018.

CHU, X.; ZHAN, J.; LI, Z.; ZHANG, F.; QI, W. Assessment on forest carbon sequestration in the Three–North Shelterbelt Program region, China. **Journal of Cleaner Production**, v.215, p.382–389, 2019.

COELHO, J. S.; ARAÚJO, S.A. do C.; VIANA, M. C. M.; VILLELA, S. D. J.; FREIRE, F. M.; BRAZ, T. G. dos S.; Morfofisiologia e valor nutritivo do capim-braquiária em sistema silvipastoril com diferentes arranjos espaciais. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.3, p.1487–1500, 2014.

DAIOGLOU, V.; DOELMAN, J. C.; WICKE, B.; FAAIJ, A.; VAN VUUREN, D. P. Integrated assessment of biomass supply and demand In climate change mitigation scenarios. **Global Environmental Change**, v.54, p.88–101, 2019.

DE OLIVEIRA, F. L. R.; MOTA, V. A.; RAMOS, M. S.; SANTOS, L. D. T.; DE OLIVEIRA, N. J. F.; GERASEEY, L. C. Performance of *Andropogon gayanus* and *Panicum maximum* cv. 'Tanzania' in the shading. **Ciência Rural**, v.43(2), p.348(7), 2013.

DENARDIN, R. B. N., MATTIAS, J. L., WILDNER, L. P., NESI, C. N., SORDI, A., KOLLING, D. F., BUSNELLO, F. J., CERUTTI, T. Estoque de carbono no solo sob

diferentes formações florestais, Chapeco – SC. **Ciência Florestal**, v.24, n.1, p.59–69, 2014.

DEVKOTA, N. R.; KEMP, D. P.; HODGSON, J.; VALENTINE, I.; JAYA, K. I. Relationship between tree canopy height and the production of pasture species in a silvopastoral system based on alder trees. **Agroforest Systems**, Springer, v.76, n.2, p.363–374, 2009.

DOUGLAS, G.; WALCROFT, A.; HURST, S. E.; POTTER, J. F.; FOOTE, A. G.; FUNG, L. E.; EDWARDS, W. R. N.; VAN DEN DIJSSEL, C. et al. Interactions between Widely Spaced Young Poplars (*Populus* spp.) and the Understorey Environment. **Agroforestry Systems**, v.67, n.2, p.177–186, 2006.

FERNANDES, C. A. F.; MATSUMOTO, S. N.; FERNANDES, V. S. Carbon stock in the development of different designs of biodiverse agroforestry systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.10, p.720–725, 2018.

FEY, R.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M. Silvopastoral system: a review regarding the family agriculture. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.2, n.2, p.26–41, 2015.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. *Scientia Agrícola*, v.67, n.4, 448–453, 2010.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; AULER, P. A. M. Influência das frações de areia na retenção e disponibilidade de água em solos das formações Caiuá e Paranaíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.613–621, 2013.

GOMEZ, J. M. R.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.40, n.3, 2018.

GREISER, C.; MEINER, E.; LUOTO, M.; EHRLÉN, J. HYLANDER, K. Monthly microclimate models in a managed boreal forest landscape. **Agricultural and Forest Meteorology**, 250–251, p.147–158, 2018.

GYENGE, J. E.; FERNÁNDEZ, M. E.; SALDA, G. D.; SCHLICHTER, T. M. Silvopastoral systems in Northwestern Patagonia II: water balance and water potential in a stand of *Pinus ponderosa* and native grassland. **Agroforestry Systems**, Springer, v.55, n.1, p.47–55, 2002.

HUTCHINSON, J. J.; CAMPBELL, C. A.; DESJARDINS, R. L.; Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, p.288–302, 2007.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=701&btOk=ok>. Acessado em: 14 jan. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change 1990. **First Assessment Report (FAR)**. 1990. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_first_assessment_1990_wg1.shtml>. Acessado em: 06 jun. 2017.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change 1995. **Second Assessment Climate Change**. 1995. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>>. Acessado em: 06 jun 2017.

IPCC. **Climate Change 2007: Mitigation**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. 2007. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf>. Acessado em: 10 jun. 2017.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2013. **The physical Science basis. Contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf>. Acessado em: 10 jun. 2017.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2014. **Synthesis Report Summary for Policymakers**. 2014. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf>. Acessado em: 06 jun. 2017.

JUNQUEIRA, A. C.; SCHLINDWEIN, M. N.; CANUTO, J. C.; NOBRE, H. G.; SOUZA, T. J. M. Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.8, n.1, p.102–115, 2013.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2a. Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 452p., 2008.

LEME, T. M. S. P.; PIRES, M. F. A.; VERNEQUE, R. S.; ALVIN, M. J.; AROEIRA, L. J. M. Comportamento de vacas mestiças Holandês x Zebu, em pastagem de *Brachiaria decumbens* em sistema silvipastoril. **Ciência Agrotécnica**, v.29, n.3, p.668–675, 2005.

LINDOSO, D.; MARIA, J. A. Evolução da adaptação à mudança climática na agenda da ONU: vinte anos de avanços e descaminhos. **Cuadernos de Geografía – Revista Colombiana de Geografía**, vol. 22, núm. 2, julio-diciembre, p.107–123, 2013.

LUCAS, M. A. K.; PERSKE, R. C. F.; SOUZA, R. H. V. de; PIMENTEL, D. C. C.; Sistema silvipastoril na Região da Campanha do Rio Grande do Sul. Bagé: **Embrapa Pecuária Sul**, p.23, 2015.

LUNT, P. H.; FYFE, R. M.; TAPPIN, A. D. Role of recent climate change on carbon sequestration in peatland systems. **Science of the Total Environment**, v.667, p.348–358, 2019.

MANGALASSERY, S.; DAYAL, D.; MEENA, S.; RAM, B. Carbon sequestration in agroforestry and pasture systems in arid northwestern India. **Current Science**, v.107 (8), p.290–1293, 2014.

MARIA, L. S.; OLIVEIRA, P. P. G.; SILVA, M. S.; YAMASHITA, O. M. Contribuição dos sistemas de Integração Lavoura–Pecuária–Floresta (ILPF) no sequestro de carbono. **Revista Espacios**. v. 38 (31), 2017.

MARTINKOSKI, L.; VOGEL, G. F.; JADOSKI, S. O.; WATZLAWICK, L. F. Qualidade Física do Solo Sob Manejo Silvopastoril e Floresta Secundária. **Floresta e Ambiente**, v.24. 2017.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. **Agrometeorology: Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture**. CRC Press, 447p, 2004.

MINSON, D. **Forage in ruminant nutrition**. Academic Press, New York, 2012.

MIRANDA, D. L. C.; BERNARDINO JUNIOR, V.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Plena**, v.11 (3), 2015.

MORAIS, R. R. A seringueira como alternativa para a fixação de carbono. **Campo e Negócios Floresta**, n.12, p.53, 2014.

MÜLLER, M. S.; FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA Y GARCA, A.; OVEJERO, R. F. L. Produtividade do *Panicum maximum* cv. Mombaça irrigado, sob pastejo rotacionado. **Scientia Agricola**, v.59, n.3, p.427–433, 2002.

MÜLLER, M. D.; FERNANDES, E. N.; CASTRO, C. R. T. de; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. de F. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.60, p.11–17, 2009.

NAIDOO, R., BALMFORD, A., COSTANZA, R., FISHER, B., GREEN, R. E., LEHNER, B., RICKETTS, T. H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.105, n.28, p.9495–9500, 2008.

NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; KUMAR, B. M.; HAILE, S. G.; Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. **Environmental Science & Policy**, v.12, p.1099–1111, 2009.

NEGASH, M.; KANNINEN, M. Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO2FIX approach. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.203, p.147–155, 2015.

NEIVA, J. N. M.; TEIXEIRA, M.; TURCO, S. H. N.; OLIVEIRA, S. M. P.; MOURA, A. A. A. N. Efeito do Estresse Climático sobre os Parâmetros Produtivos e Fisiológicos de Ovinos Santa Inês Mantidos em Confinamento na Região Litorânea do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.3, p.668–678, 2004.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MACEDO, R. L. G.; TOKURA, A. M. Estoque de carbono em sistemas agrossilvipastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.28, n.5, p.1038–1046, 2004.

NICODEMO, M. L. F.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; SANTOS, P. M.; VINHOLIS, M. M. B.; FREITAS, A. R.; CAPUTTI, G. Initial Development of Tree Species in Silvopastoral System in Southern Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 2010.

NICODEMO, M. L. F. Dinâmica da água em sistemas agroflorestais. SP: **Embrapa Pecuária Sudeste**, São Carlos, SP, 36p., 2011.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. Atlas Climático do Estado do Paraná. Londrina, PR: **IAPAR**, 2019.

NOAA, National Oceanic & Atmospheric Administration. Disponível em: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo.png. Acessado em 26 mar. 2019.

NÓBREGA, G. H.; SILVA, E. M. N.; SOUZA, B. B.; MANGUEIRA, J. M. A produção animal sob influência do ambiente nas condições do semiárido nordestino. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.6, n.1, p. 67-73, 2011.

OELBERMANN, M.; VORONEY, R. P.; GORDON, A.M. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.104, p.359-377, 2004

OLIVEIRA, T. K.; MACEDO, R. L. G.; SANTOS, I. P. A.; HIGASHIKAWA, E. M.; VENTURIN, N. Produtividade de *Brachiaria Brizantha* (Hochst. Ex A. Rich) Stapf cv. Marandu sob diferentes arranjos estruturais de sistema agrossilvipastoril com eucalipto. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, n.3, p.748-757, 2007.

OLIVERIA, C. H. R., REIS, G. G., REIS, M. G. F., LEITE, H. G., SOUZA, F. C., FARIA, R. S., OLIVEIRA, F. B. Dynamics of eucalypt clones canopy and *Brachiaria brizantha* production in silvopastoral systems with different spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, p.1-12, 2015.

OLIVEIRA, F. L. R.; CABACINHA, C. D.; SANTOS, L. D. T.; BARROSO, D. G.; SANTOS JUNIOR, A.; BRANT, M. C.; SAMPAIO, R. A.. Crescimento inicial de eucalipto e acácia, em diferentes arranjos de integração lavoura-pecuária-floresta. **CERNE**, v.21 (2), p.227-233, 2015.

PACIULLO, D. S. C.; CAMPOS, N. R.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; TAVELA, R. C.; ROSSIELLO, R. O. P. Crescimento de capim-braquiária influenciado pelo grau de sombreamento e pela estação do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.917-923, 2008.

PACIULLO, D. S. C.; CASTRO, C. R. T.; GOMIDE, C. A. M.; MAURÍCIO, R. M.; PIRES, M. F. Á.; MÜLLER, M. D.; XAVIER, D. F. Performance of dairy heifers in a silvopastoral system. **Livestock Science**, v.141, p.166-172, 2011.

PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.3, p.411-420, 2006.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Londrina: **Instituto Agrônomo do Paraná**. 40p. (Circular Técnica, 76), 1992.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; NICODEMO, M. L. F.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da; PARMEJANI, R. S. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in south eastern Brazil. **Bragantia**, v.74, n.1, p.110–119, 2015.

POLLOCK, K. M.; MEAD, D. J.; MCKENZIE, B. A. Soil moisture and water use by pastures and silvopastures in a sub-humid temperate climate in New Zealand. **Agroforestry Systems**, v.75, p.223–238, 2009.

RADOMSKI, M. I.; RIBASKI, J. Sistemas Silvopastoris: Aspectos da Pesquisa com Eucalipto e Grevílea nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, ISSN 1679–2599, 40p., 2009.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação de solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C. A, Silva L.S.; Reichert, J. M.; Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.5, p.49–134, 2007.

ROCHA, S. J. S. S.; SCHETTINI, B. L. S.; ALVES, E. B. B. M.; VILLANOVA, P. H.; TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; NETO, S. N. O.; BRIANEZI, D. Balanço de carbono em três sistemas silvipastoril no Sudeste do Brasil. **Revista Espacios**, v.38, p.33, 2017.

RODRIGUES, A. L.; SOUZA, B. B.; PEREIRA FILHO, J. M. Influência do sombreamento e dos sistemas de resfriamento no conforto térmico de vacas leiteiras. **Agropecuária Científica no Semi-árido**, v.06, n.2, p.14–22, 2010.

RODRIGUES, C. O. D.; ARAÚJO, S. A. C.; VIANA, M. C. M.; ROCHA, N. S.; BRAZ, T. G. S.; VILLELA, S. D. J. Light relations and performance of signal grass in silvopastoral system. **Acta Scientiarum**, v.36, p.129–136, 2014.

ROSSI, T. J.; ESCOBEDO, J. F.; DOS SANTOS, C. M.; ROSSI, L. R.; DA SILVA, M. B. P.; DAL PAI, E. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol.82, p.448–459, 2018.

SANTOS, D. C.; GUIMARÃES JUNIOR, R.; VILELA, L.; PULROLNIK, K.; BUFON, V. B.; FRANÇA, A. F. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian savannah. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.233, p.16–24, 2016.

SANTOS, D. C.; JUNIOR GUIMARAES, R.; VILELA, L.; MACIEL, G. A.; FRANÇA, A. F. S. Implementation of silvopastoral systems in Brazil with Eucalyptus urograndis and Brachiaria brizantha: Productivity of forage and an exploratory test of the animal response. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.266, p.174–180, 2018.

SARI, V.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Interceptação da chuva em diferentes formações florestais na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21(1), p.65–79, 2016.

- SARKAR, P. K. CO2FIX model: A tool for estimating carbon sequestration potential of any agroforestry systems. **Agriculture & food: e-newsletter**. v.1 (3), p.1-5, 2019.
- SCHEMBERGUE, A.; CUNHA, D. A.; CARLOS, S. M.; PIRES, M. V.; FARIA, R. M. Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.55, n.01, p.09-30, 2017.
- SCHIAVO, J. A.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G.; SALTON, J. C. Índice de manejo de carbono e atributos químicos de Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46 (10), p.1332-1338, 2011.
- SILVA-PANDO, F. J.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, M. P.; ROZADOS-LORENZO, M. J. Pasture production in a silvopastoral system in relation with microclimate variables in the atlantic coast of Spain. **Agroforestry Systems**, v.56, 203-211, 2002.
- SILVA, R. G.; MORAIS, D. A. E. F.; GUILHERMINO, M. M. Evaluation of thermal stress indexes for dairy cows in tropical regions. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, n.4, p.1192-1198, 2007.
- SILVA, C. C. M. F.; ROSSIELLO, R. O. P.; PACIULLO, D. S. C.; GOMES, D. M. S.; CARVALHO, C. A. B.; RIBEIRO, R. C. Atributos morfofisiológicos e fitomassa de *Brachiaria decumbens* em um sistema silvipastoril. **Revista Ciências da Vida**, v.31, n.2, p.87-95, 2011.
- SOARES, A. B.; SARTOR, L. R.; ADAMI, P. F.; VARELLA, A. C.; FONSECA, L.; MEZZLIRA, J. C. Influência da luminosidade no comportamento de onze espécies forrageiras perenes de verão. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.3, p.443-451, 2009.
- SOUZA, W., BARBOSA, O. R., MARQUES, J. A., COSTA, M. A. T., GASPARINO, E., LIMBERGER, E. Microclimate in silvipastoral systems with eucalyptus in rank with different heights. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, n.3, p.685-694, 2010.
- TONELLO, K. C.; GASPAROTO, E. A. G.; SHINZATO, E. T.; VALENTE, R. O. A.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na floresta nacional de ipanema. **Revista Árvore**, v.38 (2), p.383-390. 2014.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.4, p.573- 581, 1998.
- TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; NETO, S. N. O.; BRIANEZI, D.; ALVES, E. B. B. M. Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.34, n.79, p.235-244, 2014.
- VALE, R. S.; MACEDO, R. L. G.; COUTO, L.; VALE, F. A. F.; VENTURIN, N. Sistemas Agroflorestais. In: ALVARENGA, A. P.; CARMO, C. F.S. Sequestro de Carbono: Quantificação em Seringais de cultivo e na vegetação Natural. Viçosa, Mg: **Suprema Gráfica**, p.215-255, 2006.

VARELLA, A. C.; RIBASKI, J.; SILVA, V. P.; SOARES, A. B.; MORAES, A.; MORAIS, H.; SAIBRO, J. C.; BARRO, R. S.; POLI, C. H. E. C. Recomendações para a escolha e manejo de plantas forrageiras em sistemas silvipastoris no Sul do Brasil. Bagé: **Embrapa Pecuária Sul**, 25 p., 2008.

VERAS, V.S.; OLIVEIRA, M.E.; LACERDA, M.S.B.; CARVALHO, T.B.; ALVES, A.A. Produção de biomassa e estrutura do pasto de capim-andropogon em sistema silvipastoril e monocultura. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v.62, n.1, p.200–207, 2010.

VIEIRA JUNIOR, N. A.; AGUIAR E SILVA, M. A.; CARAMORI, P. H.; NITSCHKE, P. R.; CORRÊA, K. A. B.; ALVES, D. S. Temperatura, conforto térmico e comportamento ingestivo animal em sistema silvipastoril. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.40, n.1, p.403–416, 2019.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil conservation**. Nairobi: ICRAF, 1990

ZELLWEGER, F.; FRENNE, P.; LENOIR, J.; ROCCHINI, D.; COOMES, D. Advances in Microclimate Ecology Arising from Remote Sensing. **Trends in Ecology & Evolution**, v.34, p.327–341, 2019.