



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, NATUREZA E
DESENVOLVIMENTO**

AUREANE CRISTINA TEIXEIRA FERREIRA CÂNDIDO

**INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA SILVIPASTORIL NA
AMAZÔNIA**

**SANTARÉM - PA
2024**

AUREANE CRISTINA TEIXEIRA FERREIRA CÂNDIDO

**INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA SILVIPASTORIL NA
AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, da Universidade Federal do Oeste do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais. Área de concentração: Impactos Ambientais e Sociais da Mudança do Uso da Terra na Amazônia.

Orientadora: Dr^a Lucieta Guerreiro Martorano

Coorientador: Dr Troy Patrick Beldini

**SANTARÉM - PA
2024**

Versão em inglês do título:

Sustainability Indicators of Silvopastoral Systems in the Amazon

A autora pode autorizar consulta e cópia deste trabalho somente para uso pessoal. Qualquer outro uso estará sujeito às leis de direitos autorais. Permissões para reprodução de qualquer material contido neste trabalho devem ser obtidas exclusivamente com a autora.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

C217i Cândia, Aureane Cristina Teixeira Ferreira
Indicadores de sustentabilidade do sistema silvipastoril na Amazônia./ Aureane
Cristina Teixeira Ferreira Cândia. – Santarém, 2024.
160 p. : il.
Inclui bibliografias.

Orientadora: Lucieta Guerreiro Martorano.
Coorientador: Troy Patrick Beldini.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Biodiversidade e Florestas, Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento.

1. Pecuária sustentável. 2. *Bertholletia excelsa*. 3. *Dipteryx odorata* 4. *Khaya grandifoliola*. 5. Pastagens. 6. Conforto térmico. 7. *Panicum maximum*. I. Martorano, Lucieta Guerreiro, *orient.*. II. Beldini, Troy Patrick, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 636.209811

Bibliotecária - Documentalista: Cátia Alvarez – CRB/2 843

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 26 dias do mês de março do ano de 2024, às 14 horas e 30 minutos, através da plataforma virtual <https://us05web.zoom.us/j/84331557291?pwd=iaulBWhoVeXCn94xOZwS1ropbM52qj.1> e presencial na sala 447 C do BMT, instalou-se a banca examinadora de tese de doutorado da discente **Aureane Cristina Teixeira Ferreira Cândido** do PPGSND/UFOPA. A banca examinadora foi composta pela Dra. Lucieta Guerreiro Martorano, PPGSND/UFOPA/Embrapa Amazônia Oriental, orientadora e presidente da banca, e pelos professores Dr. Dr. Arystides Resende Silva (Embrapa Milho e Sorgo) e Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias (UFC/Centro de Ciências/DEMA-Departamento de Estatística e Matemática Aplicada-Ceará), examinador externo, remotamente, Dr. Dr. Roberto Giolo de Almeida (Embrapa Gado e Corte, Campo Grande – MS), examinador externo presencial, Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior e para o Dr. Thiago Almeida Vieira (PPGSND/UFOPA) e a presença remotamente do professor Dr. Troy Beldini (Coorientador). Deu-se início à abertura dos trabalhos, por parte da professora Lucieta Guerreiro Martorano, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou à candidata que iniciasse a apresentação da tese, intitulada “INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DO SISTEMA SILVIPASTORIL NA AMAZÔNIA”, informando ao discente que possui de 30 a 60 minutos para a apresentação. Concluída a exposição, a Profa. Lucieta Guerreiro Martorano presidente da banca, passou a palavra ao examinador externo, Dr. Arystides Resende Silva (Embrapa Milho e Sorgo), para arguir a candidata, e, em seguida o Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias (UFC/Centro de Ciências/DEMA-Departamento de Estatística e Matemática Aplicada-Ceará) fez a arguição, seguida aos professores examinadores Dr. Roberto Giolo de Almeida (Embrapa Gado e Corte, Campo Grande – MS) e Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior (PPGSND/UFOPA) e para o Dr. Thiago Almeida Vieira, para que fizessem o mesmo, nesta ordem. Após o término das arguições a orientadora solicitou que o público se retire-se da sala para que ocorra a reunião exclusiva entre os membros da banca para o julgamento do trabalho. Após a deliberações da banca examinadora, a orientadora convocou a candidata e o público ouvinte de volta para divulgação do resultado. A banca examinadora decidiu por unanimidade pela **aprovação** da candidata, conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Oeste do Pará. A versão final da tese deverá ser entregue ao programa, no prazo de trinta dias após a defesa, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora. Nada mais havendo por constar, lavrou-se e fez-se a leitura da presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora, Presidente da Banca e Doutoranda. Santarém (PA), vinte e seis de março de dois mil e vinte e quatro, às dezoito horas.

Documento assinado digitalmente
 LUCIETA GUERREIRO MARTORANO
Data: 26/03/2024 18:33:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Lucieta Guerreiro Martorano
PPGSND/UFOPA/Embrapa Amazônia Oriental
Presidente da banca



Troy Beldini
PPGSND/UFOPA/Coorientador

Documento assinado digitalmente
 CARLOS TADEU DOS SANTOS DIAS
Data: 27/03/2024 21:31:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias
(UFC/Centro de Ciências/DEMA-Departamento
de Estatística e Matemática Aplicada-Ceará)

Documento assinado digitalmente
 ARYSTIDES RESENDE SILVA
Data: 26/03/2024 19:28:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Arystides Resende Silva
(Embrapa Milho e Sorgo)

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE MAX BARBOSA DE OLIVEIRA JUNIOR
Data: 26/03/2024 19:52:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior
(PPGSND/UFOPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br THIAGO ALMEIDA VIEIRA
Data: 27/03/2024 09:19:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Thiago Almeida Vieira
(PPGSND/UFOPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ROBERTO GIOLO DE ALMEIDA
Data: 26/03/2024 18:39:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Roberto Giolo de Almeida
(Embrapa Gado e Corte, Campo Grande – MS)

Documento assinado digitalmente
gov.br AUREANE CRISTINA TEIXEIRA FERREIRA CANDID
Data: 26/03/2024 18:55:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aureane Cristina Teixeira Ferreira Cândido
Discente PPGSND/UFOPA

Deus, fonte de todo o meu ser.

Ao meu esposo Bruno Ferreira Cândido, ao meu filho Don Ferreira Cândido e à minha filha que está sendo gerada, fontes da minha força, do meu amor, alegria diária e que são meus pilares de sustentação.

Aos meus pais, Haroldo e Auzeni, fonte dos meus sentimentos e ensinamentos sólidos que me tornaram uma pessoa melhor.

A minha irmã Kellen Patrícia Ferreira, fonte de companheirismo e incentivo, mesmo à distância.

A minha orientadora Dra Lucieta Guerreiro Martorano, fonte de encorajamento, por acreditar em mim e sempre me incentivar.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, pela oportunidade de capacitação e por toda a estrutura disponibilizada durante o Doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento – PPGSND, assim como todo corpo docente que o integra e à secretaria. Aproveito para registrar minha gratidão ao Prof Dr. Antônio Humberto H. Minervino por sua dedicação na coordenação durante a grande maioria do tempo que faço parte desse programa.

À Fazenda Nossa Senhora Aparecida, especialmente ao Sr Menoli, Sra Loyde, seus filhos Mariana e Rafael, por literalmente abrirem as porteiras da fazenda para a ciência, disponibilizando área, recursos e tempo para reuniões das nossas pesquisas.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, especialmente à Embrapa Amazônia Oriental, pela oportunidade ímpar à minha capacitação profissional.

A minha orientadora, professora Dr^a. Lucieta Guerreiro Martorano, pela brilhante orientação, paciência, dedicação, por acreditar e investir no meu crescimento profissional e por ser exemplo na nossa profissão e na sua história.

Ao meu coorientador, professor Dr. Troy Patrick Beldini, por acreditar na minha capacidade, me aceitando como orientanda no começo do curso.

Minha profunda gratidão ao meu esposo Bruno Uéslei Ferreira Cândido, que além de enfrentar inúmeras dificuldades, sendo muitas das vezes no período de pandemia, minha única companhia no campo, abraçou comigo o doutorado, trabalhando, dando sugestões e incentivando, estando comigo desde o dia da matrícula no curso e em cada fase.

Ao professor Dr. João Ricardo Vasconcellos Gama (*in memoriam*), que além de excelente professor, se tornou um grande amigo, por ter compartilhado experiências e aprendizados tanto em sala de aula como nos campos, integrando e assumindo essa pesquisa de forma louvável.

Registro meus sinceros agradecimentos ao Dr. Arystides Resende Silva (Embrapa Milho e Sorgo), por todo seu apoio, tanto em laboratório como em campo, participando ativamente de toda essa pesquisa.

Agradeço ao Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias, pela paciência, ensinamentos e tempo disponibilizado a nossa pesquisa e a ministrar cursos na nossa instituição.

Agradeço ao Dr. Paulo Campos Christo Fernandes (Embrapa Cerrados), que a partir da integração da banca de qualificação, assumiu papel de grande apoio e incentivo na minha formação e ao Dr. Moacyr Bernardino Dias-Filho (Embrapa Amazônia Oriental), pelas importantes considerações e parceria fidelizada também a partir da qualificação.

Agradeço de coração a Dra. Siglea Sanna Noirtin Freitas Chaves, que durante um período difícil na pandemia se fez presente, auxiliando na organização da tese e no campo, agradeço seu incentivo e amizade a mim depositados, amizade essa que levarei para toda vida.

Ao Me. Werlleson Nascimento, pela parceria nas análises estatísticas e por seu tempo para inúmeras reuniões discutindo as análises e os resultados obtidos.

A Taiane Alves da Silva, por ser incansável no campo e no laboratório e pela paciência ao ensinar lidar com equipamentos e softwares.

Ao professor Dr. Raphael Tapajós e ao professor Dr. José Mauro Sousa de Moura do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia, pelo empréstimo de equipamentos e materiais.

A professora Dra Iracenir Andrade dos Santos pela acolhida, pelos valiosos conhecimentos transmitidos e pelo apoio na instalação do experimento para avaliar a vida no solo, em campo.

Ao Relionan Pimentel Leal (Embrapa Amazônia Oriental) pela parceria e contribuições no capítulo 5.

Aos membros da banca examinadora pelas valorosas contribuições.

A todos que direta ou indiretamente incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

A jornada do doutorado, realmente, é árdua, mas, de fato, o maior ganho que se pode extrair desse tempo é a evolução obtida com o “processo”. A lagarta não precisa de um milagre para virar borboleta, ela precisa de um processo. Sou extremamente grata à Deus por essa jornada que está se findando.

“porque o Poderoso fez grandes coisas em meu favor. Santo é o seu nome!”

Lucas 1.49

RESUMO GERAL

O incentivo a pecuária foi uma das estratégias com o objetivo de integração da Amazônia, atraindo empreendedores para a região na época do governo militar (1964-1985). Áreas extensas desflorestadas, manejo de pastagens muitas vezes inadequados, deixaram ao longo dos anos um passivo ambiental com baixo rendimento do rebanho e indicadores fortes de degradação do solo. Para garantir a manutenção da produção de proteína animal vem sendo testados diferentes arranjos em sistema de pecuária integrada. A incorporação do componente arbóreo na propriedade rural tem apontado diferentes indicadores de sustentabilidade, por exemplo, econômico, social e ambiental, os quais prestam serviços ambientais de provisão, regulação, cultural e ambiental. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar os indicadores de sustentabilidade em uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) em um sistema silvipastoril da Amazônia brasileira. A URT foi instalada em 2010 contendo três talhões homogêneos, composto pelas seguintes espécies florestais: *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, *Khaya grandifoliola*, intercalados com talhões de pastagem a pleno sol (*Panicum maximum* cv. Mombaça), manejados nos primeiros quatro anos. Entre os indicadores observados, verificou-se com auxílio da termografia no infravermelho próximo que houve correlação positiva e direta com as variáveis dendrométricas, indicando que no sistema silvipastoril houve maior aneleração térmica no talhão com a *K. grandifoliola* ao comparar com os valores diagnosticados nas pastagens à pleno sol, prestando assim um serviço ambiental de regulação térmica no sistema. Qualidade ambiental microclimática pode ser explicada pela maior presença dos bovinos nos talhões com as espécies arbóreas nos horários de intensa radiação solar, indicando maior conforto térmico aos animais. Verificou-se que os talhões com cultivo integrado de *B. excelsa* + pasto e *K. grandifoliola* + pasto foram as maiores atenuadoras da emissão de CO₂ para a atmosfera. Foram confirmadas que as maiores emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) ocorrem nas áreas com pastagem em via de degradação, inclusive com intensificação no período mais chuvoso, sendo os fluxos de CH₄ mais expressivos nos talhões com pastagem degradada e na integração com *K. grandifoliola*. Um indicador de sustentabilidade do sistema integrado é que o componente arbóreo reduziu as emissões de GEE ao longo de 10 anos com a presença no sistema. A parceria produtor rural, pesquisadores e estudantes aponta alto potencial de consolidação de uma agropecuária sustentável na Amazônia. A presença de duas espécies nativas e uma exótica sinaliza que as áreas com pecuárias degradadas na Amazônia podem ser convertidas em sistemas de produção com maior valor agregado no mercado, pois a *B. excelsa* e *D. odorata* além de reduzirem as emissões de

GEE apresentam alto potencial bioeconômico dessas espécies nativas da região, associados aos benefícios da *K. grandifoliola* no sistema silvipastoril. As evidências dos benefícios do sistema de produção pecuária foram também expressas por indicadores no solo e biofísicos pelo componente arbóreo, a partir de informações extraídas do índice de vegetação normalizada (NDVI). Conclui-se que o sistema silvipastoril aponta indicadores passíveis de monitoramento e rastreabilidade no sistema solo-planta-atmosfera na Amazônia.

Palavras-chave: pecuária sustentável; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; pastagens; conforto térmico; *Panicum maximum*.

GENERAL ABSTRACT

Incentives for livestock production was one of the strategies for integrating the Amazon, which attracted entrepreneurs to the region during the Brazilian military government period (1964-1985). However, extensive deforestation and inadequate pasture management over the years have resulted in environmental liabilities, low livestock yields, and significant evidences of soil degradation. Several arrangements in integrated livestock systems have been tested to ensure the maintenance of animal protein production. The incorporation of tree components into rural properties has provided several economic, social, and environmental sustainability indicators, which are used to assess provision, regulation, cultural, and environmental services. The objective of this work was to evaluate sustainability indicators of a silvopastoral system in a Technological Reference Unit (TRU). The TRU was established in 2010 containing three homogeneous parcels composed of forest species (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, and *Khaya grandifoliola*) interspersed with parcels with pasture (*Panicum maximum* cv. Mombaça) in full sun. The results of the near-infrared thermography showed a positive and direct correlation with dendrometric variables, denoting a higher thermal insulation in the area with *K. grandifoliola* compared to that in the pastures in full sun, thus providing an environmental service of thermal regulation in the silvopastoral system. The microclimate environmental quality in this system is shown by the greater number of cattle in plots with tree species during times of intense solar radiation, denoting greater thermal comfort for the animals. The integrated system areas with *B. excelsa* + pasture and *K. grandifoliola* + pasture were better mitigators of CO₂ emissions to the atmosphere. The areas with degraded pasture showed the highest greenhouse gas (GHG) emissions, which were intensified during the rainy season; CH₄ fluxes were higher in areas with degraded pasture and *K. grandifoliola* + pasture. The presence of tree components reduced GHG emissions over the 10 years of integrated system implementation, which is an indicator of the sustainability of these integrated systems. The partnership between farmers and researchers contributes to the consolidation of a sustainable agriculture in the Amazon. The results of these silvopastoral systems with two native tree species and one exotic species showed that degraded pasture areas in the Amazon can be converted into production systems with high added value, as the native species *B. excelsa* and *D. odorata* reduce GHG emissions and have high bioeconomic potential, and *K. grandifoliola* benefits silvopastoral systems. The benefits of livestock production in silvopastoral systems were shown by soil indicators and by biophysical indicators of the tree components, based on normalized difference vegetation indices (NDVI). Therefore, the silvopastoral system provides

indicators with potential for monitoring and traceability in in the soil-plant-atmosphere system in the Amazon.

Keywords: sustainable livestock farming; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; pastures; thermal comfort; *Panicum maximum*.

LISTA DE CAPÍTULOS

Desta tese foram extraídos quatro artigos e um capítulo de livro:

1. FERREIRA, A. C. T.; BELDINI, T. P.; GAMA, J. R. V.; MARTORANO, L. G. Sistema silvipastoril no contexto da produção pecuária sustentável na Amazônia. *In: MELO, S.; BRASILEIRO, T. S. A. (Org.). **Sociedade, Natureza e Desenvolvimento na Amazônia**. 2. ed. Santarém, UFOPA, EDITORA CRV, 2020. p. 205-236.*
2. CÂNDIDO, A. C. T. F.; GUERREIRO MARTORANO, L.; CÂNDIDO, B.U.F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C.T.D.S.; LISBOA, L.S.S.; FERNANDES, P.C.C.; SILVA, A.R.; DIAS-FILHO, M.B.; BELDINI, T.P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. *Forests* **2023**, *14*, 1463. <https://doi.org/10.3390/f14071463>
3. CÂNDIDO, A.C.T.F.; DA SILVA, T.A.; CÂNDIDO, B.U.F.; TAPAJÓS, R.; CHAVES, S.S.N.F.; SILVA, A.R.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C.T.D.S.; FERNANDES, P.C.C.; DIAS-FILHO, M.B.; LISBOA, L. S. S.; ALMEIDA, R. G.; MOURA, J. M. S.; BELDINI, T. P.; MARTORANO, L. G. Carbon and Methane as Indicators of Environmental Efficiency of a Silvopastoral System in Eastern Amazon, Brazil. *Sustainability* **2024**, *16*, 2547. <https://doi.org/10.3390/su16062547>
4. CÂNDIDO, A. C. T. F.; CHAVES, S. S. N. F.; SILVA, A. R.; CÂNDIDO, B.U.F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C. T. S.; BELDINI, T. P.; MARTORANO, L. G. Indicadores de sustentabilidade expressos em atributos do solo sob sistema silvipastoril no oeste da Amazônia, Brazil. *Geoderma* (em avaliação por pares).
5. CÂNDIDO, A. C. T. F.; LEAL, R. P.; CÂNDIDO, B.U.F.; DE MORAES, J. R. S. C.; LISBOA, L. S. S.; DIAS, C.T.D.S.; MARTORANO, L. G. Índice de vegetação normalizada associado ao processo evolutivo de componentes arbóreos em sistema silvipastoril na Amazônia Oriental, Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)* (a submeter).

Todos os capítulos estão apresentados com seu conteúdo original, ressalvadas algumas divergências entre a versão em inglês e as versões traduzidas.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
Objetivos específicos	20
CAPÍTULO I - Sistema silvipastoril no contexto da produção pecuária sustentável na Amazônia	21
1.1 Introdução	21
1.2 Pecuária na Amazônia.....	22
1.3 Sistema silvipastoril	24
2. Metodologia	25
3. Resultados e discussão	25
3.1 Indicadores do Sistema silvipastoril.....	28
3.1.1 Indicadores de baixa emissão de carbono	28
3.1.2 Indicadores térmico-hídricos.....	32
3.1.3 A integração Lavoura, Pecuária e Floresta (ILPF).....	33
3.1.4 Indicadores agrônômicos da ILPF.....	35
3.2 Exemplo de ILPF na Amazônia	37
4. Conclusão.....	39
CAPÍTULO II – Condições térmicas de pastagens em sistema silvipastoril e a pleno sol, diagnosticadas por termografia infravermelho, na Amazônia Oriental, Brasil	48
2.1. Introdução	49
2.2. Material e Métodos.....	53
2.2.1. Área de estudo.....	53
2.2.2. Histórico da área.....	54
2.2.3. Desenho experimental	56
2.2.4. Amostragem das áreas.....	56
2.2.5. Mensurações dendrométricas	56
2.2.6. Termografia no infravermelho próximo.....	58
2.2.7. Análise estatística.....	59
2.3. Resultados	60
2.3.1. Resultados da ACP 1 - dap light e os dados de termografia	60
2.3.1. Resultados da ACP 2 – variáveis dendrométricas e temperatura nos alvos analisados	64
2.4. Discussão.....	68
2.4.1. ACP 1 – lacuna de luz e temperatura nos alvos analisados.....	68
2.4.2. Resultados da ACP 2 – variáveis dendrométricas e os dados de termografia.....	70
2.5. Conclusão.....	72
Referências	73

CAPÍTULO III - Carbono e metano como indicadores de eficiência ambiental em Sistema de Integração Pecuária-Floresta no oeste da Amazônia, Brasil	81
3.1. Introdução	82
3.2. Material e Métodos.....	84
3.2.1. Área de estudo.....	84
3.2.2. Parcela experimental	85
3.2.3. Características das áreas.....	87
3.2.4. Amostragem de concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	88
3.2.5. Análise das medidas de fluxo de CO ₂ and CH ₄	91
3.2.6. Análise estatística.....	92
3.3. Resultados	92
3.3.1. Influência da área na concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	92
3.3.2. Influência da época na concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	96
3.3.3. Interação entre área e época na concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	99
3.3.4. Análise de componentes principais (ACP).....	100
3. 4. Discussão.....	103
3.4.1. Influência da área na concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	103
3.4.2. Influência da época na concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	104
3.4.3. Interação entre área e época na concentração e fluxo de CO ₂ e CH ₄	105
3.4.3. Análise de componentes principais (ACP).....	105
3.5. Conclusões	106
CAPÍTULO IV - Indicadores de sustentabilidade expressos em atributos do solo sob sistema silvipastoril no oeste da Amazônia, Brasil	113
4.1. Introdução	114
4.1. Material e métodos.....	117
4.2.1 Área de estudo.....	117
4.2.2. Histórico de uso das áreas de estudo.....	118
4.2.2. Coleta das amostras de solo	120
4.2.3. Cálculo do estoque de carbono no solo.....	121
4.2.4. Análise dos dados.....	121
4.3. Resultados e discussão	123
4.3.1. Caracterização granulométrica e atributos químicos do solo.....	123
4.3.2. Densidade e Carbono no solo.....	130
4.4. Conclusão.....	137
Referências.....	138

CAPÍTULO V – Índice de vegetação normalizada associado ao processo evolutivo de componentes arbóreos em sistema silvipastoril na Amazônia Oriental, Brasil.....	144
5.1. Introdução	145
5.2. Material e métodos	146
5.2.1. Análise estatística.....	150
5.3. Resultados e discussão	150
5.4. Conclusão.....	155
Referências	156
CONCLUSÃO GERAL	159
Referências	160

INTRODUÇÃO GERAL

Os sistemas de produção agrícola variam em termos de intensidade de utilização dos recursos naturais, causando muitas vezes impactos ambientais drásticos como a degradação do solo pelo uso de forma inadequada. Entre estes sistemas, a criação de ruminantes tem sido criticada por indicadores negativos como as emissões de gases de efeito estufa (GEE), sobrepastoreio, degradação dos solos, perda de biodiversidade, inclusive com forte contribuição do efeito antrópico nas alterações climáticas globais (Beauchemin et al., 2020). Ao mesmo tempo, vale ressaltar que os ruminantes são altamente eficientes na conversão de celulose em proteína animal (Adegbeye et al., 2024).

Regiões como África, América Latina e certas nações asiáticas abrigam os maiores rebanhos globais de ruminantes (Balehegn et al., 2021). A maioria destas regiões enquadra-se em zonas tropicais e subtropicais caracterizadas por sistemas de produção extensivos ou baseados em pastagens. Estas regiões enfrentam frequentemente desafios como o estresse térmico, a baixa pluviosidade, as pastagens degradadas, o fraco valor nutricional das forragens, as elevadas emissões de GEE, principalmente em decorrência do metano pelo processo de ruminação, além do número excessivo de animais criados de forma extensiva com baixa produtividade. Apesar destes desafios, espera-se que estas regiões aumentem a produção pecuária. Assim, existe uma necessidade premente de adotar práticas que possam ajudar os agricultores a manter a produção e ao mesmo tempo adaptarem-se às alterações climáticas (Adegbeye et al., 2024).

Entre as estratégias de manejo, vem sendo testados diferentes sistemas integrados, entre eles o sistema silvipastoril. Com base em estudos climáticos, a avaliação de outras variáveis pode melhorar a adaptação, o bem-estar animal, a produtividade e a eficiência dos recursos, incluindo a utilização da terra (Balehegn et al., 2020; Adegbeye et al., 2020). É uma prática integrativa e holística de gestão da terra que tem grande potencial em reduzir a degradação da paisagem e o impacto ambiental das explorações agrícolas (Zhu et al., 2020; Plieninger et al., 2021; Nair et al., 2022). O sistema silvipastoril é uma das modalidades de integração lavoura pecuária floresta (ILPF), sendo o sistema de produção que integra os componentes pecuário (forrageiro e animal) e florestal, em consórcio (Kluthcouski et al., 2015).

A partir de uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) em ILPF, implantado em 2010 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em parceria com a Fazenda Nossa Senhora Aparecida, propriedade particular, no município de Mojuí dos Campos

– Pará, Brasil, em 7 ha, com espécies florestais que foram plantadas em três talhões separadamente, sendo com Castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K), Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) e Mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC), com histórico de pastagem (a partir de 1996), por meio de medições periódicas nos componentes arbóreos, no ar e no solo, no período de 2018 a 2020, este estudo pretende responder a seguinte questão: *as características de sistema silvipastoril, implantado no oeste da Amazônia, Brasil, apontaram indicadores de sustentabilidade em comparação com pastagem a pleno sol?*

O sistema integrado silvipastoril é uma solução abrangente para desafios contemporâneos da agropecuária e surgiu como uma alternativa promissora para conciliar as demandas da sociedade que busca trabalhar com sistemas conservacionistas para apontar indicadores de sustentabilidade com redução na pressão ao desflorestamento na região. Ao integrar o componente arbóreo ao sistema, pastagens e animais em um mesmo espaço, o sistema silvipastoril oferece benefícios comprovados em diversos âmbitos. Esse estudo, com sistema silvipastoril na Amazônia, contempla o tripé estrutural do Programa de Pós Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND), atendendo demandas da sociedade, da natureza e do desenvolvimento.

No âmbito da sociedade, esse estudo está diretamente relacionado a uma propriedade rural privada, que pode ser utilizada como modelo na implantação do sistema em outras propriedades, possibilitando nessas áreas aumento da produtividade e renda: sistema silvipastoril proporciona intensificação da produção agropecuária, otimizando o uso da terra e diversificando as fontes de renda. A diversificação com espécies arbóreas de valor comercial, como madeira e frutos, complementa a renda dos produtores rurais, reduzindo a dependência financeira da pecuária.

No âmbito do desenvolvimento, o sistema silvipastoril pode proporcionar segurança alimentar e nutricional aos animais: A integração de árvores no sistema contribui para a diversificação da produção de alimentos, incluindo frutas, castanhas e outros produtos nutritivos. Isso pode auxiliar no combate à fome e à desnutrição, especialmente em áreas com alta vulnerabilidade social. Pode proporcionar também geração de emprego e renda, com a demanda de mão de obra qualificada para o manejo adequado das árvores, pastagens e animais, impulsionando a geração de emprego e renda no campo, além da fixação do homem no campo: A diversificação das atividades e a melhoria na qualidade de vida proporcionadas pelo sistema silvipastoril podem contribuir para a fixação do homem no campo, combatendo o êxodo rural e fortalecendo as comunidades locais.

Na questão ambiental, o sistema proporciona conservação da biodiversidade: promove a recuperação de áreas degradadas, aumentando a cobertura vegetal e a conectividade entre habitats. Isso contribui para a preservação da biodiversidade, protegendo espécies ameaçadas e promovendo o equilíbrio ecológico; sequestro de carbono: As árvores presentes no sistema absorvem e armazenam grandes quantidades de carbono da atmosfera, atuando na mitigação das mudanças climáticas; proteção do solo: A cobertura vegetal proporcionada pelas árvores protege o solo contra erosão, compactação e perda de nutrientes, preservando a fertilidade do solo e a qualidade da água; melhoria da qualidade da água: As raízes das árvores filtram a água, reduzindo a contaminação por nutrientes e sedimentos. Além disso, a cobertura vegetal ajuda a regular o fluxo de água, diminuindo o risco de inundações e deslizamentos de terra.

O sistema integrado silvipastoril é apontado como uma solução abrangente para os desafios da agropecuária moderna, conciliando demandas socioeconômicas, preservação ambiental e desenvolvimento sustentável. Através da integração de árvores, pastagens e animais, o sistema silvipastoril oferece benefícios comprovados para produtores rurais, comunidades locais e o meio ambiente.

A estrutura da Tese consiste em cinco capítulos. O capítulo I consta um capítulo com revisão da literatura científica referente ao sistema silvipastoril. No capítulo II, o foco são os indicadores térmicos, relacionando com os atributos de cada espécie florestal implantada. No capítulo III, avaliou-se as emissões de gases do efeito estufa. No capítulo IV, buscou-se identificar a relação do solo com cada espécie, quanto aos seus atributos físicos e químicos e no capítulo V, caracterizou-se o NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada, em inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) de cada área onde se quantificou a densidade da vegetação usando dados de sensor de satélite.

Objetivo geral

Avaliar os indicadores de sustentabilidade em uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) em sistema silvipastoril na Amazônia.

Objetivos específicos

- 1) Avaliar indicadores térmicos, relacionando com as características dendrométricas de cada espécie florestal implantada.
- 2) Avaliar as emissões de gases do efeito estufa nas áreas de sistema integrado e áreas de interesse ao entorno.
- 3) Identificar a relação do solo com cada plantio, quanto a seus atributos físicos e químicos.
- 4) Caracterizar o NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada) de cada área e quantificar a densidade da vegetação, determinando o acúmulo de biomassa das culturas.

CAPÍTULO I - Sistema silvipastoril no contexto da produção pecuária sustentável na Amazônia¹

1.1 Introdução

Os prognósticos da Organização das Nações Unidas (ONU) apontaram que o mundo necessitará aumentar a produção de alimentos em mais de 70% para atender a demanda alimentar da população estimada em 9,6 bilhões de pessoas em cenário para 2050 (ONU, 2013). A verticalização da produção de alimentos nos trópicos e otimização do uso das áreas agrícolas vem sendo apontada como algumas das estratégias para aumento da produtividade na agropecuária (PEREIRA *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2016).

A pecuária, em especial a bovinocultura de corte brasileira, destaca-se no mercado mundial por apresentar o primeiro rebanho para fins comerciais, com aproximadamente 218 milhões de cabeças (IBGE, 2016), levando o país à condição de maior exportador de carne (DE CARVALHO; DE ZEN, 2017), com amplas possibilidades de crescimento em termos de terras ainda disponíveis, de acordo com a legislação nacional, e de melhoria nos processos produtivos. Essa posição gera certo desconforto para outros atores do mercado internacional da carne bovina, que sofreram restrições em decorrência de barreiras não tarifárias ao produto brasileiro, ainda no início da década de 2000 (BENDER; ALVIM, 2008).

Embargos à carne com origem no Brasil, anteriormente somente relacionados a barreiras sanitárias, passaram, com novos regulamentos europeus, também ser considerados no contexto ambiental, devido ao desmatamento, principalmente na Amazônia, além da baixa capacidade de suporte do rebanho nos sistemas pecuários que influenciam nas elevações das taxas emissão de gases do efeito estufa – GEE (PITELLI, 2004; STEINFELD *et al.* 2006; ASHMEAD, 2008).

Nesse contexto, a produção agropecuária na região Norte do Brasil é foco de grande preocupação ambiental, no país e no mundo. Busca-se garantir a preservação e a conservação de florestas nativas e aumento da eficiência e eficácia nas áreas cultivadas na Amazônia.

¹ Trabalho publicado em: FERREIRA, A. C. T.; BELDINI, T. P.; GAMA, J. R. V.; MARTORANO, L. G. Sistema silvipastoril no contexto da produção pecuária sustentável na Amazônia. In: MELO, S.; BRASILEIRO, T. S. A. (Org.). **Sociedade, Natureza e Desenvolvimento na Amazônia**. 2. ed. Santarém, UFOPA, EDITORA CRV, 2020. p. 205-236.

Atualmente, avanços ambientais na agropecuária brasileira, relacionados à evolução tecnológica tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas de produção mais sustentáveis, baseados na agricultura conservacionista (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2018), na agricultura de baixo carbono (ABC) (MANZATTO *et al.*, 2018) e em sistemas integrados de produção, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (VILELA *et al.*, 2012), a integração lavoura-pecuária (ILP), e a integração lavoura-floresta (ILF) ou sistema silvipastoril (MARTHA JUNIOR; ALVES; CONTINI, 2011).

A intensificação dos sistemas de produção pecuária é apontada como uma das alternativas de desenvolvimento sustentável, minimizando a pressão sobre a abertura de novas áreas para produção agropecuária (BARCELLOS *et al.*, 2008). Essa ação, entretanto, deverá ser pautada pelo uso eficiente dos recursos físicos, incluindo a recuperação de áreas antropizadas e degradadas, calcada no aporte de conhecimento e de tecnologias poupadoras de insumos. Objetivou-se neste capítulo avaliar a consolidação de sistema silvipastoril como estratégia de pecuária sustentável na Amazônia.

1.2 Pecuária na Amazônia

Na última década, a pecuária na Amazônia tem contribuído fortemente com o avanço expansionista da produção animal no Brasil, o rebanho de bovinos da Amazônia Legal representa 36,95 % do efetivo nacional (NEVES, 2017). O crescimento da pecuária na Amazônia, na década passada, representou 85% do crescimento do rebanho nacional. No entanto, a expressividade da pecuária no bioma amazônico recebe fortes críticas pelo seu papel no desmatamento (MORTON *et al.*, 2006) e a partir das discussões globais sobre a liberação de gases de efeito estufa via desmatamento na Amazônia (MOUTINHO, 2006).

O Brasil é referência no que se refere a carne bovina, oriunda de grandes áreas para o cultivo extensivo de forragens (RIBEIRO-JÚNIOR *et al.*, 2017), mas a baixa produtividade e, conseqüentemente os baixos índices zootécnicos são fatores que comprometem o desempenho quando comparados a outros países exportadores de carne bovina no mundo (CAVALLINI *et al.*, 2010, PARIZ *et al.*, 2011; MONTANARI *et al.*, 2013). Estimou-se que 89% da produção foram criados exclusivamente em pastagens naturais ou plantadas, cobrindo cerca de 172 milhões de ha e aproximadamente 85% dessa área é pastagem do gênero *Brachiaria* (LEAL *et al.*, 2016).

Na região amazônica, a utilização exclusiva de pastagens na pecuária favorece o empobrecimento dos solos e após alguns anos de perda constante de nutrientes ocorre a degradação das pastagens, com propagação de plantas daninhas e conseqüente pressão de

desmatamento de novas áreas, que queimadas produzem pastagens de qualidade nos anos iniciais, mas com prejuízo evidente no médio prazo para os solos e o sistema produtivo (MINERVINO; CARDOSO; ORTOLANI, 2008).

Calcula-se que 50% das pastagens na Amazônia estão degradadas ou em processo de degradação (DIAS-FILHO, 2011). O ciclo de pastagens formadas sob método tradicional de corte e queima da floresta está bem esclarecido (VEIGA; TOURRAND, 2001), os primeiros cinco anos, após a formação, da pastagem são adequados para atender as necessidades dos animais e mantêm satisfatório volume de massa foliar, a partir de então, começa a perda gradual de produtividade e vigor, perda de cobertura vegetal e aparecimento e predomínio de plantas daninhas.

A pastagem entra em processo de degradação por conta de manejo inadequado, com altas cargas de animais e tempo de repouso incorreto, inviabilizando a recuperação do pastejo e pisoteio, falta de manutenção da pastagem e do solo, pragas e doenças e falta de adubação corretiva. Segundo Dias-Filho (2011), uma pastagem pode ser considerada degradada dentro de um universo relativamente amplo de condições, situadas entre dois extremos de produtividade agrônômica e biológica.

A utilização de tecnologias apropriadas e voltadas à manutenção/recuperação das pastagens conduz ao aumento de produtividade com impactos ambientais e sociais. Inovações Ambientais na condução de pastagens podem permitir aumento na produção sem necessidade de abertura de novas áreas, diminuindo a pressão de desmatamento. Pelo lado social, espera-se aumento na oferta de alimentos para atender à crescente demanda fruto da expansão demográfica e da renda de diversos países, principalmente dos emergentes (SANTO; ALVES; TRECENTI, 2013).

De acordo com Araújo e Ponte (2011), os processos produtivos adotados na região, como pecuária e monoculturas precisam ser revistos, uma vez que se constituem em agentes de desmatamento de extensas áreas, acarretando em efeitos indesejáveis diversos sobre a Amazônia.

A produção agropecuária paraense, no complexo Santarém, Mojuí dos Campos e Belterra, no Baixo Amazonas, concentra-se, basicamente na cadeia produtiva de carne, onde os animais são criados a pasto em sistemas extensivos (NEVES, 2017). O problema de perdas de extensas áreas cultivadas com pastagens está associado, principalmente, ao baixo investimento anual em melhoria e renovação das plantas forrageiras, podendo causar a degradação do solo, em decorrência do pisoteio e períodos prolongados de estiagens (VALÉRIO *et al.*, 2000; VALLE *et al.*, 2000).

Sistemas como ILPF apontam indicadores de sustentabilidade, como redução da densidade do solo, aumento dos estoques anuais de carbono (CHAVES, 2014), produção de biomassa florestal e forrageiras, além de conforto ambiental aos animais (GIRO *et al.*, 2019), apresentando-se como um sistema com amplas possibilidades e vantagens para a região.

1.3 Sistema silvipastoril

A integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril é um sistema de produção que integra o componente pecuário (pastagem e animal) e florestal, em consórcio. Neste sistema, as árvores são plantadas nas áreas das pastagens que foram recuperadas ou renovadas. Nos primeiros anos, a forrageira poderá ser utilizada para a produção de feno ou silagem até o estabelecimento do componente arbóreo, evitando que o mesmo seja danificado pelos animais. O pecuarista poderá usar o consórcio ou a rotação de culturas graníferas com forrageiras, visando implantar pastagens ou recuperá-las, se elas estiverem degradadas. Ele também poderá implantar o Sistema Silvipastoril, visando a explorar produtos madeireiros e não madeireiros, além dos produtos da pecuária.

Dependendo do tamanho da área, pode-se utilizar cerca elétrica, permitindo que os animais utilizem a área já no primeiro ano. A partir do segundo ano da implantação da floresta, a forrageira poderá ser utilizada em pastejo, especialmente por categorias de animais jovens. O sistema silvipastoril é um método eficiente para a criação de animais como bovinos e pequenos ruminantes e proporciona um ambiente térmico mais confortável e condições menos estressantes (CAETANO; CAETANO JUNIOR, 2015).

Em geral, a produção animal tende a ser maior em sistemas de ILPF com presença do componente arbóreo, devido ao melhor valor nutritivo da forrageira e ao maior conforto térmico dos animais que o sombreamento proporciona. Com isso, espera-se melhor desempenho relativo com animais de maior exigência e produtividade, desde que se mantenha a oferta de forragem desejável e se atendam as demandas por água e minerais, com o manejo sanitário e do pasto adequados. Nesse sentido, o produtor pode contar com animais terminados em menor tempo e com melhor qualidade de carne. No entanto, a produção por área pode ser diminuída, em sistemas com maiores densidades de árvores, onde o sombreamento excessivo prejudica a produção do pasto e, conseqüentemente, a produção de carne.

Conforme Gómez *et al.* (2013), a presença de árvores nas pastagens pode ser prejudicial ou favorável, dependendo de fatores como a tolerância das espécies ao sombreamento, a quantidade de sombreamento fornecida pelas árvores e a competição entre plantas por água e nutrientes do solo. A organização das linhas das árvores permite mais ou menos penetração de

luz, resultando em modificação da composição microclima de sistemas silvipastoris (TONINI *et al.*, 2019).

O sistema silvipastoril é dinâmico e complexo, pois envolve a integração de elementos de diferentes aspectos (BALBINO *et al.*, 2011) e é considerado um componente florestal de alto investimento, cujos resultados são obtidos a longo prazo (KICHEL *et al.*, 2014). Portanto, a seleção de espécies e seu material genético são pontos importantes elementos a serem considerados para o sucesso desse sistema.

Nos sistemas silvipastoris, em geral, são adotados arranjos do componente arbóreo no sentido leste - oeste, para permitir maior penetração de luz entre as linhas de árvores, beneficiando as forrageiras no consórcio. Com a utilização de espécies florestais e forrageiras adequadas, a arborização de pastagens, pode aumentar a produção e a qualidade das forrageiras e melhorar o desempenho dos animais em ganho de peso, lactação, sanidade e reprodução além de gerar renda pela produção dos multiprodutos florestais como lenha, postes, mourões, lascas, toras, entre outros benefícios socioambientais (MACEDO *et al.*, 2012).

Para escolher as forrageiras, é preciso avaliar e selecionar genótipos que se adaptem a locais sombreados e ao clima da região onde se aplica o sistema. Com relação ao espaçamento entre as plantas arbóreas, este deve ser determinado a ponto de permitir que o sol penetre entre as copas das árvores e leve iluminação solar até o dossel da forrageira. Em estudo realizado numa área em Alegrete/RS, os espaçamentos de 3 m x 1,5 m x 14 m, proporcionaram 30% de luminosidade e 3 m x 1,5 m x 34 m proporcionaram 65% de luminosidade para a forrageira, numa média para eucalipto e pinus (VARELLA *et al.*, 2016).

2. Metodologia

Fez-se um estudo referente aos sistemas silvipastoris implantados, o qual discorre sobre uma revisão de periódicos para a construção de resultados que enfatize a realidade brasileira. A busca do material bibliográfico ocorreu nos meses de abril e maio de 2020, nos periódicos do portal da Capes e nas plataformas SciELO, Scopus, Science Direct com idiomas em português, espanhol e inglês, os trabalhos foram publicados de 2015 a maio de 2020.

A realização da leitura ocorreu de forma paralela à busca dos artigos, sendo efetivada desse modo a seleção dos trabalhos com os critérios de interesse ao estudo.

3. Resultados e discussão

Os componentes florestal, forrageira e animal utilizados nos sistemas silvipastoris implantados com resultados técnico-científicos no Brasil divulgados em periódicos nos últimos

cinco (05) anos foram sintetizados, apresentando os principais temas pesquisados na Tabela 1, evidenciando-se a adoção dos sistemas silvipastoris em diferentes regiões brasileiras.

Tabela 1. Componentes florestal, forrageiro e animal dos sistemas silvipastoris estudados no Brasil de 2015 a 2020.

Espécie florestal	Forrageira	Animal
Eucalipto; Teca, Mogno; Andiroba; Jenipapo; Leucena; Angico-branco; Canafístula; Ipê, Jequitibá; Pau-jacaré; Inhanduvá; Mutambo; Grevílea; Angico-vermelho; Babaçu; Louro-pardo; Sabiá, Gliricídia; Seringueira; Acácia; Pequi; Floresta nativa; Leguminosas arbóreas	<i>Brachiaria brizantha</i> cv. marandu, Mombaça; <i>Brachiaria</i> cv. piatã; <i>Panicum</i> cv. massai; <i>Panicum</i> cv. aruana; <i>Brachiaria decumbens</i> ; Capim andropógon; Capim colônia; Capim tifton 85; Capim-marmelada; Estilosantes; Azevém; Malícia; Lablab; <i>Arachis</i> , <i>Calopogonio</i> ; <i>Centrosema</i> ; <i>Clitoria</i> ; <i>Alysicarpus</i> ; <i>Puerária</i> ; <i>Cynodon lectostachyus</i> ; Aveia preta; Aveia branca; Kudzu tropical, <i>Macrotiloma</i> ; <i>Missioneira-gigante</i>	Bovinos de corte Bovino de leite Ovinos Caprinos
Objeto de estudo	Avaliações de indicadores de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em cenários de mudança climática; Florística; Fitossociologia; Crescimento e desenvolvimento arbóreo; Comportamento e desempenho animal; Comportamento ingestivo e reprodutivo; Atributos físicos do solo; Produtividade de forrageira; Densidade de perfilhos; Valor nutritivo do capim; Qualidade, composição química, frequência de corte e massa da forragem, Composição morfológica; atenuação da radiação solar, avaliações microclimáticas; biofísicas; conforto térmico; Composição botânica; testes de vulnerabilidade de componentes arbóreos; análise morfológica de forrageiras; composição da macrofauna; diversidade e abundância de bactérias; assimilação de CO ₂ ; Balanço de carbono; equações volumétricas; degradação ruminal; danos causados pelo gado; incremento florestal e dendrometria	

Fonte: Autores (2020).

Na Tabela 2 foram listadas referências bibliográficas onde fez-se um levantamento dos principais benefícios e serviços ambientais atribuídos a implantação do sistema silvipastoril ou conversão de um sistema de pecuária extensiva para o sistema silvipastoril, com destaque para os ciclos da água, do carbono, dos nutrientes, balanço de energia, biodiversidade, além dos benefícios econômicos e sociais.

Tabela 2. Principais ciclos, benefícios e fontes identificados a partir da adoção do sistema silvipastoril no Brasil publicados entre 2015 a 2020.

Ciclos	n°	Benefícios obtidos com a adoção do sistema silvipastoril	Fontes
Carbono	1	Acréscimo de carbono fixado no solo.	Siqueira Neto <i>et al.</i> , 2017
	2	Melhora do microclima.	Bosi <i>et al.</i> , 2020
	3	Melhoria do bem-estar animal.	Giro <i>et al.</i> , 2019
	4	Função de quebra-vento.	Resende, 2016
	5	Menor velocidade de escoamento superficial da água da chuva.	Dalposso <i>et al.</i> , 2018
Água	6	Maior taxa de infiltração de água no solo.	Bosi <i>et al.</i> , 2020
	7	Diminuição da temperatura.	Giro <i>et al.</i> , 2019
	8	Menor taxa de evapotranspiração de água no solo.	Resende, 2016
	9	Maior disponibilidade de água para as plantas.	Miccolis, 2016
	10	Aumento da recarga do lençol freático, fortalecendo as nascentes.	Resende, 2016
Solo e nutrientes	11	Conservação do solo (redução da compactação e da erosão).	Embrapa, 2019
	12, 13	Melhora da matéria orgânica no solo. Melhora da disponibilidade de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg).	Bungenstab <i>et al.</i> , 2019
	14,15	Favorecimento da microbiologia do solo. Favorecimento da dinâmica das comunidades.	Miccolis, 2016
Balanco de energia	16	Maior produção de pastagem.	Costa <i>et al.</i> , 2015
	17	Maior eficiência produtiva do rebanho.	
	18	Menor balanço de emissões de gases de efeito estufa.	Resende, 2016
	19, 20, 21, 22	Menor uso de agrotóxicos e adubos industrializados. Menor incidência de pragas. Maior vida útil das pastagens. Melhoria na utilização dos recursos naturais pela complementaridade e pela sinergia entre os componentes vegetais e animais.	Pacheco <i>et al.</i> , 2016
	Biodiversidade	23,24	Diminuição da utilização da monocultura. Adequação ecológica das áreas dos plantios.
25		Menor demanda por áreas de expansão.	Pacheco <i>et al.</i> , 2016
26		Menor pressão sobre os biomas nativos.	Mazon <i>et al.</i> , 2018
27		Melhora do processo de polinização.	Resende, 2016
28, 29,30		Abrigo, refúgio e fonte de alimento para fauna. Melhora da biodiversidade nas áreas de produção. Redução da sazonalidade da mão de obra. Corredores de contato mais harmônicos para fauna e flora silvestres.	Pacheco <i>et al.</i> , 2016
Econômico	31	Redução dos riscos climáticos.	Cordeiro <i>et al.</i> , 2017
	32,33,34	Viável em todos os tamanhos de propriedades. Diversificação do negócio. Melhora da beleza cênica da paisagem da zona rural.	Bungenstab <i>et al.</i> , 2019
	35	Aumento da lucratividade da atividade.	Resende, 2016
	36,37,38	Maior estabilidade econômica e redução dos riscos; Maior geração de empregos diretos.	Siqueira Neto <i>et al.</i> , 2017
	39	Estímulo à melhor qualificação dos funcionários da fazenda.	Pacheco <i>et al.</i> , 2016
	40	Melhora da qualidade de vida das pessoas do local.	Embrapa, 2019
	41	Diminuição do êxodo rural.	Devide, 2019
42	Melhoria da imagem da produção agropecuária, pois concilia atividade produtiva e sustentabilidade ambiental.	Pacheco <i>et al.</i> , 2016	

Fonte: Adaptado de Resende *et al.*, 2018.

3.1 Indicadores do Sistema silvipastoril

3.1.1 Indicadores de baixa emissão de carbono

O sistema silvipastoril é uma técnica de manejo conservacionista que auxilia na manutenção da matéria orgânica no solo, na mitigação do processo erosivo das chuvas, na redução do assoreamento e poluição dos corpos hídricos além de outros bens e serviços ecossistêmicos. Sabe-se que para mitigar impactos ambientais, os sistemas de produção na região devem ser mais resilientes, as políticas públicas devem priorizar o desenvolvimento sustentável, usando os recursos naturais em benefício das populações atuais e das gerações futuras.

Nesse contexto, observa-se que os estudos apontam que a agropecuária tem contribuído no processo de emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente em pastagens com altos níveis de degradação. Reforçando que o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) tem apontado o papel das ações antrópicas perturbando os fluxos de massa e energia no sistema solo-planta-animal-atmosfera provocando mudanças climáticas (IPCC, 2013).

Os inventários nacionais de emissão de GEE têm apontado forte contribuição dos sistemas de produção nas emissões, sendo na Amazônia a maior pegada de carbono devido ao desflorestamento e queimadas na região. Em 2006, com a publicação do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de GEE, nas estimativas das emissões de CH₄ entérico e dos dejetos de animais da produção pecuária usando os pressupostos metodológicos do IPCC, ficou evidente que as instituições de pesquisa, os produtores e os gestores deveriam considerar essa problemática como tema nacional de preocupações e busca de soluções.

Reforçando que em 2008 foi lançado o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) com base nos resultados obtidos pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima. O PNMC estabeleceu reduções em 70% no desmatamento até 2017. Com a aprovação da Lei 12.187 de 2009 foi instituída a Política Nacional de Mudanças Climáticas do Brasil. Os compromissos assumidos pelo Brasil na COP15 com respeito à redução do desflorestamento na Amazônia aumentam as responsabilidades científicas em fornecer indicadores de reduções nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) frente às pressões de avanços da fronteira agrícola.

Estudos realizados por Barioni *et al.* (2011), avaliando cenários para 2025 com utilização de tecnologias apropriadas de manejo em sistemas de produção da agropecuária, verificaram que nesse sistema de manejo, se houver aumento em torno de 25% na produção de

carne, as emissões de metano serão da ordem de 3%, refletindo em uma diminuição de 18% por unidade de carne produzida nas condições de 2007.

Em termos de óxido nitroso, os dejetos de bovinos nas pastagens respondem cerca de 40% das emissões antrópicas desse gás com perdas de N pela urina, maiores do que pelas fezes. As emissões são influenciadas pela distribuição das dejeções, manejo de fertilizantes nitrogenados e por características pedológicas, sendo que o padrão de distribuição dos dejetos nas pastagens dificulta as estimativas de emissão de GEE.

Neste contexto, na Amazônia, estão sendo demandadas novas investigações científicas, compartilhando conhecimento com as cadeias produtivas para apontar indicadores capazes de demonstrar reduções nas emissões de GEE, principalmente pela agropecuária. O maior desafio na região é atender a demanda crescente por matéria prima de forma sustentável, mantendo a funcionalidade dos sistemas naturais à sociedade atual e às gerações futuras.

Esses dados no âmbito regional demandam informações de referência que permitam o estabelecimento de uma linha de base para os estados na Amazônia, objetivando o planejamento estratégico espaço-temporal para atingir metas previstas no Plano ABC – Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura.

O Plano ABC de 2012 até 2020 tem buscado mecanismos de monitoramento das ações e das reduções de emissões para garantir os compromissos assumidos pelo Brasil durante a COP-15 (MAPA; MDA, 2011). O Plano ABC constitui uma das Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas (NAMAS) estabelecidas em conformidade com as regulamentações gerais da Conferência Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC.

No estado do Pará, o Plano ABC estipulou metas em sistemas ILPF de 30.000 ha previstos para 2012/2015 e de 100.000 ha para 2016/2020. O atual Código Florestal (Lei 12.651/2012) e os pressupostos da Política Nacional de ILPF, Lei 12.805/2013 devem ser considerados nas avaliações também a expansão de novas tecnologias, bem como da mudança de paradigma de sistemas de produção agropecuária na Amazônia.

Por exemplo, no Pará as demandas do polo guseiro de Marabá são da ordem de 1,8 milhões de hectares de florestas plantadas para produção de carvão, além de demandas em Paragominas, do Polo moveleiro em MDF devem ser considerados, pois o estado possui 11 milhões de ha de pastagens (IBGE, 2006), sendo grande parte em processo de degradação.

Essas áreas podem voltar ao sistema produtivo a partir de mudança na concepção dos produtores. As ações demandam de uma conscientização da necessidade de recuperar áreas de

pastagens degradadas com baixos índices econômicos e zootécnicos, além de atender às normativas legais. A adoção de um conjunto de práticas associadas às novas tecnologias aponta evidências de produção agropecuária com sustentabilidade social, econômica e ambiental na Amazônia.

No que concerne ao desempenho econômico e ambiental dos sistemas produção, Gomes *et. al.*, (2011) propuseram modelos econômicos os quais possibilitam avaliar a eficiência do sistema de pecuária de corte pela capacidade de gerar receita com a preservação da mata nativa. Os estudos de Macedo e Zimmer (1993) já destacava que a degradação de pastagens consiste em “processo evolutivo da perda de vigor de produtividade, da capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e a qualidade exigida pelos animais” o qual culmina com “a degradação avançada dos recursos naturais em razão de manejos inadequados”.

A produção de metano pelos ruminantes varia de acordo com a quantidade e a qualidade do alimento ingerido. Geralmente, quanto maior o consumo de alimento, maior será a emissão de metano (CH_4) e, quanto melhor a qualidade da dieta, menor será a emissão por unidade de alimento ingerido (BRASIL, 2010).

De acordo com o inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa, em 2005 o setor Agropecuária contribuiu com 71% das emissões de metano (ou seja, 13.465 Gg CH_4) e 91% das emissões de óxido nitroso (N_2O), ou seja, 660 Gg N_2O . Os animais em pastagem representam a principal fonte de N_2O do país, ou seja, o equivalente a 39,4% das emissões desse gás (BRASIL, 2010).

As emissões de GEE nos sistemas de pecuária de corte estão relacionadas a vários processos, sendo que a produção de metano é parte do processo de digestão dos herbívoros ruminantes (fermentação entérica); ao passo que o manejo de dejetos de animais gera emissões tanto de CH_4 quanto de N_2O o qual também é emitido devido ao uso de esterco animal como fertilizante e decorrente da deposição sobre o solo dos dejetos de animais em pastagem.

Considerando o potencial de aquecimento global do CH_4 e do N_2O (respectivamente 21 e 310 vezes, que são superiores ao do CO_2), pode-se ter ideia do impacto da agropecuária brasileira sobre as emissões de GEE e da importância de medidas de mitigação da emissão desses gases para garantir a sustentabilidade ambiental da atividade e para que o Brasil tenha êxito nos compromissos firmados na COP-15 (redução entre 36,1 e 38,9% das emissões de GEE até 2020). Ao nível de escalas subnacionais, torna-se necessária avaliar em função de uma linha de base, afim de que se possa comparar o que foi previsto no Plano ABC com o que está sendo realizado para o período comprometido, ou seja, de 2009 até 2020.

As alterações no ambiente devido o desmatamento com queima da vegetação nativa, acompanhadas da mudança no uso do solo tem ocasionados impactos ao solo, consequentemente, ao meio ambiente, devido a emissão de gases de efeito estufa (GEE) como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (SIQUEIRA NETO *et al.*, 2009). O aumento das emissões tem sido amplamente discutido, por ser um dos principais problemas ambientais na atualidade, com intenso impacto nas mudanças climáticas globais. No Brasil, entre 2015 e 2016 ocorreu aumento de 9% nas emissões, passando para 2,27 GtCO₂ e, um aumento de 32% quando comparado ao ano de 1990, sendo relacionados principalmente as mudanças no uso da terra e a agropecuária.

A atividade agropecuária é a principal fonte de GEE no Brasil, respondendo por 74% das emissões, quase dois terços é proveniente da conversão de florestas em pastos e agricultura e o restante é proveniente das emissões diretas da agropecuária como, fermentação entérica, manejo de excretas de animais e, manejos dos solos.

Nas emissões da agropecuária, o CH₄ representa 23% das emissões líquidas, sendo emitidos principalmente pela fermentação entérica e pelo manejo de dejetos animais. O N₂O representou 12% das emissões líquidas e tem como principal fonte de adubação nitrogenada no solo, tanto por fertilizantes quanto por excretas de animais (SEEG, 2018). Apesar da emissão de N₂O ter uma contribuição menor, este se torna o mais preocupante, em virtude do seu potencial na retenção de radiação infravermelha na troposfera ser 298 vezes maior que o CO₂ e seu tempo de residência na atmosfera superior a 100 anos, enquanto o CH₄ tem potencial de aquecimento de 23 vezes e tempo de residência de 12 anos (IPCC, 2013).

Na tentativa de mitigar as emissões GEE e reduzir o impacto da agricultura, o Brasil, durante a COP 21 comprometeu-se a reduzir as emissões em 37% em relação aos níveis de 2005 até 2025, com intenção de chegar em 43% em 2030, realizando isso através de políticas públicas como o Programa ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. Para atingir tais objetivos foram estabelecidas metas, dentre elas encaixa-se a agropecuária como a recuperação adicional de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e aumentar em 5 milhões de hectares os sistemas integrados sob lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta (BRASIL, 2010).

Os sistemas integrados surgem como alternativa para intensificação da produção agropecuária de forma sustentável, pois proporcionam integração dos componentes do sistema produtivo, gerando aumento da produção de alimento, fibra e energia. Os sistemas integrados são considerados mais eficientes na ciclagem de nutrientes (SALTON *et al.*, 2014), eficiente dreno de C, corroborando para mitigação dos GEE e mudanças climáticas (LOSS *et al.*, 2013),

umentam biodiversidade da fauna (MARCHÃO *et al.*, 2009) e melhoram a qualidade do solo (SALTON *et al.*, 2014).

Além disso, a utilização de gramíneas no sistema de ILP associado com rotação ou sucessão com culturas anuais podem minimizar a degradação do solo, pelo efeito favorável dessas gramíneas nos atributos físicos do solo e pelo aumento dos estoques de C (SALTON *et al.*, 2014) e também pela redução dos GEE (BALBINO *et al.*, 2011).

Vários estudos têm sido realizados para avaliar os fluxos de CH₄, N₂O e NH₃ sob uso agrícola (NOGUEIRA *et al.*, 2015; PIVA *et al.*, 2014; SORDI *et al.*, 2014). As emissões destes gases do solo são influenciadas por vários fatores como umidade, temperatura (SIQUEIRA NETO *et al.*, 2009), características de solo e clima da região (NOGUEIRA *et al.*, 2015), preparo do solo (DIECKOW *et al.*, 2015), disponibilidade de N (MORAIS *et al.*, 2015; NOGUEIRA *et al.*, 2015), irrigação (CRUVINEL *et al.*, 2011) e adição de excretas de animais (SORDI *et al.*, 2014, TOMAZI *et al.*, 2015).

O sistema de integração Lavoura, Pecuária e Floresta (ILPF) vem sendo uma estratégia de produção com alto potencial na recuperação de áreas degradadas, por apresentar capacidade mitigadora de pressão por desflorestamento com redução de abertura por novas áreas destinada ao uso agropecuário (ASSIS *et al.*, 2015). Os diferentes arranjos com espécies florestais e cultivos anuais têm sido introduzidos na pecuária para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), promover conforto ambiental e outros indicadores de sustentabilidade em sistemas de produção (PILATO *et al.*, 2018).

3.1.2 Indicadores térmico-hídricos

A pecuária brasileira, ainda é amplamente baseada em sistemas de monocultivo de pastagens (PONTES *et al.*, 2018). O crescente interesse mundial em diversificar o uso de áreas agrícolas como estratégia para uma utilização mais sustentável da terra e dos recursos naturais é um dos fatores associados ao desenvolvimento de sistemas de produção integrados (MORAES *et al.*, 2014). O plantio de árvores pode contribuir para a segurança alimentar global, devido à sinergia estabelecida entre solo, plantas e animais na pecuária integrada (SALTON *et al.*, 2014).

A demanda por produtos de ambientes que proporcionam maior bem-estar animal aumenta a relevância do uso desse tipo de sistema (YATES *et al.*, 2007). A zona tropical, onde grande parte da produção agrícola e pecuária do mundo está estabelecida, representa um ambiente térmico desafiador para os animais (DOMICIANO *et al.*, 2016), onde, a energia gasta para manter seu equilíbrio térmico pode causar perdas significativas de produtividade.

Estudos de modelagem climática sugerem que as mudanças climáticas afetarão significativamente os sistemas baseados em pastagens devido aos efeitos diretos das altas temperaturas e da radiação solar nos animais. Estima-se que as mudanças climáticas aumentem em até 35% os custos financeiros da agricultura e pecuária (THAMO *et al.*, 2017), o que justifica o desenvolvimento de tecnologias para reduzir os efeitos do clima na produção agrícola.

A alta incidência de radiação solar em bovinos criados em áreas de pastagens não florestadas pode resultar em desconforto térmico, levando a mudanças fisiológicas e comportamentais (SCHÜTZ *et al.*, 2009). O ambiente megatermal afeta negativamente a eficiência da dissipação calórica, que depende do gradiente térmico entre a superfície corporal do animal e o meio ambiente. Assim, a temperatura elevada da superfície corporal prejudica a termorregulação do animal e pode mudar seu comportamento, aumentando sua inatividade e diminuindo o tempo de pastejo (SOUZA *et al.*, 2016).

Nesse contexto, os sistemas silvipastoris e os integrados de lavoura, pecuária e silvicultura podem ser alternativas benéficas para aumentar a produtividade (GAMARRA *et al.*, 2017) e proporcionar maior conforto térmico, fornecendo áreas de sombra aos animais (GARCIA *et al.*, 2011).

3.1.3 A integração Lavoura, Pecuária e Floresta (ILPF)

Os sistemas de produção pecuária integrado são descritos como alternativas para intensificação da produção agropecuária de forma sustentável. Esses sistemas, a exemplo da integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) apresentam estratégias de produção sustentáveis que integram, na mesma área, atividades agrícolas, pecuárias e florestais, para produção de grãos, carne ou leite, produtos madeireiros e não madeireiros, ao longo do ano (BALBINO *et al.*, 2011).

De acordo com Balbino *et al.* (2011) os sistemas integrados conforme as suas especificidades enquadram-se em quatro grandes grupos, descritos a seguir:

1. Integração Lavoura-Pecuária (ILP) ou Agropastoril: sistema de produção que integra o componente agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e em um mesmo ano agrícola ou por vários anos, em sequência ou intercalados.
2. Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril: sistema de produção que integra o componente pecuário (pastagem e animal) e florestal, em consórcio. Este sistema de produção é mais direcionado para áreas com dificuldade de implantação de lavouras, por isso, inclui apenas os componentes florestal e pecuário na mesma área.

3. Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Silviagrícola: sistema de produção que integra o componente florestal e agrícola pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas anuais ou perenes.

4. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Agrossilvipastoril: sistema de produção que integra os componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, incluindo também o componente florestal, na mesma área. O componente “lavoura” restringe-se ou não à fase inicial de implantação do componente florestal.

O sistema ILPF é uma opção de intensificação agroprodutiva e tem alto potencial na recuperação de áreas degradadas, evitando assim o desmatamento de novas áreas para o uso na agropecuária (ASSIS *et al.*, 2015). A integração lavoura e pecuária é um sistema misto de manejo integrado, caracterizado pela diversificação, rotação, consorciação ou sucessão de atividades agrícolas e pecuárias. Pelo fato do solo poder ser explorado economicamente durante o ano todo, ou pelo menos, na maior parte dele, favorece o aumento da oferta de carne, leite e grãos (KLUTHCOUSKI *et al.*, 1991), assim se torna sustentável ao longo do tempo (SANDINI *et al.*, 2011).

Estudos com diversas variações de sistemas de integração demonstram que a inclusão do componente florestal propicia benefícios de ordem ambiental e socioeconômicas, que refletem em melhoria na eficiência do uso da terra (CARVALHO *et al.*, 2001; MACEDO *et al.*, 2012; ALMEIDA; MEDEIROS, 2013; PEREIRA *et al.*, 2015).

A prática em ILPF contribui ainda para promover o sistema de plantio direto (SPD). A pastagem proporciona à lavoura um solo melhor estruturado, em função do sistema radicular abundante e do resíduo de material orgânico deixado na superfície e em subsuperfície do solo (LOSS *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2011). Esta condição tem efeito positivo sobre matéria orgânica, infiltração de água e fixação de carbono no solo e na vegetação (BOLFE *et al.*, 2012). Os sistemas ILPF tendem a apresentar condições de conforto térmico mais favorável comparado aos sistemas pecuários convencionais (CARVALHO *et al.*, 2001; PACIULLO *et al.*, 2011) e, desde que mantidas adequadas ofertas de forragem, podem promover maior produção por animal com menor emissão de metano por unidade de produto (ALMEIDA; MEDEIROS, 2013).

Estudos sobre ecossistemas de pastagens nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, considerando os estoques de carbono no solo em comparação à vegetação nativa, demonstram que, de modo geral, solos sob pastagens e sob sistemas de ILPF bem manejadas podem acumular carbono em níveis semelhantes ou superiores à vegetação nativa e que a

degradação das pastagens promove perda do carbono acumulado (CERRI *et al.*, 2006; JANTALIA *et al.*, 2006; MACEDO *et al.*, 2012).

Em 2009, na Conferência das Partes (COP15) sobre mudança do clima que ocorreu em Copenhague - Dinamarca, o Brasil se destacou com avançadas propostas voluntárias de “Ações de Mitigação Nacionalmente Adequadas” (NAMAs, da sigla em inglês), com as seguintes metas para 2020, para o “setor agropecuária”: reduções de 83 a 104 Mt de CO₂ eq com recuperação de pastagens, de 18 a 22 Mt de CO₂ eq com iLPF, de 16 a 20 Mt de CO₂ eq com plantio direto e de 16 a 20 Mt de CO₂ eq com fixação biológica de N (BRASIL, 2010).

A partir disto, em 2010, o governo brasileiro instituiu o Programa para Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Programa ABC), por meio do qual são destinados recursos para financiar práticas adequadas, tecnologias adaptadas e sistemas produtivos eficientes que contribuam para a mitigação da emissão de GEEs na agropecuária (BRASIL, 2010). Assim, os sistemas integrados de produção agropecuária podem promover diversos benefícios ao solo, plantas e animais, por explorar o sinergismo entre seus componentes. Além de maior produtividade, proporcionam incremento dos teores de matéria orgânica e maior quantidade de C orgânico e N (LOSS *et al.*, 2013).

Espécies forrageiras cultivadas na ILPF podem estar expostas a luz limitada causada pelo sombreamento dos componentes da agricultura ou da silvicultura. No entanto, esse efeito pode variar com o espaçamento e a densidade populacional da agricultura, componentes florestais e a fase de crescimento de espécies de plantas (MADDONNI *et al.*, 2001). Forrageiras do gênero *Brachiaria* são comumente usados em sistemas de iLPF devido à sua resistência à concorrência com culturas agrícolas e sua boa adaptação abaixo das árvores (PACIULLO *et al.*, 2007).

Como esse sistema no Brasil está em fase de consolidação, à exemplo na Amazônia, estudos têm buscado disponibilização de técnicas que possam aliar alternativas de economia de insumos e de mitigação de impactos ambientais, avançando rumo à sustentabilidade do sistema e com isso trazer novas alternativas para o desenvolvimento da região.

3.1.4 Indicadores agronômicos da ILPF

A produção pecuária nacional aponta baixo rendimento animal nas áreas com pastagens, principalmente em decorrência da degradação das forrageiras que reduzem o potencial produtivo nas áreas com pecuária extensiva, o que acarreta também fragilidade do solo com

perdas por erosão e, conseqüentemente, as pastagens degradadas trazem danos ambientais (DIAS-FILHO, 2011).

Todavia, nos sistemas como ILPF, a adição de árvores pode reduzir o rendimento individual dos cultivos agrícolas e forrageiros, em razão da competição por luz, nutrientes e água (MACEDO *et al.*, 2012), com implicações sobre produtividade animal, no sistema. As gramíneas tropicais, geralmente utilizadas na formação das pastagens brasileiras são, geralmente, de metabolismo C₄. As plantas C₄ necessitam de alta luminosidade para alcançar seus níveis máximos de produtividade (TAIZ; ZEIGER, 2012).

As plantas forrageiras desenvolveram sistemas ligeiramente diferentes para o metabolismo energético em função das condições climáticas do ambiente onde são cultivadas (UNDERSANDER, 2019). Em sua maioria, estas gramíneas tropicais não são adaptadas ao sombreamento e, em sistemas arborizados, apresentam produção menor ou semelhante que em ambientes a pleno sol (MARTUSCELLO *et al.*, 2009). Por isso, na literatura registra-se redução na produção de forragem, conforme o aumento do sombreamento (PACIULLO *et al.*, 2007; MARTUSCELLO *et al.*, 2009; SOARES *et al.*, 2009).

A resposta ao sombreamento depende das espécies forrageiras utilizadas, do nível do sombreamento imposto pela copa das árvores, das condições hídricas e da fertilidade do solo, da disponibilidade de nitrogênio (SOARES *et al.*, 2009; PACIULLO *et al.*, 2011). Segundo Dias-Filho (2011), quando a árvore fornece um sombreamento excessivo, normalmente também ocorre competição por água e nutrientes, pois as árvores apresentaram queda abundante de folhas, cuja decomposição será lenta, e o acúmulo da serrapilheira poderá prejudicar a rebrota e crescimento do capim.

Na escolha da espécie arbórea a ser implantada em um sistema de ILPF com ênfase na pecuária, além de se considerar sua adaptação às condições locais, deve-se optar por aquelas que apresentem crescimento rápido, de modo que entre um e dois anos do plantio as árvores tenham atingido altura tal que posicionem suas copas acima do alcance dos animais, com diâmetro do tronco suficiente para que sejam minimizados possíveis danos mecânicos (CASTRO *et al.*, 2009).

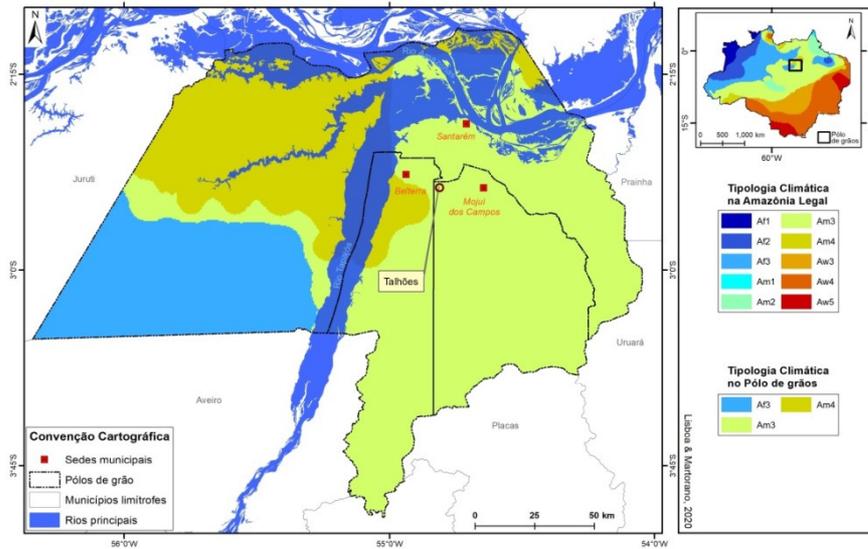
Dentre as espécies florestais mais utilizadas em pastagens no Brasil, destacam-se: eucaliptos (*Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp.), grevílea (*Grevillea robusta* Cunn.), pinus (*Pinus* spp.), teca (*Tectona grandis* L.f.), paricá (*Schyzolobiumamazonicum* Huber ex. Ducke), mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev), cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem.), canafístula (*Pelthophorum dubium* (Spreng.) Taub.) e acácia (*Acacia mangium* Willd.) (CARVALHO *et al.*, 2001; PORFÍRIO-DA-SILVA *et al.*, 2015).

Árvores de crescimento lento (menos de dois metros de altura por ano), como algumas espécies nativas, também podem ser utilizadas quando o produto/serviço escolhido compensa o custo de proteção contra danos que o gado pode produzir nas árvores (PORFÍRIO-DA-SILVA *et al.*, 2015). Em sistemas de ILPF em que a atividade principal é a pecuária, a escolha do componente florestal deve considerar espécies para múltiplo uso, que proporcionem madeira de qualidade para diferentes segmentos e permitam a entrada de várias receitas durante seu ciclo produtivo (SANTOS, 2018).

3.2 Exemplo de ILPF na Amazônia

Há dez anos, foi implantada uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) na Amazônia Oriental. A URT é composta de três (03) talhões com sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e foi implantada em parceria Embrapa-Produtor Rural. A unidade está localizada na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, no município de Mojuí dos Campos, no oeste do Pará, em uma área com altitude de 152 metros e coordenada geográfica de 2°38'11" de latitude S e 54°56'13" de longitude W.

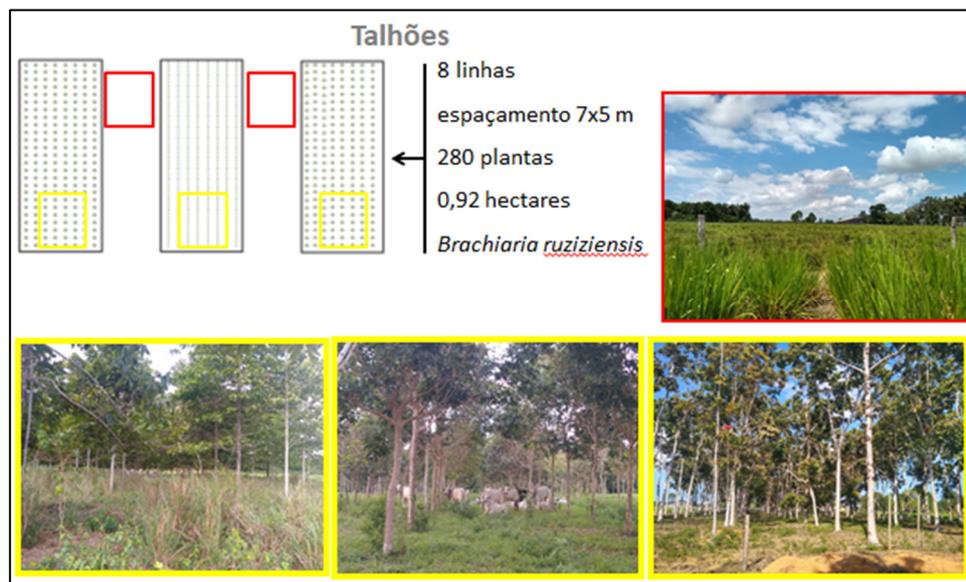
Na Figura 1 observa-se que no polo de grãos no Oeste do Pará, as áreas inseridas em Mojuí dos Campos estão regidas pelo subtipo climático Am₃, indicando que o regime de chuva inferior a 60 mm nos meses menos pluviosos é diferente das cotas pluviais que predominam no município de Belterra que se enquadra no subtipo Am₄, considerando os estudos para a Amazônia (MARTORANO *et al.*, 2017), sendo a temperatura do ar média anual de 25,6°C, a umidade relativa variando entre 84 a 86% (MARTORANO *et al.*, 2017) e a precipitação pluvial anual varia entre 1.900 a 2.100 mm, seguindo os pressupostos metodológicos de MARTORANO *et al.* (1993).



Fonte: Localização da área de estudo a partir da base de MARTORANO et al., (2017)

Figura 1. Mapa físico da localização dos talhões na Fazenda Nossa Senhora Aparecida (Mojuí dos Campos/PA).

O solo é classificado como Latossolo Amarelo textura argilosa (Embrapa, 2006). Os talhões com ILPF foram instalados no ano de 2010 com cultivo de 3 componentes arbóreas: Mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev), Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) e Castanheira (*Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl.), cada espécie em consórcio com culturas agrícolas (Figura 2).



Fonte: Primeira autora

Figura 2. Arranjo espacial das culturas e imagens dos talhões, conforme indicado A: Pastagem, B: Castanheira, C: Cumaru e D: Mogno africano.

Para o arranjo espacial, foi realizado o plantio das árvores em oito linhas no espaçamento 7x5 m, intercaladas por um espaçamento de 166 m para a plantação das culturas anuais e forrageiras. Até o ano de 2010, antes da instalação do experimento, a área utilizada vinha sendo mantida sob pastagem cultivada, com a exploração de gado de corte em sistema extensivo. Em janeiro de 2010, por razão da implantação do experimento, foram realizadas operações de preparo do solo, correção e adubação.

Em fevereiro do mesmo ano, foi realizado o plantio consorciado de soja (cultivar Tracajá) e as espécies arbóreas no espaçamento mencionado anteriormente. Na segunda adubação da soja foi semeada a forragem (*Brachiaria ruziziensis*, Germain Evrard), utilizando 20 kg ha⁻¹. No período de 2011 a 2013, realizou-se o plantio de milho - BRS 1040 (2011) e arroz - cultivar Best (2012 e 2013), todos consorciados com forragem e intercalados com o componente arbóreo (SILVA *et al.*, 2015). A partir de 2014, não houve cultivo agrícola, sendo mantido o componente arbóreo em cada talhão, consolidando-se em sistema silvipastoril.

4. Conclusão

Os resultados de pesquisas apontam que o sistema silvipastoril é vantajoso por fornecer benefícios econômicos, sociais e ambientais ao longo do tempo, inclusive após a sua consolidação, ampliam-se as possibilidades de novas fontes de renda pelo componente arbóreo implantado no sistema produtivo;

Os 42 benefícios apontados pelos resultados de pesquisa no Brasil nos últimos cinco anos reforçam a necessidade de mudança do paradigma para sistemas integrados, principalmente na Amazônia, onde a pressão por desflorestamento é fortemente atribuída ao sistema pecuário extensivo, inclusive com pastagens, muitas vezes em vias de degradação.

A implantação do sistema ILPF, dependendo dos arranjos e do manejo, pode, após o desenvolvimento das espécies florestais, permanecer como sistema silvipastoril, a exemplo da URT em Mojuí dos Campos, em que os animais utilizam o sombreamento das árvores como estratégia de conforto ambiental e, o produtor contribui com a redução das emissões de gases de efeito estufa pela manutenção do aporte de carbono pela biomassa florestal em sistema pecuário integrado no oeste do Pará.

Referências

ALMEIDA, R. G.; MEDEIROS, S. R. Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de integração lavoura pecuária floresta. In: SISTEMAS AGROFLORESTAIS E

DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 10 ANOS DE PESQUISA, 2013, Campo Grande, MS. **Anais [...]** Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2013. p. 123.

ARAÚJO, R. C.; PONTE, M. X. **Agronegócio, desmatamento e sustentabilidade na Amazônia: produção sustentável na Amazônia.** Universidade Federal do Pará (UFPA). 2011.

ASHMEAD, R. **A comparison of food safety and animal health systems in the US, Canada, Australia, the EU, and the UK - Final Report.** Serecon Management Consulting Inc., 2008. Disponível em: <<http://www.iconebrasil.org.br/pt/?actA=8&areaID=7&secaoID=20&artigoID=1635>>. Acesso em: 24 abr. 2020.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F., MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E., OLIVEIRA, J. de M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015.

BALBINO, LC; CORDEIRO, LAM; MARTÍNEZ, GB Serviços de Integração LavouraPecuária-Floresta (ILPF) para uma Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 6, p. 1014-1026, 2011.

BARCELLOS, A. O. *et al.* Sustentabilidade da produção animal baseada em pastagens consorciadas e no emprego de leguminosas exclusivas, na forma de banco de proteína, nos trópicos brasileiros. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.37, suplemento especial, p.51-67, 2008.

BARIONI, L. G.; ALBERTINI, T. Z.; MEDEIROS, S. R. Modelagem matemática do balanço de gases do efeito estufa na pecuária de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Piracicaba, v.40, p.201-212, 2011.

BENDER FILHO, Reisoli; ALVIM, Augusto Mussi. O mercado de carne bovina no Brasil: os efeitos da eliminação das barreiras tarifárias e não-tarifárias. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 46, n. 4, p. 1095-1127, Dec. 2008.

BOLFE, É. L.; BATISTELLA, M.; FERREIRA, M. C. Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1261-1269, 2012.

BRASIL - Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Ministério da Ciência e Tecnologia (Ed.), Vol. 2. Brasília, 2010. 280 p.

CAETANO, G. A. O.; CAETANO JÚNIOR, M. B. Influência do sistema silvipastoril na puberdade de novilhas. **Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**, Maringá, v. 9, n. 5, p. 232 -239, 2015,

CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J. ; CARNEIRO, J. C. (Ed.). **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais.** Juiz de Fora, Embrapa Gado de Leite; Brasília: FAO, 2001. 414 p.

CASTRO, C.R.T., PACIULLO, D.S.C., GOMIDE, C.A.M., MÜLLER, M.D., NASCIMENTO JR. E.R. Características agronômicas, massa de forragem e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* em sistema silvipastoril. **Pesquisa. Florestal. Brasileira**, Colombo. 60, p.19-25, 2009.

CAVALLINI, M. C.; ANDREOTTI, M.; OLIVEIRA, L. L.; PARIZ, C. M.; CARVALHO, M. P. Relações entre produtividade de *Brachiaria brizantha* e atributos físicos de um Latossolo do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1007-1015, 2010.

CERRI, C. E. P. ;FEIGL, B. J. ; PICCOLO, M. C. ;BERNOUX, M. ;CERRI, C. C. Seqüestro de carbono em áreas de pastagens. In: PEREIRA, O. G. *et al.* (Ed.). SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 3, 2006, Viçosa. **Anais [...]** Viçosa: UFV, 2006. p.7380.

CHAVES, SIGLEA SANNA DE FREITAS. Dinâmica do carbono no solo sob diferentes usos da terra em Paragominas, PA. 2014. **Dissertação** (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

CRUVINEL, E. B. F.; BUSTAMANTE, M. M. C.; KOZOVITS, A. R.; ZEPP, R. G. Soil emissions of NO, N₂O and CO₂ from croplands in the savanna region of central Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 144, n.1, p. 29-10, 2011.

DE CARVALHO T. B. & DE ZEN S. A cadeia de pecuária de corte no Brasil: evolução e tendências. **Revista Ipecege** 3(1):85-99. 2017.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4. Ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 215 p.

DIECKOW, J.; PERGHER, M.; PIVA, J. T.; BAYER, C.; MORAES, A.; SAKADEVAN, K. Soil nitrous oxide and methane fluxes in integrated crop-livestock systems in subtropics. **Soils Newsletter**, v.37, n.2, 2015.

DOMICIANO, L. F.; MOMBACH, M. A.; CARVALHO, P.; DA SILVA B, N. M. F.; PEREIRA, D. H.; CABRAL, L. S.; LOPES, L. B.; PEDREIRA, B. C. Performance and behaviour of Nellore steers on integrated systems. **Animal Production Science**, v. 58(5): p 920-929, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

GAMARRA, É., MORAIS, M., ALMEIDA, R., AGUIAR, P.N., PEREIRA, M., OLIVEIRA, C. Beef cattle production in established integrated systems. **Semina: Ciências. Agrárias**, Londrina, 38, 3241–3252, 2017.

GARCIA, A.R., MATOS, L.B., LOURENÇO JÚNIOR, J.B., NAHÚM, B.S., ARAÚJO, C.V., SANTOS, A.X. Variáveis fisiológicas de búfalas leiteiras criadas sob sombreamento em sistemas silvipastoris. **Pesquisa Agropecuária. Brasileira**, Brasília. v. 46, p 1409–1414. 2011.

GIRO, A. *et al.* Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. **Science Of The Total Environment**, Amsterdam, v. 684, p. 587-596, 2019.

GOMES, E. G.; MELLO, J. C. B. S.; ABREU, U. G. P.; CARVALHO, T. B.; ZEN, S. Avaliação dos desempenhos econômicos e socioambiental de sistemas modais de pecuária de cria com modelos DEA com restrições de pesos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., 2011. **Anais [...]** Ubatuba:

GÓMEZ, S.; GUENNI, O.; BRAVO DE GUENNI, L. Growth, leaf photosynthesis and canopy light use efficiency under differing irradiance and soil N supplies in the forage grass *Brachiaria decumbens* Stapf. **Grass and Forage Science**, 68, 395-407, 2013.

GOVERNO DO PARÁ, Secretaria do Estado de Agricultura - SAGRI. **Plano ABC Pará: Agricultura e pecuária com tecnologias sustentáveis.** Belém, PA, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção pecuária municipal 2016.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 44, 1–51, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2006.** Disponível em: (website: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/>). Acesso: 17 abril 2020.

IPCC 2013. Intergovernmental Panel. on Climate Change. Climate Change 2013: **The Physical Science Basis.** 2013. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>. Acesso em: 30 abril 2020.

JANTALIA, C. P.; TERRÉ, R. M.; MACEDO, R. O.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Acumulação de carbono no solo em pastagens de *Brachiaria*. In: ALVES, B. J. R. *et al.* (Ed.). **Manejo de sistemas agrícolas: impactos no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa.** Porto Alegre: Genesis, 2006.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of conservation agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 76, n. 1, p. 29-51, 2018.

KICHEL, A. N.; COSTA, J. A. A.; ALMEIDA, R. G.; PAULINO, V. T. **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF): experiências no Brasil.** B. Industr. Anim., Nova Odessa, v. 71, n. 1, p. 94-105, 2014.

KLUTHCOUSKI, J.; PACHECO, A. R.; TEIXEIRA, S. M. **Renovação de pastagem do cerrado com arroz.** 1- Sistema Barreirão. Goiânia-GO: EMBRAPA-CNPAP; Documentos, 33, 1991. 20p.

LEAL, E. S.; ÍTAVO, L. C. V.; VALLE, C. B.; ÍTAVO, C. C. B. F.; DIAS A. M.; BARBOSA-FERREIRA M.; SOARES, C. M.; MELO, G. K. A. F. Anti-nutritional potential of protodioscin and kinetics of degradation in *Urochloa* grasses. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37. p. 2247-2258, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; PERIN, A.; BEUTLER, S.J.; ANJOS, L.H.C. Oxidizable carbon and humic substances in rotation systems with *brachiaria*/livestock and pearl millet/no livestock

in the Brazilian Cerrado. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v.11, p.217-231, 2013.

MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H. Sistemas pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: FAVORETTO, V.; RODRIGUES, L. R. A.; REIS, R. A. (Eds.) Simpósio Sobre Ecossistemas das Pastagens, 2, 1993. Jaboticabal. **Anais [...]** Jaboticabal: FUNEP: UNESP, 1993, p.216-245.

MACEDO, M. C. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; ZATORRE, N. P.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M. Impact of pastures, cropping and ICL systems on soil carbon stocks in the Brazilian Cerrados. In: International Symposium on Integrated Croplivestock Systems, 2, 2012, Porto Alegre. **Anais[...]** Porto Alegre: INRA; UFPR; UFRGS; USDA, 2012. p. 13.

MANZATTO, C. V. *et al.* Monitoramento da mitigação das emissões de carbono na agropecuária. **Agroanalysis**, v. 38, n. 3, p. 26-29, 2018.

MARCHÃO, R. L.; LAVELLE, P.; CELINI, L.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; ECQUER, T. Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p.1011-1020, 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA); MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO (MDA). **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). Brasília: MAPA /MDA, 2011. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/abc>. Acesso em 12 abril 2020.

MADDONNI, G.A.; OTEGUI, M.E.; CIRILO, A.G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, Shijiazhuang City, v.71, p.183-193, 2001.

MARTHA JUNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E. Dimensão econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 117-1126, 2011.

MARTORANO, L. G.; VITORINO, M. I.; DA SILVA, B. P. P. C.; DE MORAES, J. R. S. C.; LISBOA, L. S.; SOTTA, E. D.; REICHARDT, K. Climate conditions in the eastern amazon: Rainfall variability in Belem and indicative of soil water deficit. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, p. 1801-1810, 2017.

MARTORANO, L. G.; NECHET, D.; PEREIRA, L. C. 1993. **Tipologia climática do Estado do Pará**: adaptação do método de Köppen. *Boletim de Geografia Teorética*, v. 23, p. 45-46.

MARTUSCELLO, J. A., JANK, L., NETO GONTIJO, M. M., LAURA, V. A., CUNHA, D. N. F. V., Produção de gramíneas do gênero *Brachiaria* sob níveis de sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Piracicaba. 38, p.1183-1190.2009.

MINERVINO, A. H. H., CARDOSO, E. C., ORTOLANI, E. L. Características do sistema produtivo da pecuária no município de Santarém, Pará. **Acta Amazônica**, 38(1):11-16, 2008.

MONTANARI, R.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; GODOY, L. T. R.; HENRIQUE, A. F.; DALCHIAVON, F.; C. Correlación de la productividad de um forraje com las propiedades físicas de um Ultisolen Aquidauana. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, p. 102-110, 2013.

MORAES, A., CARVALHO, F.P.C., ANGHINONI, I., LUSTOSA, S.B.C.A., COSTA, S.E.V.G., KUNRATH, T.R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, Sidi Bouzid, v. 57, p 4–9, 2014.

MORAIS, I. M.; SOUZA, R. H. A.; DUARTE, R. C. R. M.; BATTANIN, V. C.; PACKER, P. Avaliação da volatilização de amônia utilizando diferentes procedimentos de aplicação de fertilizantes no solo. In: 9º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC, Campinas. **Anais [...]** Campinas: SP, 2015

MORTON, D.; DEFRIES, R. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O.; ESPIRITO-SANTO, F.; FREITAS, R. M.; MORISETE, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** (On line), v. 103, p. 14637-14641, 2006.

MOUTINHO, P. Desmatamento Tropical e Mudança Climática. 2006. Disponível em: <http://www.socioambiental.org/esp/desmatamento/site/mudancas_climaticas/artigo_marcio_santilli_etc>. Acesso em: 16 mar. 2010.

NEVES, K. A. L. Pecuária na Amazônia e o desafio da sustentabilidade. 2017. **Tese** (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

NOGUEIRA, A. K. S.; RODRIGUES, R. A. R.; CASTRO, B. S.; NOGUEIRA, T. F.; SILVA, J. J. N.; BEHLING, M. MOMBACH, M. ARMACOLO, N.; SILVEIRA, J. G. Emissões de óxido nitroso e metano do solo em áreas de recuperação de pastagem na Amazônia Matogrossense. **Química Nova**, v.38, n.8, p. 937-943, 2015.

ONU. Organização das Nações Unidas. “**World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables**. Working Paper ESA/P/WP.228. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2013.

PACIULLO, S.C.D.; CARVALHO, C. A.B.; AROEIRA, L. J., M.; MORENZ, M. J.F.; LOPES, F. C.; ROSSIELLO, R. O.P. Morphophysiology and nutritive value of signalgrass under natural shading and full sunlight. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.4, p.573-579, 2007.

PACIULLO, D. S. C; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MULLER, M. D.; PIRES, M. F. A.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 46, n. 10, p.11761183, 2011.

PARIZ, C. M.; CARVALHO, M. P.; CHIODEROLI, C. A.; NAKAYAMA F. T.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Spatial variability of forage yield and soil physical attributes of a *Brachiaria decumbens* pasture in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 2111-2120, 2011.

PEREIRA, M. A.; COSTA, F. P.; ALMEIDA, R. G. Economic viability of integrated crop livestock forest systems: a comparative analysis. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP LIVESTOCK FOREST SYSTEMS, 2015, Brasília, DF. **Anais [...]** Brasília, DF: Embrapa, 2015.

PILATO, G. C.; GUERREIRO, L. M.; SILVA, L. K. X.; BELDINI, T. P.; NEVES, K. A. L.; Padrões de alvos em sistema pecuário extensivo diagnosticados por termografia infravermelho no oeste do Pará. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 55-72, 2018.

PITELLI, M. M. **Sistema agroindustrial brasileiro da carne bovina: análise do impacto das mudanças institucionais européias sobre a estrutura de governança**. 2004. 160 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; TOMAZI, M.; PAULETTI, V.; BARTH, G.; PICCOLO, M. C.; Soil gaseous N₂O and CH₄ emissions and carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical Ferrasol. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 87-93, 2014.

PONTES, L. D.; BARRO, R. S.; SAVIAN, J. V.; BERNDT, A.; MOLETTA, J. L.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; BAYER, C.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Performance and methane emissions by beef heifer grazing in temperate pastures and in integrated croplivestock systems: The effect of shade and nitrogen fertilization. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 253, p. 90-97, 2018.

PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; BEHLING, M.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, T. K.; RIBASKI, J.; RADOMSKI, M. I.; TONINI, H.; PACHECO, A. R. Implantação e manejo do componente florestal em sistemas de integração lavourapecuáriafloresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHAO, R. L. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa Responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. cap. 4, p. 81-101. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

RESENDE, L. O.; PINHEIRO, F. M.; JUNIOR, L. C.; MERCEDES, S. S. P.; REGO, L. F. G. O sistema silvipastoril como uma alternativa sustentável para o Vale do Paraíba. In: OLIVEIRA, R. R.; RUIZ, A. E. L. **Geografia histórica do café**. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2018.

RIBEIRO-JÚNIOR, N. G.; ARIANO, A. P. R.; SILVA, I. V.; Death of pastures syndrome: tissue changes in *Urochloa hybrid* cv. Mulato II and *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Brazilian, **Journal of Biology**, 77:97-107, 2017.

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

SANDINI, I. E.; MORAES, A., PELISSARI, A.; NEUMANN, M.; FALBO, M. K.; NOVAKOWISKI, J. H. Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de

produção integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 8, p. 1315-1322, 2011.

SANTO, E. E.; ALVES, S. B. V.; TRECENTI, R. **Plano Nacional para uma Agricultura de Baixo Carbono–Plano ABC: análise financeira de modelos típicos de produção com e sem adoção de práticas de baixo carbono**. Brasília, DF: SENAR. 53p, 2013.

SANTOS, VALÉRIA ANA CORVALÃ DOS. **Respostas agrônômicas e fisiológicas de Brachiaria brizantha cv. Piatã em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

SEEG – Emissões de GEE no Brasil e suas aplicações para políticas e a contribuição brasileira para o acordo de Paris. **Documentos de Análise**. Observatório do Clima. 2018

SILVA, D. R. G.; COSTA, K. A. P.; FAQUIN, V. O. I. P.; SOUZA, M. R. F. S.; SILVA, M. A. Eficiência nutricional e aproveitamento do nitrogênio pelo capim-marandu de pastagem em estágio moderado de degradação sob doses e fontes de nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 242-249, 2011.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M. **Efeito dos Atributos Físicos de um Latossolo Amarelo no Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta em Belterra – PA**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Natal, 2015

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; VENZKE FILHO, S. P.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR): II - Emissões de CO₂ e N₂O. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.33, p. 1023-1029, 2009.

SOARES, A.B., SARTOR, L.R., ADAMI, P.F., VARELLA, A.C., FONSECA, L., MEZZALIRA, J.C. Influência da luminosidade no comportamento de onze espécies forrageiras perenes de verão. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Piracicaba, v. 38, p.443-451, 2009.

SORDI, A.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; PIVA, J. T.; ZANATTA, J. A.; TOMAZI, M.; ROSA, C. M.; MORAES, A. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 94–103, 2014.

SOUZA, F. M.; LEMOS, B. J. M.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; MAGNABOSCO, C. U; CASTRO, L. M.; LOPES, F. B.; BRUNES, L. C. Introdução de leguminosas forrageiras, calagem e fosfatagem em pastagem degradada de *Brachiaria brizantha*. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 17, n. 3, p. 355-364, 2016.

SHÜTZ, K. E.; ROGERS, A. R.; COX, N. R. et al. Dairy cows prefers shade that offers greater protection against solar radiation in summer: shade use, behavior and body temperature. **Applied Animal Behaviour Science**, v.116, p. 28-34, 2009.

STEINFELD, H.; GERBER, P.; WASSENAAR, T.; CASTEL, V.; ROSALES, M.; DE HAAN, C. **Livestock's long shadow: environmental issues and options**. Rome: FAO, 2006. 375 p.

VALÉRIO, J. R.; SOUZA, O. C. de; VIEIRA, J. M.; CORRÊA, E. S. **Diagnóstico de morte de pastagens nas regiões central e norte do Estado de Mato Grosso**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2000. 10 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 98).

VALLE, L. C. S.; VALERIO, J. R.; SOUZA, O. C. de; FERNANDES, C. D.; CORRÊA, E. S. **Diagnóstico de morte de pastagem nas regiões leste e nordeste do Estado de Mato Grosso**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2000. 13 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 97).

VARELLA, A.C. *et al.* **Estabelecimento de plantas forrageiras em sistemas de integração floresta-pecuária no sul do Brasil**. EMBRAPA. 2016 <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1010197/1/cap15.pdf>> Acessado em 23/05/2020.

VEIGA, J. B. da; TOURRAND, J. F. **Pastagens cultivadas na Amazônia brasileira: situação atual e perspectivas**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 36 p. (Embrapa Amazônia Oriental, Documentos, 83), 2001.

VILELA, L. *et al.* Integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista UFG**, n. 13, p. 92-99, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fotossíntese: as reações luminosas In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5.ed. Porto Alegre: Arned. 2012. Cap.8, p.139- 169.

THAMO, T., ADDAI, D., PANNELL, D. J., ROBERTSON, M. J., THOMAS, D.T., YOUNG, J. M. Climate change impacts and farm-level adaptation: economic analysis of a mixed cropping– livestock system. **Agricultural Systems** v. 150, p 99–108, 2017.

TOMAZI, M.; MAGIERO, E. C.; ASSMANN, J. M.; BAGATINI, T.; DIECKOW, J.; CARVALHO, P. C. F.; BAYER, C. Sheep Excreta as Source of Nitrous Oxide in Ryegrass Pasture in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.39, p.1498-1506. 2015.

TONINI, H.; MORALES, M. M.; SILVA, V. P.; LULU, J.; NETO.; A. L. F.; **Efeito do sistema de plantio e da exposição solar sobre a alocação da biomassa no desenvolvimento inicial do eucalipto** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 86-95, 2019.

UNDERSANDER, DANIEL, J. Forage Plant Structure, Function, Nutrition, and Growth, In: **Horse Pasture Management**. p 1-10, 2019

YATES, C., DORWARD, P., HEMERY, G., COOK, P. The economic viability and potential of a novel poultry agroforestry system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 69, p 13–28, 2007.

CAPÍTULO II – Condições térmicas de pastagens em sistema silvipastoril e a pleno sol, diagnosticadas por termografia infravermelho, na Amazônia Oriental, Brasil²

Resumo: Faz-se necessário identificar interações dos sistemas silvipastoris e índices associados às condições microclimáticas que expressem respostas pela presença de árvores, em comparadas com sistemas convencionais. O objetivo neste trabalho foi avaliar as condições térmicas em áreas contendo pastagens, em sistema silvipastoril, comparadas a pastagens a pleno sol, na Amazônia Oriental, Brasil. Cada área é composta por uma das espécies florestais: *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, e *Khaya grandifoliola*. Durante o período de monitoramento, foi realizado o inventário florestal com 30 árvores de cada espécie e diagnósticos termográficos usando termógrafo de alta precisão. A termografia no infravermelho próximo apresentou correlação positiva e direta com as variáveis dendrométricas. Os sistemas silvipastoris contendo *K. grandifoliola* foram os maiores atenuadores de carga térmica ao comparar com as condições nas pastagens à pleno sol, evidenciando a prestação de serviço ambiental como regulação térmica no sistema. Essas condições microclimáticas explicam a maior presença dos bovinos, nas áreas de integração silvipastoril, em busca de conforto térmico proporcionado pelas árvores, nos horários em que as temperaturas são superiores, nas áreas de pastagens à pleno sol. O sistema silvipastoril beneficia a troca calórica e a manutenção do conforto térmico aos animais.

Palavras-chave: Pecuária sustentável; forrageiras; termograma; conforto térmico; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; *Khaya ivorensis*; *Panicum maximum*; dendrometria.

Abstract: There is a great need to identify interactions among silvopastoral systems and microclimatic indicators that describe the effect of trees compared to conventional pasture systems without trees. The objective of this study was to evaluate thermal conditions in a silvopastoral system and a pasture area exposed to full sunlight in the eastern Amazon, Brazil. The silvopastoral system was composed of the forest tree species *Bertholletia excelsa* H.B.K.,

² Trabalho publicado em: CÂNDIDO, A. C. T. F.; GUERREIRO MARTORANO, L.; CÂNDIDO, B.U.F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C.T.D.S.; LISBOA, L.S.S.; FERNANDES, P.C.C.; SILVA, A.R.; DIAS-FILHO, M.B.; BELDINI, T.P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. *Forests* **2023**, *14*, 1463. <https://doi.org/10.3390/f14071463>

Dipteryx odorata (Aubl.) Willd, and *Khaya grandifoliola* C.DC.. During the monitoring period, a forest inventory was carried out that included 30 trees from each species for which thermal profiles were created using a high-precision thermographic camera. Near-infrared thermography showed a positive and direct correlation with dendrometric variables. Silvopastoral systems with *K. grandifoliola* reduced the heat profile the most compared to conditions in a pasture fully exposed to sunlight, which demonstrates the ecosystem service provided by trees for thermal regulation in these systems. The microclimatic conditions explain the greater presence of bovines in the silvopastoral system as they were most likely in search of the thermal comfort provided by the trees during the period of the highest daytime temperatures. The silvopastoral system benefits the caloric balance and thermal comfort of pasture animals.

Keywords: sustainable cattle ranching; forage; thermogram; thermal comfort; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; *Khaya ivorensis*; *Panicum maximum*; dendrometry

2.1. Introdução

Os sistemas de produção de alimentos que incorporam árvores apontam indicadores que vão desde os econômicos, pelo baixo custo na recuperação do solo, até a alta oferta de bens e serviços ambientais, importantes estratégias de mitigação das emissões de gases de efeito estufa que são apontados como causadores de efeitos na dinâmica climática global (MANAYE et al., 2021).

A adoção de sistemas agroflorestais possibilita combinar espécies arbóreas com gramíneas, promovendo bens e serviços ambientais, nitidamente perceptíveis e de fácil mensuração que expressam processos dinâmicos que se integram e se correlacionam no tempo e no espaço (KARVATTE et al., 2016; OLIVEIRA et al.; 2017). Nesses sistemas, as árvores, durante o estabelecimento dos arranjos agroflorestais, atuam de forma diferenciada no transporte de massa e energia em uma determinada área, criando um microclima favorável a partir das interações solo-planta-atmosfera (KIM et al., 2016; KOVÁCS; TINYA; ÓDOR, 2017).

Nesse contexto, ao contabilizar as áreas em vias de degradação das pastagens e a adoção de estratégias sustentáveis, os sistemas silvipastoris são exemplos de produção animal que se enquadram nos pressupostos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, conforme recomendações das Nações Unidas (ONU, 2015).

Ao interceptar a radiação solar direta, as árvores reduzem a carga de radiação solar e promovem uma dispersão ao atingir o dossel das plantas, causando um efeito de resfriamento no ambiente, decorrente de processos como as taxas evapotranspiratórias e do sombreamento (RENAUD et al., 2011; KARVATTE et al., 2016; MAES et al., 2016;). Em áreas típicas de clima tropical e subtropical, as avaliações micrometeorológicas, usando sensores que permitem coletar variáveis dentro desses sistemas, é possível explicar respostas na produção animal e desenvolvimento de pastagens com base em indicadores térmicos como amplitudes e temperaturas médias e extremas, por exemplo (KARVATTE et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017; LOPES et al., 2016; GIRO et al., 2019; PEZZOPANE et al., 2019).

O monitoramento da temperatura na superfície da copa das árvores, nos talhões das árvores e no dossel das pastagens podem explicar respostas no comportamento animal em diferentes horários, ao longo do dia. Essas variações térmicas promovem interações físicas e biológicas condicionadas pela anatomia foliar, resposta estomática, albedo, posição das árvores, radiação solar, velocidade do vento, regime pluvial e, estoques de água no solo, condicionados pelo clima regional e local (KIM et al., 2016; GERSONY et al., 2016; NGAO; ADAM; SAUDREAU 2017; HAMMERLE et al., 2017).

Entre as tecnologias utilizadas no monitoramento nesses ambientes, destaca-se a aplicação da termografia no infravermelho próximo (TIP), que vem contribuindo na análise de padrões térmicos em superfícies, nas mais variadas áreas do conhecimento científico. A alta resolução dos termógrafos, a aparente simplicidade operacional e aumento da capacidade computacional de armazenamento e processamento de dados explicam a popularização da tecnologia (ABREU-HARBICH; LABAKI; MATZARAKIS, 2015; KOVÁCS; TINYA; ÓDOR, 2017; GIRO et al., 2019; PEZZOPANE et al., 2019).

Aplicações na área da fisiologia vegetal e agrometeorologia apontaram efeitos da temperatura na condutância estomática e trocas de vapor d'água e dióxido de carbono explicando estreitas relações no sistema solo-planta-atmosfera (KIM et al., 2016; GERSONY et al., 2016; HAMMERLE et al., 2017; NGAO; ADAM; SAUDREAU, 2017). A termografia no infravermelho possibilita descrever detalhadamente padrões de variações térmicas foliares e sua relação com as variáveis microclimáticas decorrente dos arranjos de cada sistema agroflorestal em uma determinada área de interesse (KARVATTE et al., 2020).

Estudando arranjos florestais com eucalipto (*Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*) e árvores nativas do cerrado brasileiro, Karvate Jr. et al. (2020) concluíram que a termografia no infravermelho próximo é capaz de identificar variações térmicas temporais e locais em sistemas agroflorestais, sendo recomendada como ferramenta nas avaliações microclimáticas. Padrões

termográficos se correlacionam positiva e diretamente com variáveis como radiação, temperatura e índices de conforto térmico, possibilitando prever e monitorar de forma rápida, fácil e não invasiva em diferentes ambientes rurais (BARRETO et al., 2020).

As análises sobre bem-estar animal e conforto térmico na pecuária se intensificam quando a temática se refere ao contexto das relações entre a produção sustentável e manutenção de práticas apontadas como causadores de mudanças climáticas, em decorrência do aquecimento global. Especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde a produção de gado ocorre em pastagens (ALVES et al., 2020), a alta incidência de radiação solar com consequente aquecimento do ambiente influencia sobremaneira o estresse térmico animal (KARVATTE et al., 2016; DE OLIVEIRA et al., 2019).

Como os bovinos são animais homeotérmicos, ocorre a manutenção na temperatura corporal interna, relativamente constante, independentemente das variações climáticas, devido aos ajustes fisiológicos, comportamentais e metabólicos (SILANIKOVE, 2000). Portanto, a energia gasta para manter o equilíbrio térmico dos animais pode causar perdas em produtividade (GIRO et al., 2019).

A alta incidência de radiação solar em bovinos criados em áreas de pastagens a pleno sol pode resultar em desconforto térmico, levando a alterações fisiológicas e comportamentais (SCHÜTZ et al., 2010). O ambiente megatérmico prejudica a eficiência da dissipação calórica, que é dependente do gradiente térmico entre a superfície corporal do animal e o ambiente (GIRO et al., 2019).

Segundo Karvatte et al. (2016), sistemas integrados com árvores promovem mudanças microclimáticas benéficas para animais a pasto, no Centro-Oeste brasileiro. Espécies com capacidade de serem utilizadas em sistemas silvipastoris nas regiões tropicais devem ser identificadas e estudadas.

Entre as espécies nativas, a castanha-da-amazônia ou castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K), pertencente à família das Lecythidaceae, apresenta grande porte, destacando-se na floresta pelo formato circular de copa, ocorrendo em todo Bioma Amazônia (NEVES; GUEDES; RODRIGUES, 2015). A espécie destaca-se na produção de sementes comestíveis de alto valor no mercado nacional e internacional, sendo fonte de renda para muitos agroextrativistas que vivem em comunidades com alta ocorrência, como na mesorregião baixo amazonas (SILVA et al., 2013).

A alta qualidade da madeira possibilitou o uso na construção de casas, barcos e esteios, pois as árvores quando adultas podem atingir até 60 m de altura e 4 m de diâmetro (SCOLES, 2010), tornando-a muito impactada pelo processo de retirada de madeira ilegal na região.

Considerando que atualmente a *B. excelsa* é uma espécie protegida por lei, como alternativa para seu uso múltiplo, é recomendado o plantio, visto que apenas as árvores provenientes de cultivo de reflorestamento de acordo com os aspectos legais são passíveis de uso para fins madeireiros, conforme a Lei n.º 12.651, de 2012 (LOPES; NARDI; CHIAVARI, 2007).

A *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., conhecida, popularmente como cumaru, é uma espécie arbórea de grande porte com ampla distribuição no Bioma Amazônia (FÁBIO; CÂNCIO, 2019). Apresenta madeira de alta densidade e as sementes são ricas em cumarina (SOUSA et al., 2018), amplamente utilizada na fabricação de produtos farmacêuticos, cosméticos, herbicidas, fungicidas, bebidas, entre outras, o que justifica a alta demanda no comércio nacional e internacional (SILVA et al., 2010).

A outra espécie é o mogno africano, pertencente à família Meliaceae (HALL, 2008; KASONGO YAKUSU et al., 2021; BOUKA et al., 2019), muito utilizada na produção de madeira com alto valor comercial, na fabricação de mobiliários de luxo, construção naval, acabamentos de interiores, entre outros (POORTER et al., 2004; ARMSTRONG et al., 2007; PINHEIRO et al., 2011). No Brasil, por muitos anos foi erroneamente nomeado como *Khaya ivorensis* (DE AZEVEDO et al., 2021), contudo, pesquisadores, reconhecendo a falha na identificação da espécie, reconheceram se tratar da *Khaya grandifoliola* (PENNINGTON; CHEEK, 2015). Rotineiramente, sementes e mudas ainda são comercializados como *K. ivorensis*. Com o desenvolvimento de pesquisas e publicações científicas, espera-se que em breve a nomenclatura correta seja habitualmente utilizada (SILVA et al., 2020).

As espécies do gênero *Khaya* são as mais utilizadas em projetos florestais para produção de madeira serrada, tais como: *Khaya grandifoliola*, *Khaya anthotheca*, *Khaya* e *Khaya senegalensis* pelo alto potencial madeireiro (LEMMENS; LOUPPE; OTENG-AMOAKO, 2012). Essas espécies listadas ocorrem em região tropical da África, de onde são extraídos grandes volumes de madeira de florestas nativas, desde o século XVIII (HALL, 2003; DANQUAH; SARPONG; PAPPINEN, 2013). A produção de *Khaya* spp. em consórcio com outras espécies anuais e/ou perenes em sistemas agroflorestais pode gerar retorno econômico de curto, médio e longo prazos (ALTIERI, 2012; MONTAGNINI; METZEL, 2017).

Faz-se necessário identificar as interações entre os sistemas silvipastoris e respostas associadas às condições microclimáticas abaixo do dossel, expressas em termos de temperatura, influenciada pela espécie arbórea incluída nos talhões que compõe o sistema integrado. A medição de variáveis dendrométricas nesses arranjos agroflorestais permite estimar a produção florestal, auxiliando na comparação produtiva de diferentes localidades, além de definir

diretrizes para práticas de manejo florestal estabelecendo metas de colheita (PINTO; ENCINAS; SILVA, 2005).

As questões norteadoras foram as seguintes: se existem correlações entre variáveis dendrométricas e os padrões termográficos e se o mogno africano é a espécie que apresenta maior sombreamento, devido ao rápido crescimento ao comparar com as duas espécies nativas amazônicas e, ainda se esses efeitos são impactantes na redução das temperaturas dos alvos. O objetivo deste trabalho foi avaliar as condições térmicas de pastagens, em áreas contendo árvores, em sistema silvipastoril, com a pastagens a pleno sol, no oeste do estado do Pará, na Amazônia Oriental, Brasil.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, município de Mojuí dos Campos, Estado do Pará, Brasil. A unidade de referência tecnológica (URT) está localizada na região oeste do estado do Pará, com altitude de 152 metros e coordenadas geográficas entre 2°38'11" S de latitude e 54°56'13" W de longitude (Figura 1). A área de estudo está inserida em ambiente sob tipologia climática Am4, de acordo com a metodologia adaptada por Martorano et al. (1993), indicando que no mês menos chuvoso os valores são inferiores a 60 mm e a faixa pluvial anual varia entre 1.500 a 2.000 mm.

É possível observar, ainda na Figura 1 que a URT é regida por temperatura média do ar na faixa entre 25,5°C e 26,0°C, mas no entorno as temperaturas médias podem variar entre 25,5 e 27,0°C. Vale destacar que sobre as temperaturas mínimas, que ocorrem nas primeiras horas do dia, os valores oscilam entre 21,0 e 22,5°C. Em se tratando de temperaturas máximas, os valores oscilam entre 30,5 e 32,0°C, indicando que nos horários de maior carga térmica, principalmente nos sistemas pecuários com pastagens a pleno sol, os animais podem entrar em estresse térmico. As variáveis climáticas temperatura, umidade do ar e temperatura animal fornecem subsídios para avaliar as condições de conforto térmico animal na propriedade rural. De acordo com Martorano et al., (2017), em média, a umidade do ar na área de estudo varia entre 84 a 86%.

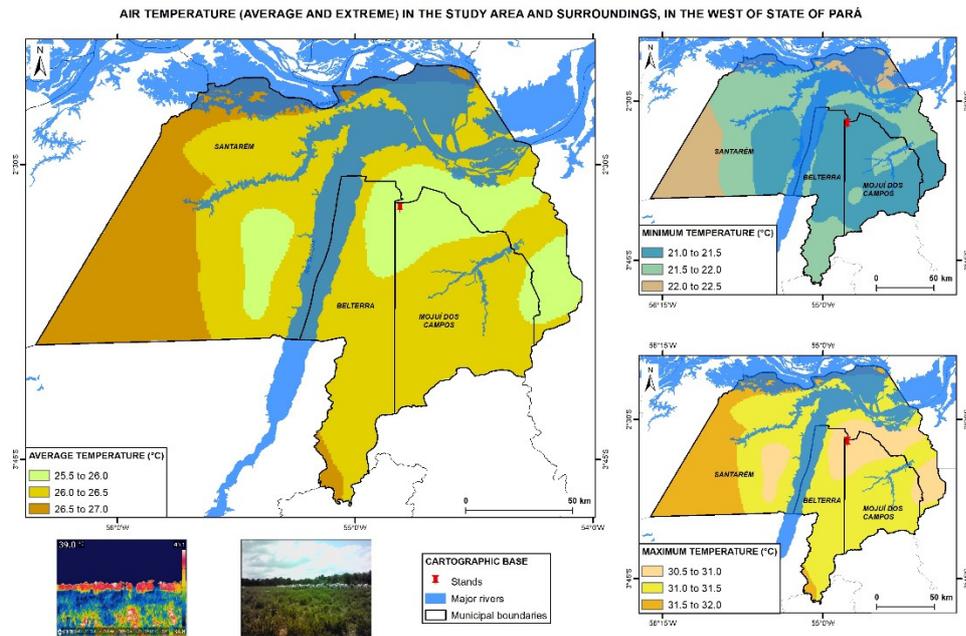


Figura 1. Mapa físico da localização da área de estudo, indicando os três talhões com espécies arbóreas em sistema silvipastoris e pastagem a pleno sol na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, no município de Mojuí dos Campos, no Estado do Pará, Brasil.

Foto: Registros fotográficos em campanhas de campo pela equipe (2020).

Ao avaliar as condições pedológicas, identificada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (EMBRAPA, 2006), informa-se que na área predomina o Latossolo Amarelo textura argilosa, e apresentava, antes do desflorestamento, a vegetação típica do Bioma Amazônia.

A Embrapa implantou essa URT em sistema integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) em 2010. As espécies florestais foram plantadas em três talhões separadamente, sendo com Castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K), Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) e Mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC). As áreas sem árvores entre os talhões foram usadas para o plantio de grãos e *Brachiaria ruzizienses* como planta de cobertura em sucessão por 4 anos. Depois foi implantada pastagem com capim mombaça (*Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça), quando as árvores estavam mais desenvolvidas, objetivando-se diminuir o risco de lesão às árvores pelos bovinos. As áreas com árvores são destinadas ao descanso dos bovinos após o pastoreio em áreas abertas expostas diretamente ao sol.

2.2.2. Histórico da área

Informa-se que na área houve cultivo tradicional com pastagens a partir de 1996, quando as áreas com vegetação nativa foram retiradas para implantação das áreas com pecuária

(SILVA, et al., 2018). De 1996 a 2009, a área vinha sendo mantida com pastagem cultivada e criação de bovinos de corte, em sistema extensivo (SILVA et al., 2015).

A análise de solo, antes do preparo para plantio, mostrou pH 5,26, matéria orgânica 30,66 g kg⁻¹, alumínio 0,43 cmol_c dm⁻³, cálcio 2,96 cmol_c dm⁻³, magnésio 0,93 cmol_c dm⁻³, potássio 0,13 cmol_c dm⁻³, fósforo 2,17 mg dm⁻³, soma de bases trocáveis 4,08, capacidade de troca de cátions 4,51 mmol_c dm⁻³, e saturação por bases 37%, conforme Silva et al., (2018). O sistema ILPF foi implantado em 2010, com correção do pH do solo com calcário dolomítico e adubação, e plantio convencional com subsolagem, aração, gradagem.

As áreas de cultivos de grãos intercaladas entre as faixas de plantios de árvores foram manejadas em rotação de culturas com soja, milho e arroz. A *Brachiaria ruzizienses* foi usada como planta de cobertura, semeada na quantidade de 20 kg ha⁻¹, em sucessão ao plantio de grãos (Figura 2).

As árvores foram manejadas com replantios no caso de morte de mudas, coroamento e desrama nos primeiros quatro anos (LAMEIRA et al., 2022), não foi realizado desbaste nesse período. O cultivo de grãos com rotação de culturas em sistema plantio direto ocorreu até 2015, seguido do plantio de pastagens com capim-mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça) que vem sendo cultivado nos anos subsequentes na propriedade.



Figura 2. Fotos do plantio de *B. excelsa* no ano de 2010 (A); plantio de *D. odorata* no ano de 2010 (B); talhão de *B. excelsa* no ano de 2012 (C) e talhão de *K. grandifoliola* no ano de 2012 (D).

2.2.3. Desenho experimental

As árvores foram plantadas em três talhões. Cada talhão é composto por oito linhas de uma das espécies florestais (*B. excelsa*, *K. grandifoliola* e *D. odorata*), com espaçamento de 7 x 5 m e um total de 280 plantas em 0,92 hectares. Os talhões são intercalados à distância de 166 m para criação de gado nelore, sendo a forragem utilizada o *P. maximum*.

2.2.4. Amostragem das áreas

Foram realizadas campanhas de campo para execução do inventário florestal e obtenção dos diagnósticos termográficos.

Realizou-se a coleta das informações de 30 (trinta) árvores de cada espécie, onde foram desconsideradas as duas linhas e entrelinhas de cada extremidade para eliminar efeito de bordas. As demais árvores foram sorteadas para mensuração das variáveis dendrométricas.

As imagens para gerar os termogramas foram capturadas nas entrelinhas das árvores sorteadas amostradas, sendo o termógrafo posicionado sempre no meio da entrelinha, ou seja, a uma distância de 3,5 metros da linha a direita e 3,5 metros da linha a esquerda. Na Figura 2 é possível identificar como foram planejados e plantados os plantios dos talhões com as espécies na área experimental.

Foram capturados 6 (seis) imagens em cada área e de cada termograma se fez a leitura de 5 pontos da temperatura na superfície, perfazendo um total de 30 (trinta) leituras de cada talhão.

2.2.5. Mensurações dendrométricas

Foram medidas: circunferência do fuste com casca mensurada à 1,30 m do solo com o auxílio de uma fita métrica e após foi feito o cálculo do diâmetro (DHC); altura total (m), compreendida entre o solo e o ramo mais elevado, estimada com uma régua telescópica; área de dossel (m), considerando duas medidas, uma no sentido norte-sul e outra no sentido leste-oeste, conforme Harder et al., (2006). A área de cobertura da copa (canopy área) foi calculada conforme Silva et al., (2018) de acordo com a equação:

$$Canopy\ area = \pi \left\{ \frac{[L_1 + L_2]^2}{4} \right\}$$

em que: Canopy area: área da copa individual (m²); L1: comprimento no sentido norte-sul (m); L2: comprimento da copa no sentido leste-oeste (m).

Os dosséis dos talhões contendo as espécies arbóreas foram fotografados para avaliar a capacidade de retenção de luz das copas das árvores pela lacuna de luz. A lacuna de luz é um modelo para avaliar os níveis de luz do bosque. As medições de luz servem para caracterizar o crescimento e a morfologia das plantas (HU; ZHU, 2008), interferindo diretamente na temperatura do dossel. O fechamento da copa foi analisado usando o programa Gap Light Analyzer conforme Kim et al., (2023), (Versão 2.0, Copyright, Canadá e EUA), (Figura 3). Foram capturadas 30 imagens dos dosséis, sendo nos mesmos pontos da captura da imagem termográfica, nas linhas centrais de cada área, excluindo-se as linhas e entrelinhas das duas extremidades laterais para se eliminar o efeito de borda.

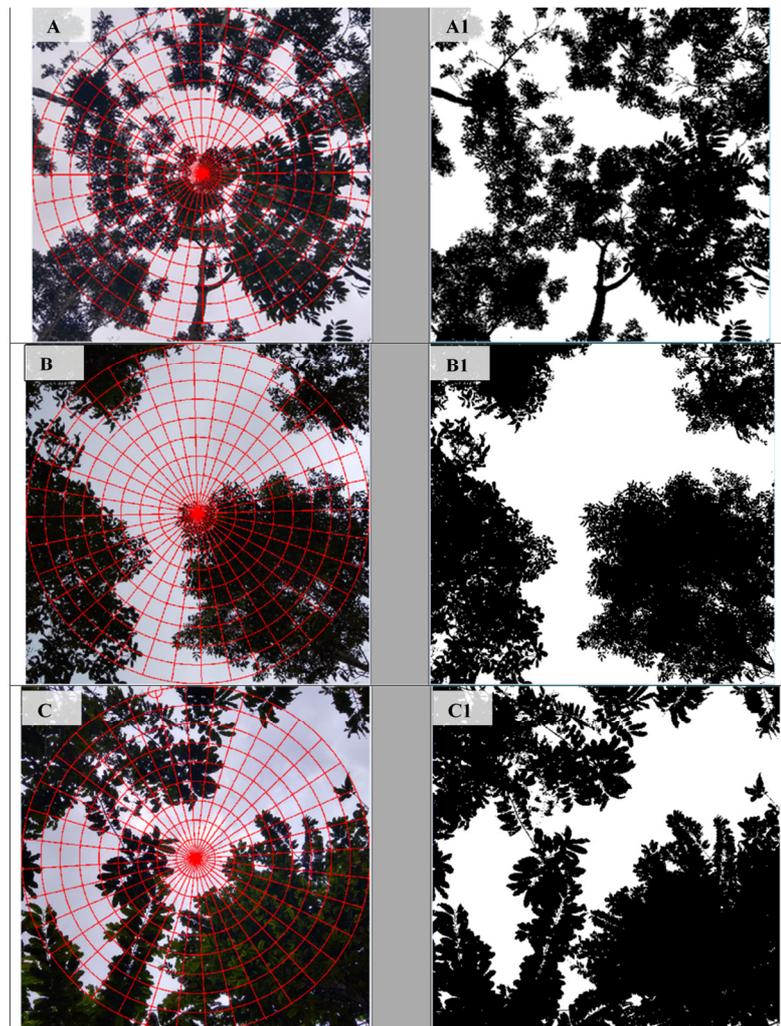


Figura 3. Imagem no visível e sua respectiva imagem fotográfica tratada no programa Gap Light Analyzer. Espécies *K. grandifoliola* (A e A1), *D. odorata* (B e B1) e *B. excelsa* (C e C1).

2.2.6. Termografia no infravermelho próximo

Os dados foram coletados usando um termógrafo no infravermelho (FLIR T650sc, Wilsonville, OR, EUA, 2015), com emissividade regulada para 0.95. Os termogramas foram analisados no programa Flir Tools, 6.3v (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, OR, EUA, 2015), conforme Figura 4. O aparelho foi manuseado sempre pelo mesmo avaliador, posicionando-o sempre na altura dos olhos e sem o uso de tripé, perpendicularmente ao foco avaliado, em ângulo de 90°, a semelhança dos pressupostos metodológicos adotados por Barreto et al., (2020).

Para cada área avaliada, foram analisados 6 (seis) termogramas, considerando-se a temperatura do solo das áreas das espécies arbóreas e da pastagem exposta, selecionando-se as imagens obtidas entre 11h00min e 13h00min, denominadas como Temperatura de Superfície (TS).

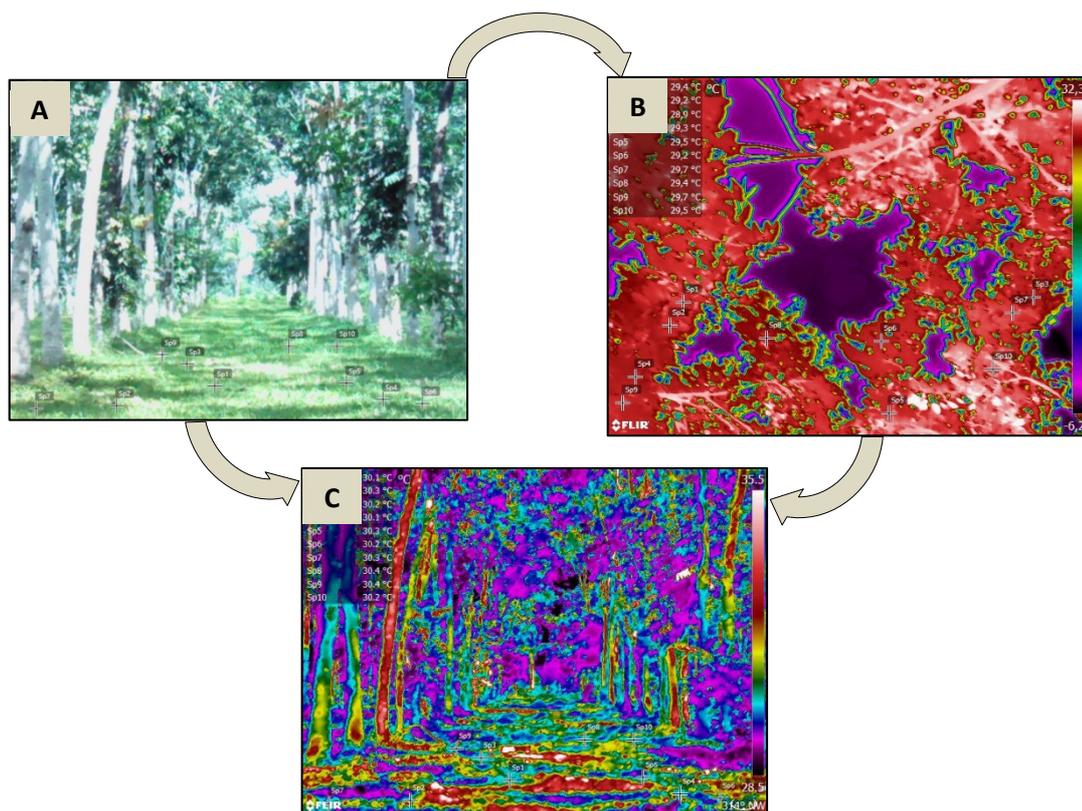


Figura 4. Imagem no visível (A) na parcela que o componente arbóreo é o *K. grandifoliola*, sua respectiva imagem termográfica da copa (B) e da superfície (C) tratada no programa Flir Tools.

As imagens foram capturadas no mês de agosto (Aug_temp) e no mês de outubro (Oct_temp) de 2018, sendo considerado o período menos chuvoso na região. O mês de agosto é considerado como o mês em que as pastagens apresentam restrições quanto a oferta hídrica

no solo. De acordo com Martorano et al., (2017), mesmo em áreas pluviosas típicas de Clima Af2 como Belém, no mês de agosto inicia-se o período de deficiência hídrica que se estende até novembro, sendo outubro o mês com os maiores déficits de água no solo. Assim sendo, foram analisadas as imagens termográficas monitoradas em outubro para identificar respostas térmicas em solo seco.

2.2.7. Análise estatística

Os dados foram testados quanto à homogeneidade de variâncias dos resíduos pelo teste de Bartlett e quanto a normalidade de resíduos pelo teste Shapiro-Wilk. Os postos foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis, no pacote RSTATIX, para testar se as amostras se originam da mesma distribuição e foi utilizado o teste de Wilcoxon ajustado pelo teste Bonferroni para comparar as amostras no pacote GGPUBR.

Com o objetivo de avaliar as temperaturas superficiais associadas às respostas, de acordo com cada variável nos componentes arbóreos dos sistemas silvipastoris, realizou-se a análise de componentes principais (ACP). A ACP é uma técnica de análise multivariada, que permite estudar o relacionamento simultâneo entre várias variáveis.

Tem-se como objetivo analisar p variáveis X_1, X_2, \dots, X_p e encontrar novas variáveis resultantes de combinações lineares denominadas de Z_1, Z_2, \dots, Z_p , chamadas variáveis índices ou componentes principais, que sejam não correlacionadas e que retenham a maior parte da variância existente no conjunto de dados. Isto é, que sejam capazes de expressar a maior parte da variação dos dados, desprezando-se o ruído.

$$\begin{aligned} Z_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \\ Z_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \\ &\vdots \\ Z_p &= a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \end{aligned}$$

em que: a_{ij} são os elementos correspondentes ao respectivo autovetor relacionado ao componente Z_i . Os autovalores (λ_i) são as variâncias dos componentes principais da matriz de variâncias e covariâncias dos dados originais, em que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$.

Os autovetores e autovalores são obtidos via decomposição em valor singular (DVS) da matriz de variâncias e covariâncias gerada pelos dados originais. Os primeiros componentes são os que captam a maior variação dos dados ($\text{Var}(Z_1) \geq \text{Var}(Z_2) \geq \dots \geq \text{Var}(Z_p)$), retendo, portanto, a maior parte da variação. Alcança-se sucesso na análise quando a variação existente

nos últimos componentes seja tão pequena de modo a poder ser desprezível (JOHNSON; WICHERN, 1998; MANLY; ALBERTO, 2019).

Todos os testes foram realizados no ambiente R (R CORE TEAM, 2021). Utilizou-se os pacotes FactoMineR (LE; JOSSE; HUSSON, 2008) para a ACP, e factoextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2020) para as representações gráficas da análise (Biplot). Na análise, foram utilizadas as seguintes variáveis: (1) variáveis arbóreas: diâmetro a altura do peito (DAP), altura total (Ht), área da copa (canopy area), lacuna de luz (Gap light) e (2) termografia: temperaturas obtidas no mês de agosto (Aug_temp) e temperaturas obtidas no mês de outubro (Oct_temp). A análise foi feita com os dados padronizados para terem variância unitária, afim de evitar que a magnitude de uma variável dominasse sobre as demais.

Primeiramente foi realizada a ACP para gap light e os dados de termografia para os três talhões de espécies arbóreas no sistema silvipastoril e para o talhão de pastagem, assim sendo possível observar a relação entre a entrada de radiação solar e o microclima em cada sistema. Após, foi realizada a ACP para os dados de termografia e dados dendrométricos para os três talhões de arbóreas no sistema silvipastoril para assim observar a relação entre as características morfométricas de cada espécie e o microclima proporcionado pelas mesmas.

2.3. Resultados

2.3.1. Resultados da ACP 1 - dap light e os dados de termografia

Os valores térmicos extremos (mínimas e máximas), temperatura média e a amplitude da temperatura da superfície (TS) de cada talhão, medidos pelo termógrafo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores das temperaturas mínima, máxima e média da superfície, desvio padrão e variação da temperatura dos talhões, Mojuí dos Campos, 2018

Espécies	Agosto de 2018					Outubro de 2018				
	Min	Mean	Max	SD	ΔT	Min	Mean	Max	SD	ΔT
<i>B. excelsa</i>	30.3	31.5	32.5	0.7	2.2	36.4	36.9	37.3	0.2	0.9
<i>D. odorata</i>	30.9	31.3	31.8	0.3	0.9	35.8	36.5	37.3	0.3	1.5
<i>K. grandifoliola</i>	29.2	30.0	30.7	0.5	1.5	35.8	36.3	36.7	0.2	0.9
<i>P. Maximum</i>	32.7	33.2	33.6	0.2	0.9	38.6	39.5	40.7	0.6	2.1

Min: mínima, Max: máxima, SD: desvio padrão, ΔT : variação da temperatura.

As médias de temperatura mais elevadas foram encontradas na pastagem a pleno sol (*P. maximum* cv. Mombaça) tanto para agosto quanto para outubro de 2018. Enquanto que as menores temperaturas foram encontradas no talhão de *K. grandifoliola*. A maior amplitude térmica foi encontrada no talhão de *B. excelsa* em agosto e na pastagem em outubro de 2018.

A média de lacuna de luz no dossel (n=30) foi de 30.19% para *B. excelsa*, com desvio padrão (SD) de 22.23. Para *D. odorata*, a média foi 55.27%, com SD de 19.14. Para *K. grandifoliola*, a média foi 36.21%, com SD de 9.38 e 100% de média de gap light para pastagens com (*P. maximum* cv. Mombaça), explicada pela ausência de árvores nas áreas a pleno sol.

Durante o período de coleta de dados, foi possível observar que os bovinos, principalmente nos horários mais quentes do dia, se direcionavam para as áreas sombreadas pelas árvores das três espécies estudadas. Esses dados não foram quantificados.

Na Figura 5 pode-se observar, pelo gráfico de caixas, as diferenças significativas entre os talhões avaliados. Tanto para o mês de agosto (Figura 5A), como para o mês de outubro (Figura 5B), a TS foi superior na área de pastagem a pleno sol (*P. maximum* cv. Mombaça) comparada aos talhões de integração silvipastoril (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*), no período avaliado. Nota-se também que a menor TS foi observada no talhão de integração silvipastoril com *K. grandifoliola*, sendo diferente significativamente dos demais talhões em agosto de 2018 e menor TS no talhão de *K. grandifoliola* e no talhão de *D. odorata* em outubro de 2018.

Na Figura 5C é possível observar que entre as áreas de integração silvipastoril, *D. odorata* e *K. grandifoliola* proporcionam maior entrada de luminosidade. *D. odorata* apresenta menor porte comparada às demais espécies. Além disso, apresenta folhas pequenas que possibilitam maior entrada de luz. Já *K. grandifoliola* apresentou crescimento rápido nos primeiros anos, sendo que se destaca das demais espécies em altura, contudo o tamanho e formato das folhas se equivale à *D. odorata* (Figura 3).

Com base nos resultados obtidos pela ACP, os respectivos autovalores e porcentagens da variância explicada por cada um estão apresentados na Tabela 2. A primeira ACP entre a gap light e as respostas térmicas nos três talhões contendo as espécies arbóreas no sistema silvipastoril e no talhão de pastagem a pleno sol são expressas pela ACP1.

Para a determinação do número de componentes principais, verificou-se que como os dois primeiros CPs gerados, a partir das análises que tem porcentagem de variância > 70%, seguindo recomendação de Rencher (2002), onde pelo menos 70% da variância total devem ser explicadas pelo primeiro e o segundo componentes principais.

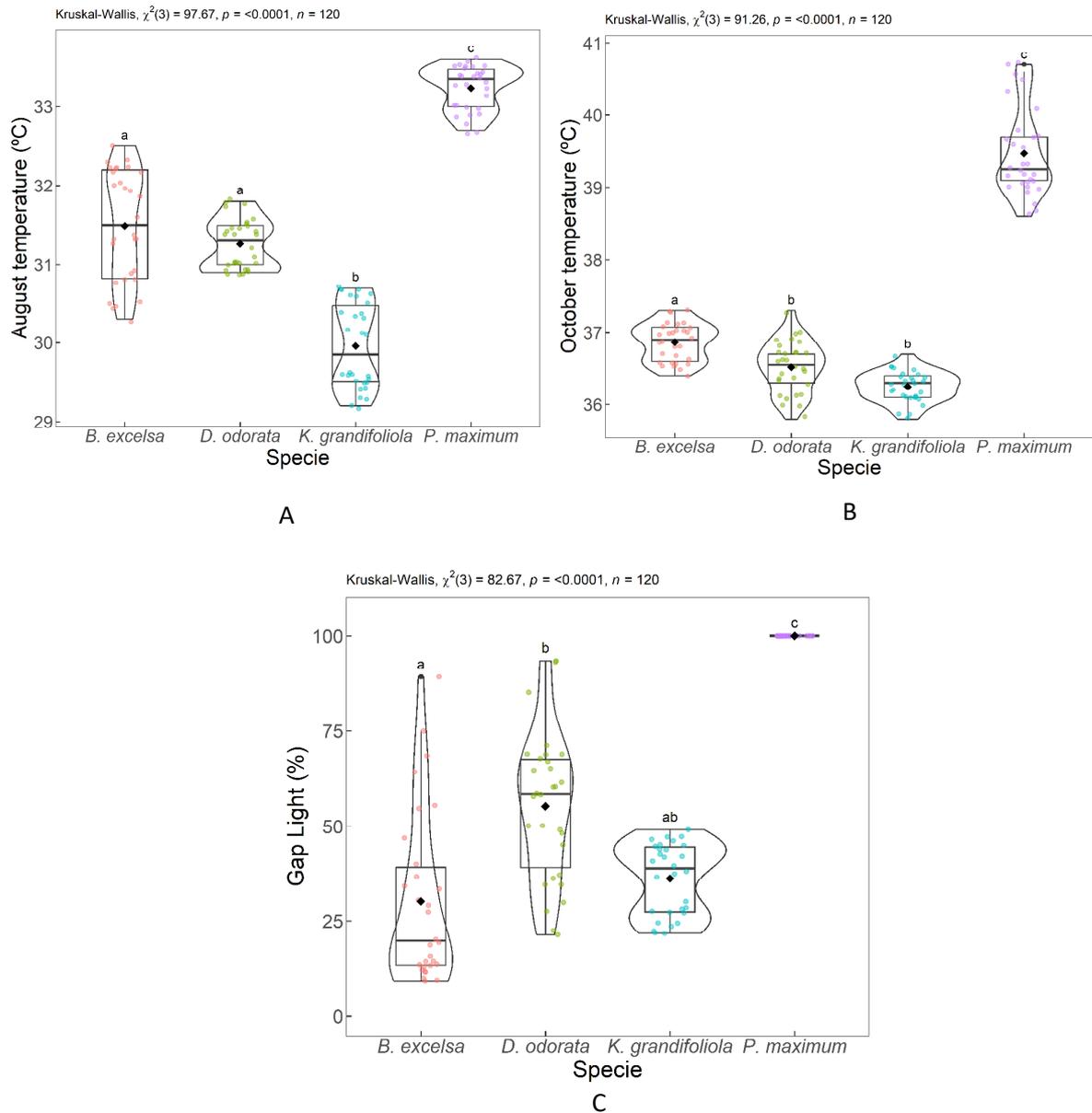


Figura 5. Gráfico de caixas para comparação do elemento climático temperatura no mês de agosto de 2018 (A), temperatura no mês de outubro (B) e gap light (C) nos talhões de integração silvipastoril (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*) e na pastagem a pleno sol (*P. maximum*). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn a 0.05 de significância.

Foi possível identificar, usando a análise de componentes principais, associações entre as variáveis observadas, estabelecendo fatores comuns entre elas. Os dois primeiros PCs foram responsáveis por 94.8% da variação total, em relação ao gap light e a temperatura nas áreas de integração silvipastoril e pastagem a pleno sol, em que o PC1 foi responsável por 84,0% e o segundo, PC2, por 10,8% das variações dos dados (Figura 6). Portanto, os dois primeiros

componentes principais resumem efetivamente a variância amostral total e podem ser utilizados para o estudo do conjunto de dados.

As variáveis que possuem correlação positiva são agrupadas no mesmo quadrante. Variáveis negativamente correlacionadas são posicionadas em quadrantes opostos. Um ângulo de 90° entre as variáveis indica que a correlação é nula, ou seja, são não correlacionadas.

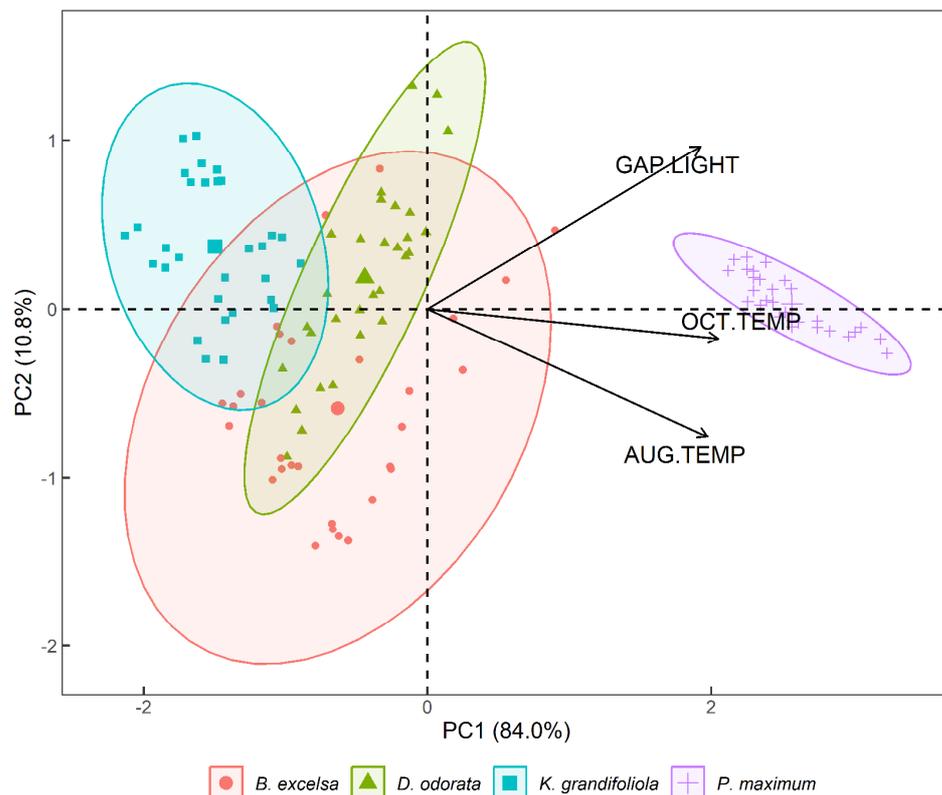


Figura 6. Gráfico biplot (CP1 E CP2) com as variáveis: temperatura no mês de agosto (AUG.TEMP) de 2018, temperatura no mês de outubro (OCT.TEMP) de 2018 e gap light nos talhões de integração silvipastoril (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*) e pastagem a pleno sol (*P. maximum* cv. Mombaça). Elipses de confiança a 95%.

No Biplot CP1 x CP2 (Figura 6), nota-se sobre o gap light nos talhões e as temperaturas medidas detectadas nos padrões termográficos, que de acordo com os dados e com a ACP1, a área de pastagem possui as temperaturas mais elevadas, principalmente no mês de outubro. Quanto as áreas de integração silvipastoril, *K. grandifoliola* foi a espécie que apresentou os menores valores tanto para gap light quanto para a temperatura nos dois meses analisados.

A *B. excelsa* se caracteriza por apresentar valores médios de gap light e temperaturas em agosto e outubro, enquanto a *D. odorata* apresenta valores baixos de temperatura e médios de gap light. Claramente a área de pastagem a pleno sol (*P. maximum*) apresenta valores distante

dos valores das demais áreas. Gap light, temperatura em agosto e temperatura em outubro estão positivamente correlacionadas.

2.3.1. Resultados da ACP 2 – variáveis dendrométricas e temperatura nos alvos analisados

Os valores médios das variáveis medidas aos 9 anos em relação ao DHC, altura total e suas respectivas incrementos médios, além da área da copa e desvio padrão, são listados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios do desempenho dendrométrico por espécie com nove anos de desenvolvimento em Mojuí dos Campos, 2018

Espécies	DHC	SD DHC	Ht	SD Ht	AC	SD AC	MAI DHC	MAI Ht
	(cm)	(cm)	(m)	(m)	(m ²)	(m ²)	(cm year ⁻¹)	(m year ⁻¹)
<i>B. excelsa</i>	15.63	5.2	10.62	2.77	41.20	18,34	1.74	1.18
<i>D. odorata</i>	13.04	2.72	8.89	1.24	19.68	9.58	1.45	0.99
<i>K. grandifoliola</i>	26.35	4.05	18.40	2.42	37.80	14.37	2.93	2.04

DHC: diâmetro mensurado a 1,30 mt do solo, SD: desvio padrão, Ht: altura total, AC: área do dossel e MAI: incremento médio anual.

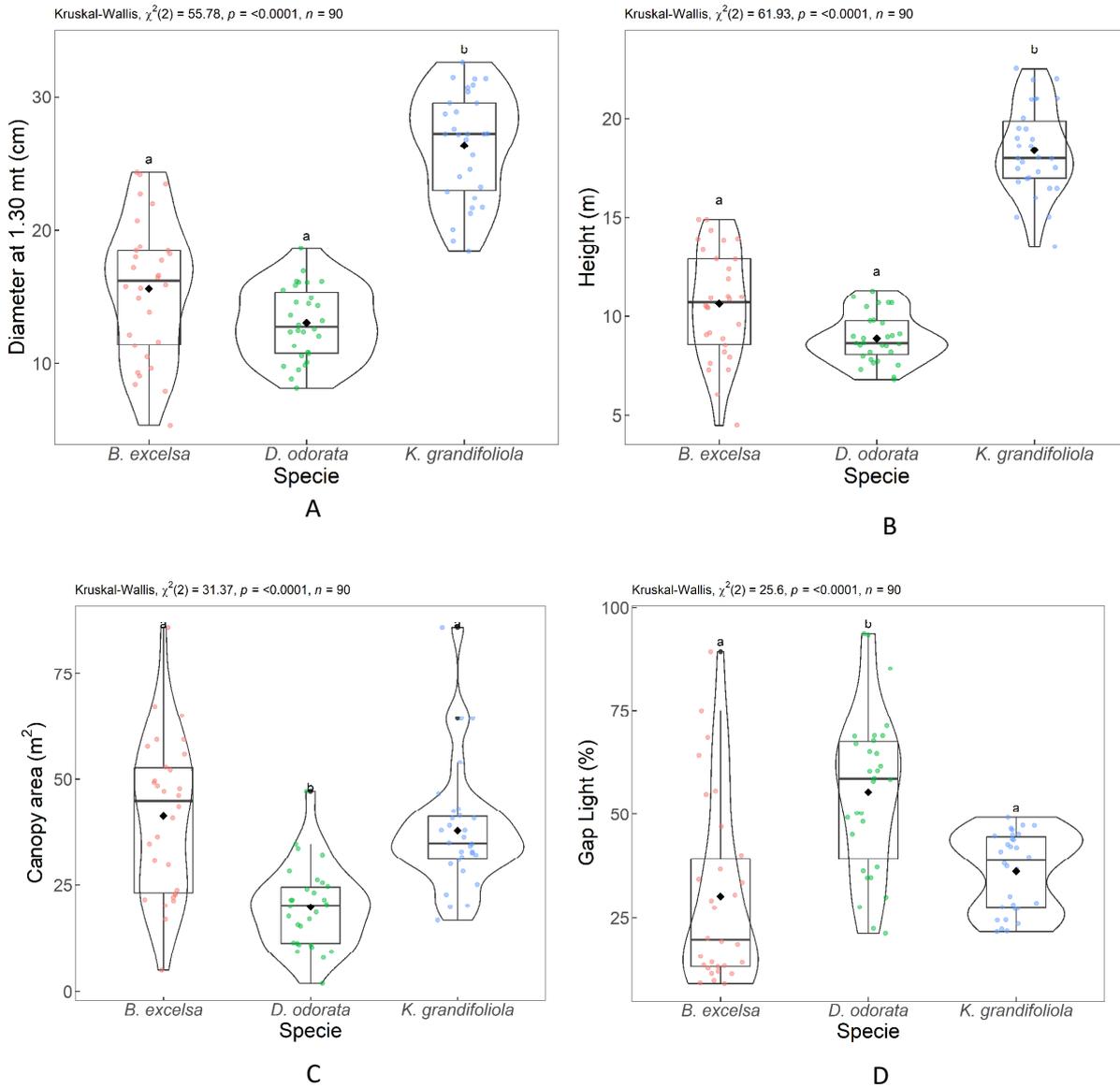
A espécie que obteve o melhor desempenho para as variáveis DHC e Height foi *K. grandifoliola*. Aos 9 anos de idade no sistema silvipastoril, *K. grandifoliola* apresentou altura média de 18,40 m e 26,35 cm de DHC. Consequentemente, os maiores incrementos médios anuais (MAI) de DHC e Height foram observados para *K. grandifoliola* (Tabela 2).

A maior média da área de copa entre as espécies foi proporcionada pela *B. excelsa* (41.20 m²), seguida por *K. grandifoliola* (37.80 m²). Variáveis como área de copa e gap light no talhão são inerentes de cada espécie de acordo com a abertura da copa, formato da mesma, dimensões e sobreposições das folhas e galhadas, entre outros.

Pelo gráfico de caixas, pode-se verificar que para as variáveis DHC e Height, a espécie *K. grandifoliola* difere significativamente da *B. excelsa* e da *D. odorata* (Figuras 7A e 7B) apresentando os maiores valores. Em relação a área da copa, *B. excelsa* e *K. grandifoliola* diferem significativamente de *D. odorata*, que apresenta a menor área de copa (Figura 7C). Com a menor área de copa, *D. odorata* proporciona maior entrada de luz no sistema, mensurada pela lacuna do dossel e difere das demais espécies estudadas (Figura 7D).

Quanto a temperatura, tanto para o mês de agosto (Figura 7E), quanto para o mês de outubro (Figura 7F), o talhão de *K. grandifoliola* proporciona valores de TS significativamente

menores que os demais, sendo que o talhão da espécie *B. excelsa* e o talhão de *D. odorata* não diferem entre si em agosto e *D. odorata* apresenta menor temperatura em outubro de 2018 comparando com *B. excelsa*.



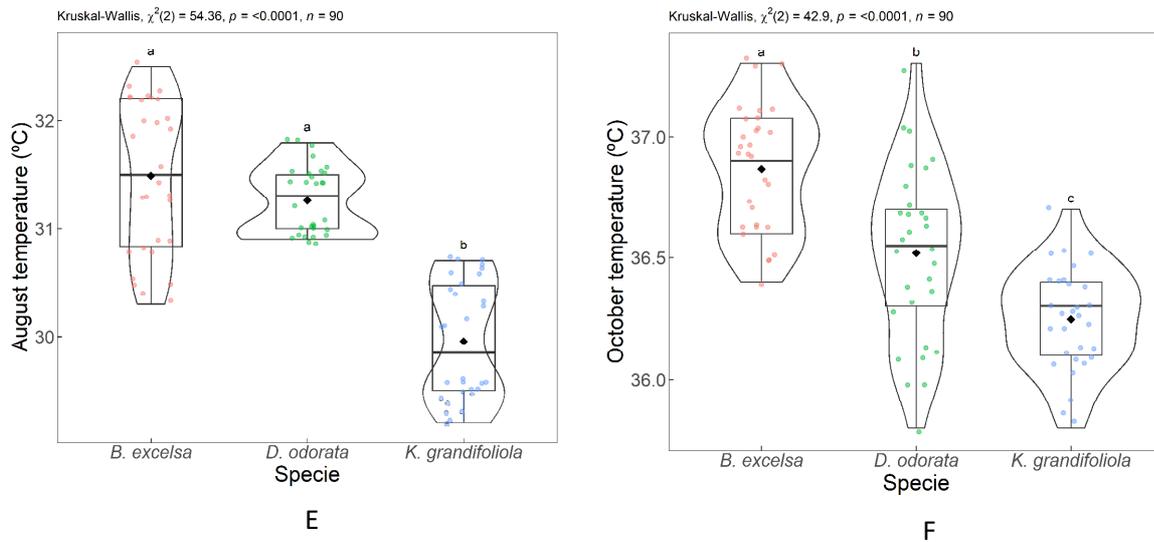


Figura 7. Gráfico de caixas para comparação das mensurações dendrométricas: diâmetro (mensurado a altura de 1.30 mt) (A), altura total (B), área da copa (C), gap light (D) e do elemento climático: temperatura no mês de agosto de 2018 (E) e temperatura no mês de outubro (F) nos talhões de integração silvipastoril (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn a 0.05 de significância.

Os resultados da segunda ACP comparam os dados térmicos com os dados dendrométricos para os três talhões de arbóreas no sistema silvipastoril, denominado ACP2, conforme apresentados na Figura 7. Os dois primeiros PCs da PCA2 foram responsáveis por 73.68% da variação total, em que o PC1 foi responsável por 51.0% e o segundo, PC2, por 22.68% das variações dos dados.

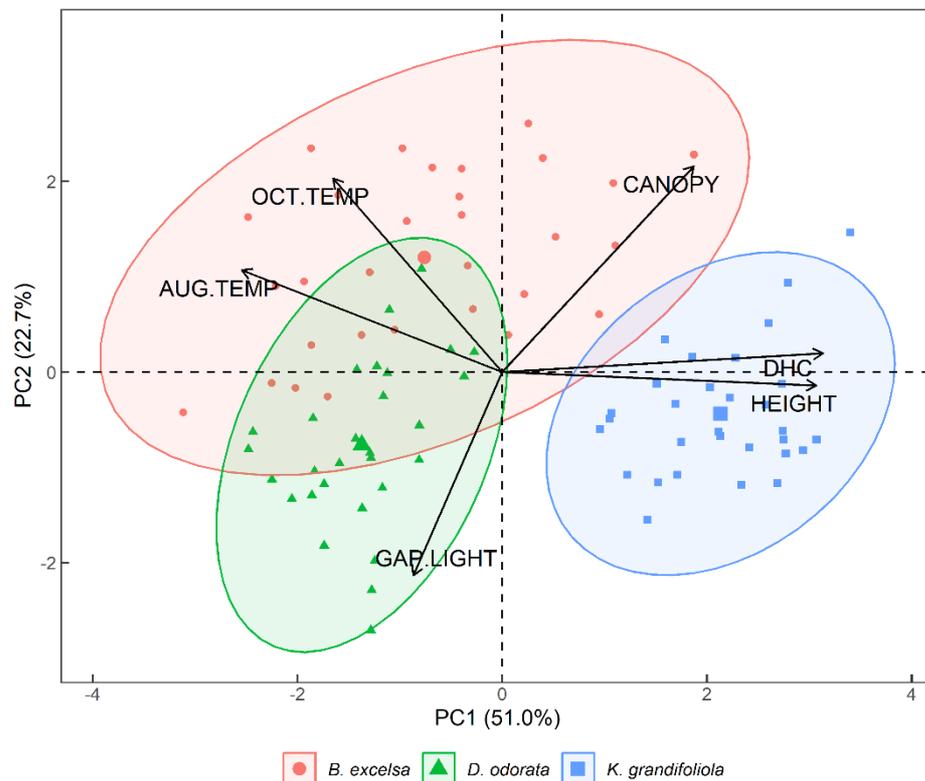


Figura 8. Gráfico biplot (CP1 E CP2) com as variáveis: temperatura no mês de agosto (AUG.TEMP) de 2018, temperatura no mês de outubro (OCT.TEMP) de 2018, lacuna de luz (gap light), área da copa (CANOPY), diâmetro mensurado a altura de 1.30 mt do solo (DHC) e altura total (HEIGHT) nos talhões de integração silvipastoril (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*). Elipses de confiança a 95%.

Analisando-se a Figura 8, que é o Biplot CP1 x CP2 com os talhões sobre o diâmetro, a altura total, gap light no talhão, área da copa, e as temperaturas detectadas pelo termógrafo no infravermelho, é evidente que de acordo com os dados e com a ACP, *K. grandifoliola* possui as maiores alturas e DHC e é a área que proporcionou as menores temperaturas tanto para o mês de agosto quanto para o mês de outubro. Entre esses três sistemas silvipastoris, as maiores temperaturas são encontradas para o sistema com *B. excelsa*, seguida da *D. odorata*. *B. excelsa*, que apresentou os menores valores para DHC e altura total.

A área que apresentou a maior entrada de luz foi a com *D. odorata* e o talhão com maior área sombreada foi o com *B. excelsa*, seguida pela área com *K. grandifoliola*.

2.4. Discussão

2.4.1. ACP 1 – lacuna de luz e temperatura nos alvos analisados

As temperaturas registradas no presente estudo não estão dentro da faixa considerada por Baêta e Souza (2010) como as melhores condições climáticas para o gado, que são temperaturas entre 10 e 27 °C, dada a alta condição térmica na região tropical.

O presente estudo amplia o conhecimento em sistema silvipastoril, em que as análises térmicas reforçam a importância do sombreamento das árvores como atenuadoras de calor, capazes de refletir em conforto térmico animal pela presença do mesmo nos talhões com as espécies arbóreas, nos horários em que as temperaturas estavam mais elevadas na pastagem a pleno sol. Também incluiu, de forma inédita, o uso da tecnologia de termografia no infravermelho próximo dentro das áreas de integração silvipastoril no oeste do estado do Pará, reforçando que há necessidade de adoção de sistemas integrados como os silvipastoris e/ou o integração lavoura-pecuária-floresta, migrando-se do sistema pecuário à pleno sol para sistemas que ofereçam melhores condições ao conforto térmico animal, onde seja possível os animais assumirem estratégias de refúgios sob a sombra das árvores inseridas no sistema produtivo.

As correlações apontadas neste estudo reforçam a existência de relações positivas entre a temperatura da superfície e a entrada de luz em sistemas silvipastoris, demonstrando que há aumento da temperatura da superfície em decorrência de alta entrada de luz solar no sistema pecuário. Para o mês de agosto, houve elevação de 10,67% na temperatura na área de *P. maximum* comparada à área de integração com *K. grandifoliola* e elevação da temperatura em 6,07% e 5,40% comparada às áreas de *B. excelsa* e *D. odorata*, respectivamente.

Contudo, existem outras relações que devem ser analisadas, pois apesar da reduzida elevação térmica entre *B. excelsa* e *D. odorata* (0,67%), na *D. odorata* há 25,08% a mais de entrada de luz. Isso pode ser explicado pelo fato de que o efeito de sombra no microclima da região sombreada não depende apenas da área sombreada, mas também da quantidade de sombra gerada, que por sua vez varia de acordo com o adensamento e coloração das folhas, número de galhos, entre outras características inerentes às espécies arbóreas (BARRETO et al., 2020).

Vários estudos apontaram relações entre variáveis microclimáticas e estado térmico de copas em florestas e pastagens (MEIER; SCHERER, 2012; BALUJA et al., 2012; ABREU-HARBICH; LABAKI; MATZARAKIS, 2015; MAES et al., 2016), negligenciar essas interações leva a erros substanciais nas medições do microclima, devido às diferenças de

temperatura estabelecidas entre a superfície terrestre e as massas de ar que se sobrepõem abaixo das copas das árvores (HAMMERLE et al., 2017).

Para o mês de outubro, também houve elevação de 10,67% na temperatura na área de *P. maximum* comparada à área de integração com *K. grandifoliola* e elevação de 8,23% e 7,05% comparada às áreas de *B. excelsa* e *D. odorata*, respectivamente. A relação entre temperatura de superfície e gap light era esperada, pois a temperatura infravermelha é uma medida relacionada à radiação de ondas longas emitidas pelas superfícies das copas das árvores (KIM et al., 2016), ou de qualquer outra superfície. Quanto maior a temperatura, maior a carga térmica imposta ao ambiente e, portanto, maior a intensidade de radiação infravermelha emitida (KARVATTE et al., 2020).

As reduções na temperatura encontradas no presente trabalho foram maiores, comparados as de Barreto et al., (2020), onde se observaram que com a presença de árvores nas pastagens, foram possíveis reduções de no máximo 3,7 % no índice de temperatura.

Segundo Silva (2006), a presença de árvores em pastagens afeta diretamente o balanço energético de um sistema e assim elas podem interceptar até 80% da radiação incidente, correspondendo a uma redução de até 30% na carga térmica radiante. Barreto et al., (2020), estudando as árvores nativas dispersas, das 12h00 às 13h00, relataram que as árvores proporcionaram uma redução de 24,0% na carga térmica radiante em julho, 16,3% em agosto e 29,6% em setembro e em sistema menos adensado de eucalipto, redução da carga térmica radiante em 15,2 % em julho, 5,3 % em agosto e 8,5 % em setembro em relação a um sistema adensado de eucalipto, com 17,0% em julho, 4,6% em agosto e 7,5% em setembro. No estado do Paraná, Brasil, Baliscai et al., (2013) encontraram, às 12h00, uma redução de 17,8 % da carga térmica incidente no sistema silvipastoril comparado ao tratamento sem sombreamento.

As duas dimensões nas quais a variância foi explicada resumem o significado do conjunto de variáveis a elas associadas, bem como estabelecem associações lineares entre elas e as variáveis originais (LEBART; PIRON; MORINEAU, 2000). As áreas sombreadas foram eficazes na redução da radiação solar corroborando com Lopes et al., (2016) e também com Oliveira et al., (2017), que descreveu que índices de conforto térmico melhoraram nos sistemas integrados como ILPF devido à redução da radiação solar causada pelas árvores. A densidade e os arranjos espaciais das árvores usadas em um sistema de produção de pastagens integradas podem proporcionar modificações microclimáticas significativas mesmo a 50 m de distância das árvores (PEREIRA et al., 2005; ABREU; LABAKI, 2010; KARVATTE et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017).

Vale destacar que as três espécies estudadas proporcionam microclima mais próximo ao apontado como ideal aos animais por permitir o conforto térmico animal, tendo a pastagem nas áreas não florestadas como exemplo dos maiores valores térmicos nos horários monitorados, utilizando-se o termógrafo.

O efeito da sombra nas atividades comportamentais de bovinos foi relatado por vários autores (BALISCEI, 2012; LOPES et al., 2016; GIRO et al., 2019; DE SOUZA et al., 2019). Em geral, os animais buscam esse recurso quando estão mais susceptíveis ao estresse térmico, bem como em épocas de maior radiação solar. A incorporação de árvores em sistemas de pastagens pode ser uma alternativa sustentável (LEMAIRE, et al., 2014) para oferecer maior conforto térmico aos bovinos criados em regiões tropicais (GARCIA, 2013).

Além de proporcionar sombra aos animais, os sistemas silvipastoris podem contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, removendo carbono da atmosfera e estocando biomassa no solo (FIGUEIREDO et al., 2017), e ainda, as árvores podem promover maior lucratividade agrícola e exploração agrícola (DUBE et al., 2012). Em estudo com búfalos (GARCIA et al., 2023), os resultados apontaram que o desenvolvimento tecnológico de sistemas que incorporam o componente arbóreo a áreas de pastagem tropicais tem mostrado que os sistemas integrados são uma excelente opção para proporcionar ambiência e maior conforto térmico para búfalas de corte e leite.

Assim, as árvores, em sistemas de produção pecuária proporciona potencialmente melhores índices de conforto térmico devido às mudanças microclimáticas proporcionadas pelo sombreamento. Porém, como os sistemas integrados possuem grande interdependência entre os componentes (solo, árvore, forragem e animal), outros fatores devem ser considerados, principalmente a tolerância à sombra da planta forrageira utilizada. O desafio é dimensionar a quantidade de sombra adequada no sistema de forma a equacionar as necessidades de cada componente.

Embora a temperatura ainda se encontrasse elevada para os bovinos, evidenciando possível desconforto para animais criados em sistemas silvipastoris tropicais, observa-se que a presença de árvores é fundamental para a melhoria de um ambiente térmico produtivo.

2.4.2. Resultados da ACP 2 – variáveis dendrométricas e os dados de termografia

K. grandifoliola apresenta desenvolvimento mais rápido comparado às espécies nativas estudadas nesse estudo (*B. excelsa* e *D. odorata*), com valores de 2.93 cm ano⁻¹ de incremento médio anual (MAI) para DHC e 2.04 m ano⁻¹ para altura total. Em Paragominas, também região norte do Brasil, com precipitação pluvial média de 1.743 mm ano⁻¹, Silva et al., (2011)

avaliaram o comportamento de *K. grandifoliola* em monocultivos (espaçamento 5 m×5 m) e em sistemas silvipastoris (cultivo de 5 m×5 m, intercaladas com faixas de 20 m onde sucessivamente consórcios de milho e braquiária *ruziziensis* foram estabelecidos), implantados em Latossolo Amarelo de textura argilosa. Os incrementos em DHC e altura total foram equivalentes a 2,0 cm ano⁻¹ e 1,5 m ano⁻¹, respectivamente, para *K. grandifoliola* em sistema silvipastoril. Nas monoculturas, as árvores de *K. grandifoliola* tiveram incremento em DHC e altura total de 1,7 cm ano⁻¹ e 1,3 m ano⁻¹, respectivamente. Esses resultados demonstram o potencial dessa espécie para ser utilizada em sistemas integrados de produção. Na presente pesquisa, o resultado de incremento de DHC e altura total de *K. grandifoliola* apresentou resultados superiores ao sistema com melhor desempenho na pesquisa citada em Paragominas (SILVA et al., 2011).

A maior área da copa média entre as espécies foi proporcionada pela *B. excelsa* (41.20 m²), que tem formato circular, não diferindo de *D. odorata*, que apresenta formato de copa globosa. Ressalta-se a importância do formato e do espaçamento entre as árvores e entre as fileiras para permitir a troca de calor no talhão. Segundo Oliveira et al., (2021), as diferenças e respectivas eficiências das espécies arbóreas em alterar o microclima se devem à estrutura e formato das copas: quanto mais densas e maiores as copas, menor a carga térmica associada à radiação solar nos sistemas. Contudo, no presente trabalho pode-se observar que mesmo que a espécie *B. excelsa* apresente maior área de copa, o rápido crescimento de *K. grandifoliola* foi mais efetivo na atenuação de calor.

A *B. excelsa* e *D. odorata*, apesar da menor atenuação de calor em comparação com *K. grandifoliola*, não deixam de ser excelentes opções para incorporar os sistemas integrados nessa região, pois são espécies nativas, ou seja, apresentam um adequado desenvolvimento e possuem demanda comercial de seus frutos. Para *B. excelsa*, por exemplo, 2,3 milhões de km² da Amazônia são potencialmente adequados para seu cultivo, baseado na existência de condições ambientais apropriadas (TOURNE, et al., 2019). É importante mencionar a aptidão que outras espécies têm em integrar o sistema silvipastoril. Martínez et al., (2010) e Tonini et al., (2016), apresentam como possibilidades, a espécie nativa *Schizolobium amazonicum* e as espécies exóticas *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Na pesquisa realizada por Tonini et al., (2016), em um sistema silvipastoril no Centro-Oeste do Brasil, as espécies de *E. grandis* e *E. urophylla* aos 3 anos de idade apresentaram DHC médio de 10,4 cm, e altura total de 10,5 m em espaçamento 3,5 x 3 m. Maneschy et al., (2009), avaliando o crescimento de *S. amazonicum* em um sistema silvipastoril amazônico no espaçamento 5 x 3 m, registraram resultados médios de 17,81 e 19,25 m de altura total e DHC de 16,83 e 19,72 cm, medidos em diferentes anos.

Em estudos comportamentais, a disponibilidade de sombra e a densidade das árvores também foram associadas a diferenças na redução da temperatura corporal em animais em pastejo sob estresse térmico (TUCKER; ROGERS; SCHÜTZ, 2008; DE SOUZA et al., 2010; ABREU; LABAKI, 2010; VAN IEAR et al., 2015; NADIN et al., 2019). Segundo relatos de Giro et al., (2019), Oliveira et. al., (2021) e Domiciano et al., (2016), quando há sombra, os bovinos preferem utilizar esse recurso para ruminção, embora algum tempo de descanso a pleno sol possa ser observado pela manhã. Esse tempo de descanso está associado principalmente à redução da geração endógena de calor (GIRO et al., 2019, VIZZOTTO et al., 2015), bem como à posição corporal do animal, com capacidade de promover maior troca térmica com o ambiente (LOPES et al., 2016; VAN IEAR et al., 2015).

Pela ACP pode-se perceber que DHC e altura total estão altamente correlacionados com as árvores de *K. grandifoliola*, e estão inversamente correlacionados com a temperatura tanto em agosto como em outubro, ou seja, essa espécie foi capaz de reduzir de forma mais eficaz a temperatura do talhão devido seu rápido desenvolvimento. A termografia no infravermelho próximo apresentou correlação positiva e direta com as variáveis dendrométricas. Os presentes resultados sugerem que a termografia no infravermelho próximo deve ser utilizada na avaliação térmica rápida de ambientes rurais.

É sabido que é difícil manter experimentos ecológicos de longo prazo que possam estabelecer indicadores em sistemas de produção de baixa emissão de carbono na Amazônia brasileira, região onde as operações pecuárias buscam atualmente se tornar mais eficientes para evitar o avanço para áreas de mata nativa. Esta área de estudo passou por um lapso de tempo sem investigação; porém, a partir dos 10 anos de plantio, muitas pesquisas foram realizadas e num futuro próximo, novos resultados para outros bioindicadores de sustentabilidade serão divulgados.

2.5. Conclusão

Os sistemas integrados silvipastoris, principalmente o formado por *K. grandifoliola*, na Amazônia Oriental, reduziram as condições de temperatura das pastagens, proporcionando um microclima mais favorável ao conforto térmico do gado devido ao sombreamento das árvores, o que beneficia a troca calórica e a manutenção do conforto térmico do gado bovino.

Este estudo demonstrou os benefícios da adoção da termografia no infravermelho próximo para diagnosticar de forma rápida e eficiente às condições térmicas em sistemas integrados no oeste do Pará. A presença de árvores no sistema silvipastoril pode contribuir para melhoria da qualidade ambiental para os animais, bem como fornece um importante serviço

ambiental que é a regulação térmica para mitigação de efeitos dos sistemas de produção pecuária no clima global. O estudo também contribui para uma melhor compreensão de como as árvores modificam o ambiente e podem prover outros bens e serviços, dependendo das espécies florestais inseridas nos sistemas pecuários integrados.

Os estudos dendroclimáticos tendem a ofertar novos resultados que expliquem outras respostas nos padrões térmicos ao longo do ano, onde os arranjos arbóreos possam explicar outros fatores associados às condições microclimáticas em cada sistema integrado, passíveis de explicar uma maior porcentagem de variações térmicas nos diferentes alvos de interesse, dependendo da abordagem científica de interesse.

Referências

- Abreu, L.V.; Labaki, L.C.; Conforto térmico propiciado por algumas espécies: avaliação do raio de influência através de diferentes índices de conforto. *Ambient Constr.* **2010**, *10*, 103–117. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400008>
- Abreu-Harbach, L.V.; Labaki, L.C.; Matzarakis, A. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape. Urban. Plan.* **2015**, *138*, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.008>.
- Altieri, M. Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável, 3rd ed. Expressão Popular, Rio de Janeiro, Brasil, 2012
- Alves, F.V.; Karvatte Jr, N., Miyagi, E.S., de Oliveira, C.C. Aplicações da Termografia por Infravermelho (TIV) na bovinocultura de corte. *Série Documentos Embrapa.* **2020**, *276*, 1-36. www.embrapa.br/fale-conosco/sac
- Armstrong, M.; Reilly, D.F.; Lelievre, T.; Hopewell, A.; (2004) Redman, L.; Francis, R.M.R. (2007) African Mahogany Grown in Australia-Wood quality and potential uses. Rural Industries Research and Development Corporation
- Baêta, F.C.; Souza, C.F. *Ambiência em Edificações Rurais: Conforto Animal*. Editora UFV, Viçosa, Brasil, 2010.
- 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. Scient. Anim. Sci.* **2013**. *35* (1), 49–56. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v35i1.15155>.
- Baliscei, M.A.; Souza, W.; Barbosa, O.R.; Cecato, U.; Krutzmann, A.; Edicarlos, O.Q. Behaviour of beef cattle and the microclimate with and without shade. *Acta Sci. Anim. Sci.* **2012**, *34*, 409–415. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v34i4.15055>.
- Baluja, J.; Diago, M.P.; Balda, P.; Zorer, R.; Meggio, F.; Morales, F.; Tardaguila, J. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrig. Sci.* **2012**, *30* (6), 511–522. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0382-9>.

Barreto, C.D.; Alves, F.V.; de Oliveira Ramos, C.E.C.; de Paula Leite, M.C.; Leite, L.C.; Junior, N. K. Infrared thermography for evaluation of the environmental thermal comfort for livestock. *International Journal of Biometeorology*, **2020**, *64*(5), 881–888. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01878-0>

Bouka, U.G.D.; Doumenge, C.; Loumeto, J.J.; Florence, J.; Gonmadje, C.; Mckey, D. Des confusions entre espèces préjudicables à la gestion durable des essences forestières: l'exemple des acajous d'Afrique (*Khaya*, Meliaceae). *Bois Forêts des Trop.* 2019, *339*, 17–32. <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31714>

Brasil, da Justiça, Diário. Decreto nº 23.296 de 06 de agosto de 2007.

Danquah, J.A.; Sarpong, D.B.; Pappinen, A. Causal relationships between African mahoganies exports and deforestation in Ghana: policy implications. *Environ Dev Sustain.* **2013**, *15*, 51–66. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9373-5>

de Azevedo, M.L.; Titon, M.; Machado, E.L.M.; de Assis Júnior, S.L.; de Freitas, E.C.S. Influence of indolbutiric acid on rooting of stem and leaf minicuttings of african mahogany (*Khaya grandifoliola* c. dc.). *Ciencia Florestal*, **2021**, *31*(2), 898–919. <https://doi.org/10.5902/1980509837225>

de Souza, E.C.; Salman, A.K.D.; da Cruz, P.G.; Veit, H.M.; de Carvalho, G.A.; da Silva, F.R. F.; Schmitt, E. Thermal comfort and grazing behaviour of Girolando heifers in integrated crop-livestock (ICL) and crop-livestock-forest (ICLF) systems. *Acta Sci. Anim. Sci.* **2019**, *41*, 1–10. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.46483>.

de Souza, W.; Barbosa, O.R.; Marques, J. de A.; Gasparino, E.; Cecato, U.; Barbero, L.M. Behaviour of beef cattle in silvipastoral systems with eucalyptus. *R. Bras. Zootec.* **2010**, *39* (3), 677–684. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000300029>.

Domiciano, L.F.; Mombach, M.A.; Carvalho, P.; Silva, N.M.F.; Pereira, D.H.; Cabral, L.S.; Lopes, L.B.; Pedreira, B.C. Performance and behaviour of Nellore steers on integrated systems. *Anim. Prod. Sci.* **2016**, *58*, 920–929. <https://doi.org/10.1071/AN16351>.

Dube, F.; Couto, L.; Silva, M.L.; Leite, H.G.; García, R.; Araújo, G.A.A. A simulation model for evaluating technical and economic aspects of an industrial eucalyptusbased agroforestry system in Minas Gerais, Brazil. *Agrofor. Syst.* **2002**, *55*, 73–80. <https://doi.org/10.1023/A:1020240107370>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasil. 2011. pp 212.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasil, 2006. pp 306.

Fábio, F.G.; Cândia, I.A.P. Manejo florestal do cumaru: um experimento rentável e sustentável em Óbidos, Estado do Pará. *Ensaios nas Ciências Agrárias e Ambientais*, 8, Atena Editora, Ponta Grossa, Brasil, 2019. pp. 38-50.

Figueiredo, E.B.; Jayasundara, S.; Bordonal, R.O.; Reis, R.A.; Wagner-Riddle, C.; La Scala, N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-

management systems in Brazil. *J. Clean. Prod.* **2017**, *142*, 420–431. [dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132).

Garcia, A. Thermal comfort on reproductive processes of water buffaloes raised under tropical conditions. *Rev. Bras. Reprod. Anim.* **2013**, *37(43)*, 121–130.

Garcia, A.R.; Silva, L.K.X.; Barros, D.V.; Lourenço Junior, J.B.; Martorano, L. G.; Lisboa, L.S.S.; Silva, J.A.R.; Sousa, J.S.; Silva, A. O.A. Key points for the thermal comfort of water buffaloes in Eastern Amazon. *Ciência rural*, **2023**, *53*, 1–18.

Gersony, J.T.; Prager, C.M.; Boelman, N.T.; Eitel, J. U. H.; Gough, L.; Greaves, H. E.; Griffin, K. L.; Magney, T. S.; Sweet, S. K.; Vierling, L. A.; Naeem, S. Scaling thermal properties from the leaf to the canopy in the Alaskan Arctic tundra. *Arctic. Antarct. Alp. Res.* **2016**, *48 (4)*, 739–754. <http://www.bioone.org/doi/10.1657/AAAR0016-013>.

Giro, A.; Pezzopane, J.R.M.; Barioni Jr.; W.; Pedroso, A.de.F.; Lemes, A.P.; Botta, D.; Romanello, N.; Barreto, A.do.N.; Garcia, A.R. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. *Sci. Total Environ.* **2019**, *684*, 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377>.

Hall, J.S. Seed and seedling survival of African mahogany (*Entandrophragma* spp.) in the Central African Republic: Implications for forest management. *For Ecol Manage* **2008**, *255*, 292–299. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2007.09.050>

Hall, J.S.; Harris, D.J.; Medjibe, V.; Ashton, P.M.S. The effects of selective logging on forest structure and tree species composition in a Central African forest: implications for management of conservation areas. *For Ecol Manage.* **2003**, *183*, 249–264. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00107-5)

Hammerle, A.; Meier, F.; Heidl, M.; Egger, A.; Leitinger, G. Implications of atmospheric conditions for analysis of surface temperature variability derived from landscape-scale thermography. *Int. J. Biometeorol.* **2017**, *61 (4)*, 575–588. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1234-8>.

Harder, I.C.F.; Ribeiro, R.C.S.; Tavares, A.R. Índices de área verde e cobertura vegetal para as praças do município de Vinhedo, SP. *Revista Árvore* **2006**, *30 (2)*, 277–282. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200015>.

Hu, L.; Zhu, J. Improving gap light index (GLI) to quickly calculate gap coordinates. *Canadian Journal of Forest Research*, **2008**, *38*, 2337–2347. <https://doi.org/10.1139/X08-073>

Johnson, R.A.; Wichern, D.W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 4rd. ed. Prentice Hall: New Jersey, United States, 1998.

Karvatté Jr, N., Miyagi, E.S., de Oliveira, C.C., Barreto, C.D., Mastelaro, A.P., Bungenstab, D.J., Alves, F.V., 2020. Infrared thermography for microclimate assessment in agroforestry systems. *Sci. Total Environ.* **2020**, *731*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139252>

Karvatté, N.; Klosowski, E.S.; de Almeida, R.G.; Mesquita, E.E.; Oliveira, C.C.; Alves, F.V. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. *Int. J. Biometeorol.* **2016**, *60*, 1933–1941. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1180-5>

Kasongo Yakusu, E.; Monthe, F.S.; Bourland, N.; Hardy, O. J.; Louppe, D., Bola Mbele Lokanda, F.; Hubau, W.; Kahindo Muhongya, J.-M.; van den Bulcke, J.; van Acker, J.; Beeckman, H. Entandrophragma: taxonomy and ecology of a genus of African tree species with economic importance. A review. *In Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **2021**, *25*, 140-153.

Kassambara, A.; Mundt, F. (2020). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

Kim, J.; Song, I.; Kim, C.; Gho, H.; An, S.; Song, D.; Joung, D.; Kang, S.; Yi, Y.; Park, B. J.; Song, C. Thermal Comfort and Human Responses according to Tree Density in Forest Environments during and after Physical Activities in the Summer. *Forests*, **2023**, *14*. <https://doi.org/10.3390/f14010120>

Kim, Y.; Still, C.J.; Hanson, C.V.; Kwon, H.; Greer, B.T.; Law, B.E. Canopy skin temperature variations in relation to climate, soil temperature, and carbon flux at a ponderosa pine forest in central Oregon. *Agric. For. Meteorol.* **2016**, *226–227*, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.06.001>.

Kovács, B.; Tinya, F.; Ódor, P. Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *234–235*, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.268>.

Lameira, M.K.S.; Silva, H.K.M.; Gomes, K.M.A.; Ferreira, A.C.T.; Martorano, L.G.; Ribeiro, R.B.S.; Silva, A.R.; Gama, J.R.V. Capacidade produtiva de *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. em sistema de produção de pecuária integrada no Baixo Amazonas. *Revista Forestal Mesoamerica Kuru-Rfmk* **2022**, *19*, 56-65. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/6102>

Le, S.; Josse, J.; Husson, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, **2008**, *25(1)*, 1-18. [10.18637/jss.v025.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01). <https://core.ac.uk/download/pdf/6303121.pdf>

Lebart, L.; Piron, M.; Morineau, A. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Dunod, Paris, France, 2000, pp 439.

Lees, A.M.; Lees, J.C.; Sejian, V.; Sullivan, M.L.; Gaughan, J.B. Influence of shade on panting score and behavioural responses of *Bos taurus* and *Bos indicus* feedlot cattle to heat load. *Anim. Prod. Sci.* **2020**, *60*, 305–315. <https://doi.org/10.1071/AN19013>.

Lemaire, G.; Franzluebbers, A.; Carvalho, P.C.deF.; Dedieu, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **2014**, *190*, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>

Lemmens, R.H.M.J.; Louppe, D. Oteng-Amoako, A.A. Plant Resources of Tropical Africa 7. Timbers 2, 2nd edn. PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands, 2012.

Lopes, L. B.; Eckstein, C.; Pina, D. S.; Carnevalli, R. A. The influence of trees on the thermal environment and behaviour of grazing heifers in Brazilian Midwest. *Tropical Animal Health and Production*, **2016**, *48*, 755–761. <https://doi.org/10.1007/s11250-016-1021-x>

- Maes, W.H., Baert, A., Huete, A.R., Minchin, P.E.H., Snelgar, W.P., Steppe, K., 2016. A new wet reference target method for continuous infrared thermography of vegetations. *Agric. For. Meteorol.* **2016**, 226–227, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.021>
- Manaye, A.; Tesfamariam, B.; Tesfaye, M.; Worku, A.; Gufi, Y. Tree diversity and carbon stocks in agroforestry systems in northern Ethiopia. *Carbon Balance and Management* **2021**, 16, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00174-7>
- Maneschy, R.; da Veiga, J.; de Santana, A. Evaluation of growth of parica (*Schizolobium amazonicum* Huber) and teca (*Tectona grandis* L.f.) in silvipastoral systems in northeastern Pará, Luziânia, Brasil. **2009**, Dialogue and Integration of Knowledge in Agroforestry Systems for Sustainable Societies. Manaus: SBSAF. <http://www.sct.embrapa.br/cdagro/tema01/01tema15.pdf>
- Manly, B.F.J.; Alberto, J.A.N. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 4rd. ed. Bookman: Porto Alegre, Brasil, 2019. pp.254.
- Martínez, G.B.; Junior, M. M.; Junior, S.B. Selection of multipurpose forest species ideotypes of the floodplains in the Low Amazon Basin, Pará. *Acta Amazôn.* **2010**, 40(1), 65-74. www.researchgate.net/publication/262514205
- Martorano, L.G.; Nechet, D.; Pereira, L.C. Tipologia climática do Estado do Pará: adaptação do método de Köppen. *Boletim de Geografia Teorética*, **1993**, 23, 45-46.
- Martorano, L.G.; Vitorino, M.I.; da Silva, B.P.P.C.; de Moraes, J.R.S.C.; Lisboa, L.S.; Sotta, E.D.; Reichardt, K. Climate conditions in the eastern amazon: Rainfall variability in Belem and indicative of soil water deficit. *African Journal of Agricultural Research*, **2017**, 12, 1801-1810.
- Meier, F.; Scherer, D.; Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. *Theor. Appl. Climatol.* **2012**, 110 (3), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0631-0>
- Montagnini, F.; Metzel, R. Integrando Paisagens: Agroflorestas para Conservação da Biodiversidade e Soberania Alimentar; Springer: Cham, Suíça, 2017. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Integrating+Landscapes:+Agroforestry+for+Biodiversity+Conservation+and+Food+Sovereignty&author=Montagnini,+F.&author=Metzel,+R.&publication_year=2017
- Nadin, L.; Chopa, F.S.; Agnelli, M.L.; da Trindade, J.K.; Gonda, H. Effect of sward height on short-term intake by steers grazing winter oat pastures. *Livest. Sci.* **2019**, 225, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.04.018>.
- Neves, E.S.; Guedes, M.C.; Rodrigues, E.G.; Relação da produção de frutos de castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* bonpl.) com variáveis das próprias castanheiras, em capoeira e floresta da Resex Cajari. *Biota Amazônia* **2015**, 5, 31–37. <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v5n2p31-37>
- Ngao, J.; Adam, B.; Saudreau, M. Intra-crown spatial variability of leaf temperature and stomatal conductance enhanced by drought in apple tree as assessed by the RATP model. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, 237–238, 340–354. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.036>.
- Oliveira, C. C.; Alves, F. V.; de Almeida, R. G.; Gamarra, É. L.; Villela, S. D. J.; Martins, P. G. M. de A. Thermal comfort indices assessed in integrated production systems in the Brazilian

savannah. *Agroforestry Systems*, **2017**, 92(6), 1659–1672. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0114-5>

Oliveira, C.C.; Almeida, R.G.; Karvate Junior, N.; Villela, S.D.J.; Bungenstab, D.J.; Alves, F.V. Daytime ingestive behaviour of grazing heifers under tropical silvopastoral systems: Responses to shade and grazing management. *Applied Animal Behaviour Science* **2021**, 240. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2021.105360>

Oliveira, C.C.de, Alves, F.V., Martins, P.G.M.de.A., Karvate Junior, N., Alves, G.F., Almeida, R.G.de., Mastelaro, A.P., Costa e Silva. Vaginal temperature as indicative of thermoregulatory response in Nellore heifers under different microclimatic conditions. *PLoS ONE*, **2019**, 14 (10), 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223190>.

Organização das Nações Unidas. Transformando o nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Resolução A/RES/70/1. Nova Iorque: UN; 2015. <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>

Pennington, T.D.; Cheek, M. *Khaya grandifoliola* C. DC. Pará, 2015. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual/ConsultaPublicoHVUC/ConsultaPublicoHVUC.do?idTestemunho=4658185>

Pereira, L.M.R.; Fischer, V.; Moreno, C.B.; Pardo, M.P.; Gomes, J.F.; Monks, P.L. Diurnal ingestive behavior of Jersey heifers fed diferente supplements. *Rev. Bras. Agrocienc.* **2005**, 11, 453–459. <https://doi.org/10.18539/cast.v11i4.1285>.

Pezzopane, J.R.M., Bernardi, A.C.C., Bosi, C., Oliveira, P.P.A., Marconato, M.H., Pedroso, A.F., Esteves, S.N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. *Agrofor. Syst.* **2019**, 93, 39–49. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>

Pinheiro, L.P.; Couto, L.; Pinheiro, D.T.; Brunetta J.M.F.C.; Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos africanos (*Khaya* spp.). Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura (SBAG), 2011. pp 102.

Pinto, J.; Encinas, I.; Silva, G. Age and growth of trees. *Tech. For. Commun.* **2005**, 7(1), 43. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/10018>

Poorter, L.; Bongers, F.; Kouamé, F.N.; Hawthorne, W.D.; Biodiversity of West African forests: an ecological atlas of woody plant species. CABI Publishing, Oxford, UK, 2004. pp 528.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2021. Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Renaud, V.; Innes, J.L.; Dobbertin, M.; Rebetez, M. Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland for different types of forests over 10 years (1998-2007). *Theor. Appl. Climatol.* **2011**, 105 (1), 119–127. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0361-0>.

Rencher, A.C. *Methods of Multivariate Analysis*. A John Wiley & Sons, Inc. Publication. pp. 727. 2ed. 2002

Schütz, K.E.; Rogers, A.R.; Poulouin, Y.A.; Cox, N.R.; Tucker, C.B. The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. *J. Dairy Sci.* **2010**, *93*, 125–133. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2416>.

Scoles, R. Ecologia e Extrativismo da Castanheira (*Bertholletia excelsa*, Lecythidaceae) em duas regiões da Amazônia Brasileira. Tese de Doutorado em Biologia (Ecologia), Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, Brazil, 2010. pp 193.

Silanikove, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Liv. Prod. Sci.* **2000**, *67*, 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00162-7).

Silva, A.A.; Santos, M.K.V.; Gama, J.R.V.; Noce, R.; Leão, S. Potencial do extrativismo da castanha-do-pará na geração de renda em comunidades da mesorregião baixo Amazonas, Pará. *Floresta e Ambiente* **2013**, *20* (4), 500-509. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.046>.

Silva, A.R.; Sales, A.; Alberto, C.; Veloso, C.; Jorge, E.; Carvalho, M.; Pinheiro, E.; Marco, B. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica de um latossolo amarelo sob sistemas integração lavoura-pecuária-floresta. *Journal of Agronomic Sciences* **2015**, *4*, 144-157. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125909/1/13.pdf>

Silva, A.R.; Veloso, C.A.C.; Carvalho, E.J.M.; Alves, L.W.R.; Azevedo, C.M.B.C.; Fernandes, P.C.C. Comportamento da espécie mogno africano (*Khaya ivorensis*) em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no município de Paragominas - PA. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais. SBSAF, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Brasil, 2011.

Silva, E.C.; Gama, J. R.V.; Rode, R.; Coelho, A.L.; Coelho, M. Tree species growth in a silvipastoral system in Amazon. *African Journal of Agricultural Research* **2018**, *13*, 95-103. <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/D8BA09155677>

Silva, J.C.N.; Silva, A.R.; Veloso, C.A.C.; Dantas, E.F.; do Sacramento, J.A.A.S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **2018**, *22*(12), 837–842. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p837-842>.

Silva, M.G da.; Zaidan, Ú.R.; Borges, C.T.; Silva, J.A da.; Resende, R.T.; Venturoli, F.; Pires, P.P. Indolbutyric Acid (IBA) in the African Mahogany (*Khaya grandifoliola* C. DC.) cuttings and mini-cuttings development. *Advances in Forestry Science*, **2020**, *7*, 1009- 1016. <https://doi.org/10.34062/afs.v7i2.9793>

Silva, R.G.; Predição da configuração de sombras de árvores em pastagens para bovinos. *Eng Agric.* **2006**, *26*, 36–281. <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/27779/S0100-69162006000100029.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Silva, T.M.; Jardim, F.C.S.; Silva, M.S. Shanley, P. O mercado das amêndoas de *Dipteryx odorata* (cumaru) no estado do Pará, *Floresta* **2010**, *40*, 603-614. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v40i3.18922>

Sousa, B.C.M.; Barata, L.E.S.; Macêdo, C G.; Fraga, S.S.; Kasper, A.A.M.; Lourido, K.A.; Paulino, G.S.; Almeida, E.C.; Sartoratto, A.; Lustosa, D.C. Avaliação do teor de Cumarina e atividade antifúngica de frações de Óleo de Cumaru”, *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais* **2018**, *9*, 63-69.

Tonini, H.; Sartori, W.; Anjos, A.; Morales, M.; da Silva, V. Performance and quality of wood in a clone of Eucalyptus in monoculture and silvipastoral system. *Nativa* **2016**, *4*(2), 77-81.

Tourne, D. C. M.; Ballester, M. V. R.; James, P. M. A.; Martorano, L. G.; Guedes, M. C.; Thomas, E. Strategies to optimize modeling habitat suitability of *Bertholletia excelsa* in the Pan-Amazonia. *Ecology and Evolution*, **2019**, *9*, 12623–12638. <https://doi.org/10.1002/ece3.5726>

Tucker, C.B.; Rogers, A.R.; Schütz, K.E. Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. *Appl. Anim. Behav. Sci.* **2008**, *109*, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2007.03.015>

Van Iear, E.; Moons, C.P.H.; Ampe, B.; Sonck, B.; Vandaele, L.; de Campeneere, S.; Tuytens, F.A.M. Effect of summer conditions and shade on behavioural indicators of thermal discomfort in Holstein dairy and Belgian Blue beef cattle on pasture. *Animal* **2015**, *9*, 1536–1546. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000804>.

Vizzotto, E.F.; Fischer, V.; Thaler Neto, A.; Abreu, A.S.; Stumpf, M.T.; Werncke, D.; Schmidt, F.A.; McManus, C.M. Access to shade changes behavioural and physiological attributes of dairy cows during the hot season in the subtropics. *Animal* **2015**, *9*, 1559–1566. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000877>.

CAPÍTULO III - Carbono e metano como indicadores de eficiência ambiental em Sistema de Integração Pecuária-Floresta no oeste da Amazônia, Brasil³

Resumo: Os sistemas pecuários são apontados como grandes emissores de gases de efeito estufa em decorrência das extensas áreas com pastagens degradadas. Objetivou-se neste trabalho analisar os fluxos de carbono e metano para atmosfera como estratégia de apontar indicadores de sustentabilidade ambiental em sistemas silvipastoris. Foram monitorados os fluxos de CO₂ e de CH₄ do solo para atmosfera, tendo como referência a pastagem degradada (sendo *Panicum maximum* cv. Mombaça, a espécie predominante) a pleno sol, comparando-se os valores nos talhões com espécies arbóreas (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*) e pastagem produtiva (*Panicum maximum* cv. Mombaça) com talhões a pleno sol. A área de estudo localiza-se no município de Mojuí dos Campos, no oeste do estado do Pará, na Amazônia Oriental, Brasil. As avaliações foram realizadas na Unidade de Referência Tecnológica (URT) com sistema silvipastoril, onde os animais usam a sombra das árvores nos horários de maior carga térmica. Os fluxos foram medidos através de Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA) acoplado as câmeras estáticas de PVC instaladas na interface solo-ar. Verificou-se que os talhões com cultivo integrado de *B. excelsa* + pastagem e *K. grandifoliola* + pastagem foram os maiores atenuadores da emissão de CO₂ e que a maior emissão ocorreu na área de pastagem degradada, sendo que as maiores emissões ocorreram nos meses mais chuvosos. Os fluxos de CH₄ ocorreram com mais intensidade nas áreas de pastagem degradada e na integração com *K. grandifoliola*. A conversão de áreas de pastagens degradadas em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta reduziu as emissões de gases de efeito estufa na Amazônia aos 10 anos. A implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em áreas desmatadas há décadas, com pastagens degradadas e baixa capacidade produtiva, aponta alto potencial de mudança com o foco em desenvolver uma agropecuária sustentável na Amazônia.

Keywords: pecuária sustentável; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; gases de efeito estufa.

³ Trabalho publicado em: CÂNDIDO, A.C.T.F.; DA SILVA, T.A.; CÂNDIDO, B.U.F.; TAPAJÓS, R.; CHAVES, S.S.N.F.; SILVA, A.R.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C.T.D.S.; FERNANDES, P.C.C.; DIAS-FILHO, M.B.; LISBOA, L. S. S.; ALMEIDA, R. G.; MOURA, J. M. S.; BELDINI, T. P.; MARTORANO, L. G. Carbon and Methane as Indicators of Environmental Efficiency of a Silvopastoral System in Eastern Amazon, Brazil. *Sustainability* 2024, 16, 2547. <https://doi.org/10.3390/su16062547>

Abstract: Livestock systems have been identified as major emitters of greenhouse gases due to the use of extensive areas with degraded pastures. The objective of this study was to analyze carbon (CO₂) and methane (CH₄) fluxes in the atmosphere as indicators of environmental sustainability in silvopastoral systems. CO₂ and CH₄ fluxes from soil to the atmosphere were monitored in a degraded pasture (predominant species: *Panicum maximum* cv. Mombaça) grown in full sun and compared with areas with tree species (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, and *Khaya grandifoliola*) and productive pasture (*Panicum maximum* cv. Mombaça) grown in full sun. The study area was in Mojuí dos Campos, western Pará state, Eastern Amazon, Brazil. The evaluations were conducted in a Technological Reference Unit with a silvopastoral system, where animals used the shade of trees during high-temperature periods. The fluxes were measured using an ultraportable greenhouse gas analyzer coupled with static polyvinyl chloride ring chambers installed at the soil–air interface. In conclusion, areas with integrated systems (*B. excelsa* + pasture and *K. grandifoliola* + pasture) were better mitigators of CO₂ emissions; the highest emissions occurred in the degraded pasture area during the rainiest months. The CH₄ fluxes were more intense in the areas with degraded pasture and *K. grandifoliola* + pasture. Converting degraded pasture areas into integrated crop–livestock–forest systems reduced greenhouse gas emissions in the Amazon over 10 years of implementation. The implementation of integrated crop–livestock–forest systems in long-deforested areas with degraded pastures and a low production capacity showed high potential for changes focused on developing sustainable agriculture in the Amazon.

Keywords: forages; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; greenhouse gases

3.1. Introdução

Os crescentes aumentos das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera apontam fortes indicadores do efeito antrópico, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas naturais em decorrência de potenciais mudanças climáticas (Nan et al. 2020). A preocupação com a mudança do clima se destaca, considerando que o setor agrícola é responsável por 33,6% das emissões brasileiras de GEE (MCTI, 2021).

Em 2009, o governo brasileiro estabeleceu um plano estratégico nacional, o Plano ABC, especificamente “Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixo Carbono na Agricultura”, de acordo com a Política Nacional de Mudanças Climáticas como parte da ação do Brasil para mitigar as emissões de GEE e mitigar o

aquecimento global (Embrapa, 2022), atualmente denominado Plano ABC + (Plano de adaptação e baixas emissões de C na agricultura 2020-2030) (MAPA, 2021).

Além disso, o Brasil aderiu ao Global Methane Pledge, (Global Methane Pledge, 2021), que tem como objetivo principal tomar ações voluntárias para contribuir ao esforço coletivo e reduzir as emissões globais de CH₄ em pelo menos 30% dos níveis de 2020 até 2030, o que poderia baixar mais de 0,2°C do aquecimento global até 2050 (Oliveira et al. 2022).

Entre os GEE, o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são os mais importantes no contexto da atividade agrícola. Embora as concentrações de CH₄ na atmosfera sejam inferiores às do CO₂, ele tem potencial de aquecimento 27,2 vezes maior que o do CO₂ (IPCC, 2022). O CH₄ pode ser classificado como um “poluente climático de vida curta”, tendo uma vida relativamente curta (8-12 anos) na atmosfera em comparação com o CO₂, que pode permanecer por períodos de até 10.000 anos até retornar no ciclo global do carbono (Artaxo, 2014).

A atividade agrícola enfrenta, como principal desafio, a necessidade de aumentar a produção de alimentos para satisfazer a crescente população mundial (Giller et al. 2021), ao mesmo tempo que se adapta às mudanças ambientais e econômicas, melhorando o desempenho animal em sistemas de produção mais sustentáveis (Sakita et al. 2022).

Entre as questões que envolvem o crescimento do setor da agropecuária está o aumento do uso e degradação dos recursos naturais. Esse aumento contribui diretamente para o agravamento do cenário de alterações climáticas globais devido às emissões de GEE, esgotando os recursos hídricos, causando a erosão dos solos e prejudicando os habitats naturais (IPCC, 2022).

Outro importante fator de mudanças no aquecimento global é o desmatamento em regiões tropicais. O desmatamento na Amazônia brasileira está principalmente relacionado à conversão de florestas em pastagens (Fearnside, 2015; Nesptad et al., 2014). Após o cultivo por alguns anos, os solos desta região reduzem a produtividade das espécies forrageiras, que quando não é feita a recuperação da pastagem, pode trazer como consequência o abandono de áreas que passam pelo processo de pousio, transformando-se com o tempo em florestas secundárias (Ferreira Júnior et al. 2017).

As mudanças no uso da terra alteram as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, modificando os fluxos de GEE (Kim e Kirschbaum, 2015). Para mitigação dos efeitos, é necessário o uso de práticas conservacionistas como plantio direto e adoção de sistemas integrados (Kim et al. 2016, Glatzle et al. 2021). Essas práticas, devido ao aporte de matéria orgânica, aumentam a porosidade do solo (Santos et al., 2016; Smith, 2017) e,

consequentemente, elevam sua aeração e pH, reduzem as plantas daninhas e na presença de leguminosas, incorporam N no sistema (Hickman et al., 2015; Carvalho et al., 2017).

O sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) tem apontado múltiplos benefícios, como melhoria na ciclagem e aumento da eficiência no uso de nutrientes, produção diversificada e menor impacto ambiental, explicando a expansão de áreas com esses arranjos produtivos integrados (Carvalho et al. 2010; Franzluebbbers e Stuedemann, 2014; Moraes et al. 2014). Além disso, a ILPF tem sido citada entre as estratégias de produção de alimentos com baixa emissão de GEE (Brasil, 2016; de Azevedo et al. 2018).

Para Nair et al. (2011) e Peters et al. (2013), os sistemas agrossilvipastoris e os silvipastoris são tipos de sistemas ILPF que podem reduzir e compensar as emissões de GEE do setor agrícola brasileiro, por utilizar de forma integrada a pecuária com a floresta. Esses sistemas reduzem os níveis de emissões animais (Nair et al. 2011), mitigam as emissões de CH₄ provenientes da fermentação entérica (Bernardi et al. 2016) e a eficiência da digestão animal (Tornton e Herrero, 2010). Além disso, estes sistemas podem mitigar as emissões de GEE pelo sequestro de carbono, decorrente do aporte de biomassa acima e abaixo do solo (Dube et al. 2012, Paula, et al. 2013, Nair, 2012).

Inexistem até o presente momento, medidas de fluxo em sistemas integrados na Amazônia Oriental. O cálculo das emissões decorrente de cada componente de uso de terra, fornece subsídios aos gestores com vista a atingir metas para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa nos sistemas de produção em nível regional, nacional e global. Muitas vezes, estas estimativas de emissões baseiam-se em modelos simplificados e em dados estimados, devido à falta de dados, a partir de monitoramento em campo.

Objetivou-se neste trabalho analisar os fluxos de dióxido de carbono e metano para atmosfera como estratégia de apontar indicadores de sustentabilidade ambiental pela adoção do sistema silvipastoril na Amazônia Oriental.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Área de estudo

Os dados foram obtidos, a partir de campanhas de coletas de dados na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, localizada nas coordenadas geográficas 02°38'11" S e 54°56'13" W, uma propriedade privada, que possui áreas que pertencem ao município de Belterra e de Mojuí dos Campos, no estado do Pará, Brasil. As amostragens de campo foram realizadas na Unidade de Referência Tecnológica (URT) contendo um sistema de ILPF, caracterizado como silvipastoril, onde os animais utilizam os talhões florestais para abrigo, principalmente nos horários de alta

incidência dos raios solares. A Embrapa Amazônia Oriental instalou a URT em 2010, a partir de uma parceria com o Produtor Rural, para introduzir na região oeste do Pará um sistema de produção pecuário integrado, exatamente no contexto das ações de baixa emissão de carbono na Amazônia, no âmbito do Programa ABC (Embrapa, 2022).

A área está localizada a 152 metros de altitude e sob condições climáticas típicas de Am3 de acordo com a metodologia de Köppen adaptada por Martorano et al. (2017), evidenciando que no mês menos chuvoso os valores de precipitação são inferiores a 60 mm, com chuvas anuais variando entre 1.500 a 2.000 mm. A área localiza-se dentro do raio de ação da estação meteorológica de Belterra (Código Instituto Nacional de Meteorologia - INMET - 82246), as temperaturas médias apresentaram valores de 25,2°C com máximas variando entre 29,4°C a 29,9°C e mínimas, oscilando entre 20,6 a 21,2 °C (Martorano et al., 2021). A classe de solo na área de estudo é o Latossolo Amarelo textura argilosa (EMBRAPA, 2006).

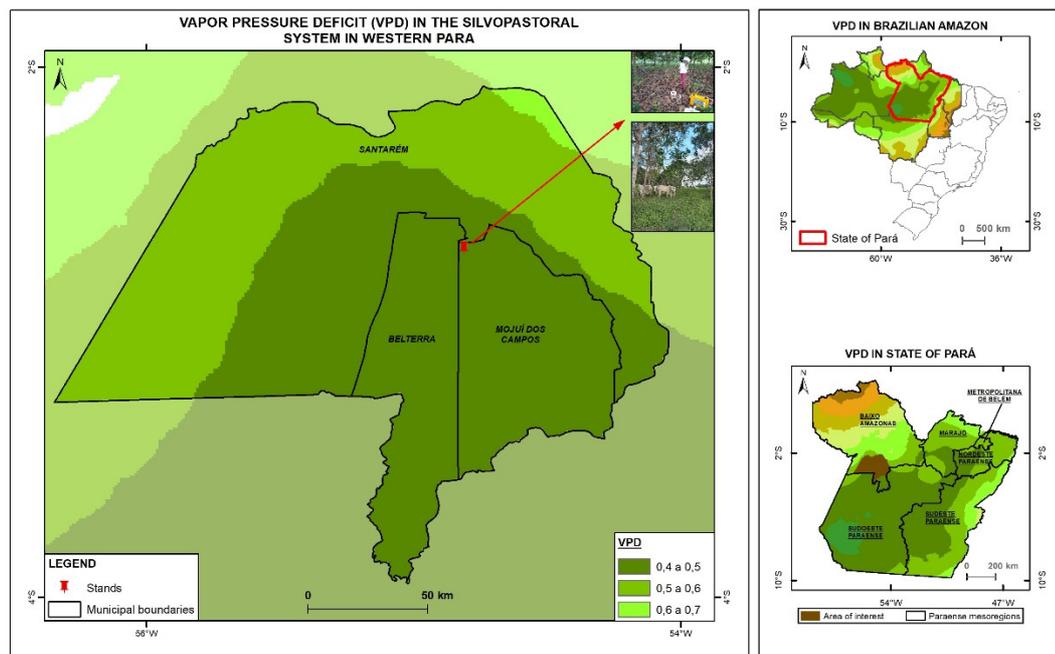


Figura 1. Mapa físico de déficit de pressão de vapor na localização da área de estudo no município de Mojuí dos Campos, no Estado do Pará, destacando a Fazenda Nossa Senhora Aparecida, ano 2024.

Fonte Autores.

3.2.2. Parcela experimental

O experimento foi realizado em seis áreas contíguas (Figura 2) contendo os seguintes arranjos silvipastoris: 1) talhão com sistema integrado com mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC) + pastagem, totalizando-se uma área de 0,92 ha de extensão; 2) talhão

com cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd) + pastagem, com área de 0,92 ha de extensão e 3) talhão com castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* H.B.K) + pastagem, contendo o mesmo tamanho (com 0,92 ha). Antes da implantação do sistema, a área era mantida somente com pastagem (*Brachiaria ruzizienses*). Para a implantação do sistema integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), foi feita a análise do solo com vistas à caracterização da área onde seria implantada a URT em ILPF.

O solo apresentou as seguintes características: pH = 5,26, MO = 30,66 g kg⁻¹, Al³⁺ = 0,43 cmol_c dm⁻³, Ca²⁺ = 2,96 cmol_c dm⁻³, Mg⁺ = 0,93 cmol_c dm⁻³, potássio 0,13 cmol_c dm⁻³, fósforo 2,17 mg dm⁻³, soma de bases trocáveis = 4,08 cmol_c dm⁻³, capacidade de troca de cátions = 4,51 mmol_c dm⁻³ e saturação por bases = 37%, de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (2011). No primeiro ano, as espécies florestais foram implantadas em consórcio com culturas agrícolas. O espaçamento inicial foi de 7 × 5 m, contabilizando-se 280 plantas de cada espécie florestal. Informações detalhadas sobre o histórico da área experimental e implantação da unidade experimental podem ser encontradas em Cândido et al. (2023) e Silva et al. (2018).

No entorno existe uma área com vegetação espontânea e enriquecimento da mesma com frutíferas, denominada de Sistema agroflorestal (SAF), constituído em sua maioria com o desenvolvimento de mangueiras (*Mangifera indica* L.) e castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) remanescente nessa área em pousio. Nas áreas intercalares estão as delimitações de pastagem produtiva (*Panicum maximum* cv. Mombaça) e pastagem com indícios de degradação pela baixa produtividade, com presença excessiva (> 40%) de plantas daninhas, caracterizada no nível 3 (forte) de degradação e baixa proporção de forrageiras, denominada pastagem degradada, conforme classificação de Dias Filho (2017), apresentando predominante, *Panicum maximum* cv. Mombaça.



Figura 2. Imagem fotográfica da disposição das áreas de estudo, 1. Pastagem degradada; 2. Pastagem produtiva; 3. Integração *K. grandifoliola*; 4. Integração com *B. excelsa*; 5. Integração *D. odorata* e 6. Sistema silvipastoril (SAF) Fonte: Registro de imagem da URT com drone realizada em 2019.

Fonte: autores.

3.2.3. Características das áreas

Silva et al. 2018, conduziram uma avaliação do solo nesses plantios arbóreos integrados, com ênfase na estabilidade dos agregados, densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total do solo. Além disso, foram analisados o carbono e o nitrogênio total, bem como seus respectivos estoques, comparando os resultados dos talhões com as encontradas na floresta nativa e em área agrícola adjacente. O estudo indicou que a floresta nativa apresentou os mais elevados percentuais de macroagregados, bem próximos aos do talhão com *K. grandifoliola*. Na camada superficial do solo (0-0,10 m), os teores e estoques de carbono foram mais expressivos na área agrícola e no sistema de integração com *D. odorata*. Em termos dos estoques de nitrogênio, os autores verificaram que na floresta nativa os valores foram mais expressivos, seguidos na área com a *K. grandifoliola* e *D. odorata*. Observaram ainda que na área com pastagem, as maiores concentrações de carbono foram nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m em relação aos demais sistemas integrados. Os autores apontaram que houve influência significativa dos diferentes tipos de cobertura vegetal na dinâmica dos nutrientes e na estrutura do solo, fornecendo indicadores que apontam que os sistemas integrados evidenciam estratégias de manejo sustentável em sistemas produtivos com baixa emissão de carbono na Amazônia.

Destaca-se que após a conclusão do projeto ILPF não foram realizados manejos nos talhões com os três componentes arbóreos, inclusive na área com a *D. odorata*, onde as árvores

desta espécie manifestaram crescimento significativo em diâmetro e altura. Além disso, evidenciaram um fuste reto, desrama natural eficiente e condições fitossanitárias satisfatórias, sem que estas últimas comprometessem a estrutura geral do povoamento (Lameira et al. 2022). Esses resultados sugerem que, mesmo na ausência de práticas silviculturais direcionadas, *D. odorata* expressou respostas associadas ao desenvolvimento, indicando o alto desempenho dessa espécie, de maneira robusta e saudável, agregando benefícios potenciais para o manejo sustentável e a produtividade a longo prazo.

Os estudos de dos Santos et al. (2023) comparando os teores de carbono em folhas, galhos e fustes das três espécies florestais (*B. excelsa*, *D. odorata* e *K. grandifoliola*) evidenciaram que a *D. odorata* apresentou o maior teor de carbono nas folhas, 52,14%, próximos aos encontrados nas folhas de *B. excelsa*, 50,68% de carbono nas folhas. Além disso, essa pesquisa revelou que *K. grandifoliola* apresenta o maior teor de carbono no fuste, alcançando 49,01%. Esses resultados evidenciam variações significativas nos teores de carbono entre os diferentes componentes que consolidaram o sistema silvipastoril.

Em estudo conduzido por Cândido et al. (2023), foi realizada uma avaliação das condições microclimáticas nesse sistema silvipastoril, comparando com uma pastagem a pleno sol (céu aberto). Os resultados indicaram que o sistema silvipastoril, que possui entre as espécies florestais uma exótica que é a *K. grandifoliola* atua no sistema reduzindo, significativamente a temperatura no ambiente por meio de suas copas. Esta redução foi atribuída ao sombreamento proporcionado pelas árvores, resultando em um microclima mais propício ao conforto térmico dos animais e possivelmente, explicando a ausência de gramíneas no talhão com *K. grandifoliola* ao comparar com os outros dois talhões. A escolha de espécies florestais específicas pode influenciar não apenas as condições térmicas, mas também pode fornecer outros benefícios e serviços ambientais, destacando a multifuncionalidade, conciliando tanto para a produção animal quanto para a conservação ambiental.

3.2.4. Amostragem de concentração e fluxo de CO₂ e CH₄

O desenho amostral da pesquisa é baseado na seguinte questão norteadora: Qual o efeito da cobertura vegetal no fluxo e na concentração de CO₂ e CH₄ na interface biosfera – atmosfera? Na Figura 3 apresenta-se um desenho esquemático de como foram estabelecidas as ações em campo. Todos os tipos de cobertura foram avaliados nos meses de abril, junho, agosto e outubro do ano de 2020. As coletas nesses meses foram realizadas considerando-se a sazonalidade das condições climáticas visando avaliar também as respostas associadas aos efeitos das condições de tempo e clima no fluxo e na concentração de CO₂ e CH₄ nessa região.

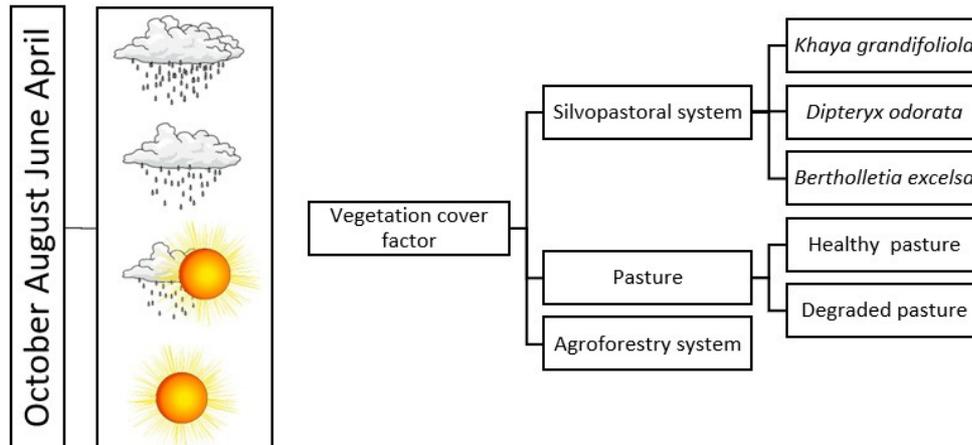


Figura 3. Desenho amostral na avaliação de fluxos e concentrações de CO₂ e CH₄ na Unidade de Referência Tecnológica (URT) em sistema silvipastoril, Mojuí dos Campos, oeste do Pará. Fonte: autora (2024).

As medidas de gases emitidos pelo solo foram realizadas para análise de sua concentração a semelhança de Furtado Neto (2019), e determinação das taxas de emissão/absorção de CO₂ e de CH₄ na interface solo-atmosfera em cinco pontos aleatórios em cada área, utilizando anéis de policloreto de vinil (PVC). A câmara de fluxo foi acoplada a esses anéis e para cada leitura, as emissões de CO₂ e CH₄ do solo foram registradas durante 240 segundos (Figura 4). Cada um dos cinco pontos foi composto por três leituras, onde em cada intervalo de leitura infere-se a calibração do equipamento em face para atmosfera. Os quatro metros extremos das laterais de cada área não foram avaliados para exclusão de qualquer afeito da borda. Para o mês de agosto, na área de pastagem degradada, o equipamento não registrou os dados de concentração e fluxo de CH₄.

O equipamento utilizado para medição de gases foi o Analisador Ultraportátil de Gases de Efeito Estufa (UGGA), modelo 915-0011, Los Gatos Research Inc., Mountain View, Califórnia, EUA) com faixa de medição nominal de 1 a 20.000 ppm para CO₂, 0,01 a 100 ppm para CH₄ e 500 a 70.000 ppm para vapor de água, e o fabricante citou precisões de ± 300 ppb (CO₂), ± 2 ppb (CH₄) e ± 100 ppm (H₂O). A frequência máxima de gravação de dados é 1 Hz. Os principais componentes do circuito interno de gás do instrumento são a câmara do laser, uma bomba de circulação e um regulador de vácuo. A bomba tem um caudal nominal de 0,5 l/min. Para proteger os espelhos, o circuito de gás inclui um filtro de partículas. O vácuo parcial (18,7 kPa) na câmara do laser é mantido pelo regulador de fluxo combinado com uma válvula unidirecional. A saída em tempo real do instrumento pode ser exibida por conexão sem fio a um laptop, tablet ou smartphone, ou por conexão direta a uma tela de monitor. Os dados são armazenados internamente e podem ser transferidos para um dispositivo de armazenamento

portátil conforme necessário (Wilkinson et al. 2018). Não houve intercalibração da concentração no equipamento.



Figura 4. Fotos: (a) Área de sistema integrado silvipastoril com *D. odorata* no mês de outubro, (b) Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA) na área de sistema integrado com *B. excelsa* no mês de outubro, (c) retirada de solo para determinação da umidade do solo na área de sistema integrado com *B. excelsa* no mês de junho (d) Calibração entre as leituras do UGGA na área de sistema integrado com *B. excelsa* no mês de junho.

Fonte: autora (2024).

As variáveis ambientais foram medidas com auxílio de anemômetro portátil (Modelo TS - 301 - TOPTES), para velocidade do vento e temperatura do ar, e termopar tipo espeto 15 cm (Modelo TP101 – ZH90) para temperatura do solo. Para determinar a umidade do solo foram coletadas amostras indeformadas em cada ponto de leitura com o uso do trado holandês. Foi registrado o peso inicial e após o solo foi seco em estufa com circulação forçada a temperatura de 105°C até atingir peso constante. Após esse procedimento, foi registrado o peso final e determinada a umidade pela seguinte equação (1).

$$\% \text{ Umidade} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad (1)$$

3.2.5. Análise das medidas de fluxo de CO₂ and CH₄

Após as medidas com o UGCA, juntamente com a geometria da câmara, o cálculo do fluxo difusivo na superfície do solo é possível, por meio da equação dos gases ideais (2) adaptada de Goldenfum (2010), estimar o fluxo do CO₂ e do CH₄ de uma determinada área.

$$F = \frac{V}{A} \cdot \frac{\delta C}{\delta t} \cdot \frac{P}{R(T+273)} \quad (2)$$

em que, F é o fluxo de CH₄ (mmol m⁻² h⁻¹), A é a área basal da câmara (m²), V é o volume da câmara (m³), $\frac{\delta C}{\delta t}$ é o sloop da reta (ml m⁻³ h⁻¹), P a pressão atmosférica (atm), R constante ideal dos gases (atm L mol K⁻¹), T é a temperatura do ar (°C).

Os dados foram baixados e tabulados no Calc do llibre office e exportados em formato texto (txt) e elaboração de cálculos de fluxo na ferramenta R Studio, compilador de linguagem R.

Como o programa R é interativo, é possível inserir informações das coletas que foram realizadas, como por exemplo, o período em que os dados foram coletados, o local e o tipo de área. Após as informações iniciais é feita a inserção dos dados para compilação, ou seja, as informações referentes a equação 2.

A Figura 5 foi obtida após todas as informações serem inseridas no programa, em seguida é feita a demarcação das retas como pode ser visualizado na mesma, de acordo com o tempo de leitura para cada medida, e por fim, aplica-se a equação 2 para o cálculo das concentrações médias e dos fluxos de CO₂ e de CH₄.

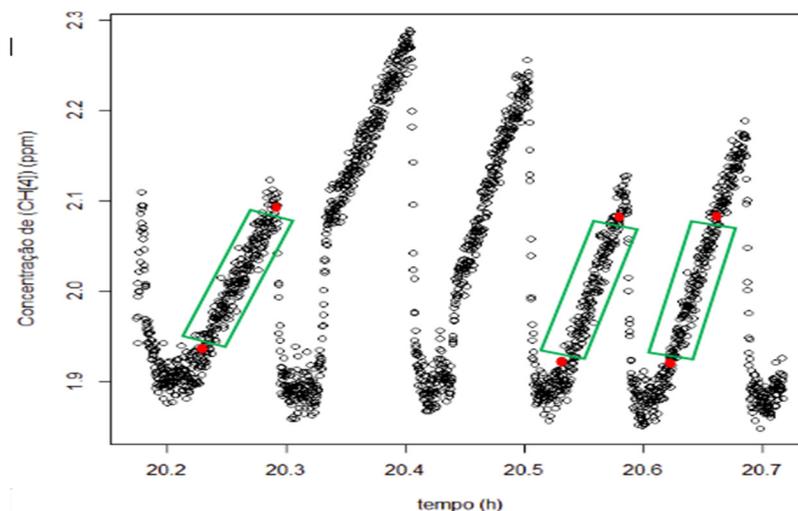


Figura 5. Demarcação das retas das leituras.

3.2.6. Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de pressupostos da análise de variância (ANOVA). A normalidade dos resíduos foi analisada com o teste de B-Wilk (1965), e a homogeneidade de variância residual foi examinada pelo teste de Bartlett (1937) para cada fonte de variação. Considerando que nenhuma das variáveis atendeu simultaneamente às pressuposições da ANOVA, optou-se pela realização da análise não paramétrica.

Inicialmente, foi empregado o teste de Kruskal e Wallis (1952), em substituição à ANOVA de um fator, para verificar se os grupos de tratamentos compartilhavam a mesma distribuição. Em outras palavras, a hipótese nula (h_0) testada foi que as k populações tendem a apresentar valores similares para a variável em questão. A hipótese alternativa do teste (h_a) postula que pelo menos duas das k populações apresentam valores diferentes para a variável em questão. Nesta fase, foram conduzidas análises individuais para cada fonte de variação: locais, meses e a combinação local \times meses (interação).

Posteriormente, aplicou-se o teste de Dunn (1964), comumente utilizado após o teste de Kruskal e Wallis quando este produz um resultado significativo. O objetivo foi identificar quais grupos compartilhavam a mesma distribuição. Os valores-p foram calculados a partir de uma distribuição normal padrão e ajustados com a correção de Bonferroni. Em todas as variáveis, o nível de significância adotado foi $\alpha = 0.05$.

Além disso, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) para investigar o relacionamento simultâneo entre todas as variáveis. Todas as variáveis foram padronizadas para terem variância unitária, a fim de evitar que a magnitude de uma das variáveis influenciasse a análise. A saída da análise foi representada por meio do gráfico biplot (Gabriel, 1971).

Todas as análises foram conduzidas no ambiente R. Para o teste de Kruskal e Wallis utilizou-se o pacote `rstatix` (Kassambara, 2021), o teste de Dunn foi realizado com o pacote `PMCMRplus` (Pohlert, 2022), e os gráficos foram gerados utilizando o pacote `ggplot2` (Wickham et al., 2016).

3.3. Resultados

3.3.1. Influência da área na concentração e fluxo de CO₂ e CH₄

As respectivas médias, desvio padrão, mediana, valores mínimo e máximo para comparação das áreas podem ser visualizados na Tabela 1. A maior média para concentração de CO₂ foi encontrada na área de pastagem degradada e a menor média na área de integração com *B. excelsa*, seguindo o mesmo desempenho para fluxo de CO₂.

Tabela 1. Médias, mediana, valores mínimo e máximo e desvio padrão para concentração e fluxo de CO₂ e CH₄ de acordo com o uso das áreas Mojuí dos Campos, 2020.

Concentração de CO₂ (ppm)					
Site	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Degraded pasture	568.87	561.32	455.39	792.67	71.04
Productive pasture	512.27	491.06	422.07	889.53	88.23
<i>K. grandifoliola</i>	512.47	484.51	442.96	853.26	89.39
<i>B. excelsa</i>	473.38	469.28	414.30	573.61	35.51
<i>D. odorata</i>	529.58	508.56	465.71	831.37	60.18
Agroforestry system	520.86	499.72	421.46	754.84	78.76
Fluxo de CO₂ (mmol / m⁻² h⁻¹)					
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Degraded pasture	29.77	27.35	15.25	83.44	13.04
Productive pasture	21.59	16.40	6.70	97.17	17.52
<i>K. grandifoliola</i>	19.39	13.69	5.43	93.14	18.24
<i>B. excelsa</i>	11.28	10.07	5.15	22.12	4.48
<i>D. odorata</i>	23.01	21.98	11.17	48.68	7.35
Agroforestry system	22.43	17.82	3.48	60.81	13.60
Concentração de CH₄ (ppm)					
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Degraded pasture	1.840	1.830	1.758	1.985	0.064
Productive pasture	1.793	1.783	1.726	1.878	0.041
<i>K. grandifoliola</i>	1.849	1.842	1.751	1.995	0.065
<i>B. excelsa</i>	1.823	1.818	1.736	1.953	0.061
<i>D. odorata</i>	1.796	1.793	1.708	1.880	0.047
Agroforestry system	1.828	1.800	1.754	2.123	0.092
Fluxo de CH₄ (mmol / m⁻² h⁻¹)					
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Degraded pasture	0.000	0.000	-0.012	0.011	0.007
Productive pasture	0.001	0.002	-0.014	0.014	0.006
<i>K. grandifoliola</i>	0.000	-0.001	-0.004	0.028	0.006
<i>B. excelsa</i>	-0.001	-0.001	-0.006	0.014	0.003
<i>D. odorata</i>	0.000	-0.001	-0.007	0.009	0.005
Agroforestry system	0.003	0.000	-0.011	0.053	0.014

Para concentração de CH₄, a maior média foi encontrada na área de integração com *K. grandifoliola*, seguida pela área de pastagem degradada. A espécie *K. grandifoliola*, devido seu crescimento rápido, tem um ciclo de desenvolvimento bastante diferente das outras espécies, no que se refere ao porte da mesma. A área de integração com essa espécie tem menor desenvolvimento de pastagem ou mesmo espécies daninhas quando comparada às áreas de integração com *D. odorata* ou até mesmo a *B. excelsa*, que possui, em comparação com as demais espécies integradas, a maior área de copa e conseqüentemente proporciona a menor entrada de luz no sistema (Cândido et al. 2023).

A maior média do fluxo de CH₄ ocorreu na área de SAF, sendo a menor média na área de integração com *B. excelsa*, indicando nesta área, captura de CH₄ da atmosfera.

Na Figura 6, ao observar os boxplots, pode-se visualizar as diferenças significativas entre as áreas avaliadas. A concentração de CO₂ é demonstrada na Figura 6A o fluxo de CO₂ na Figura 6B.

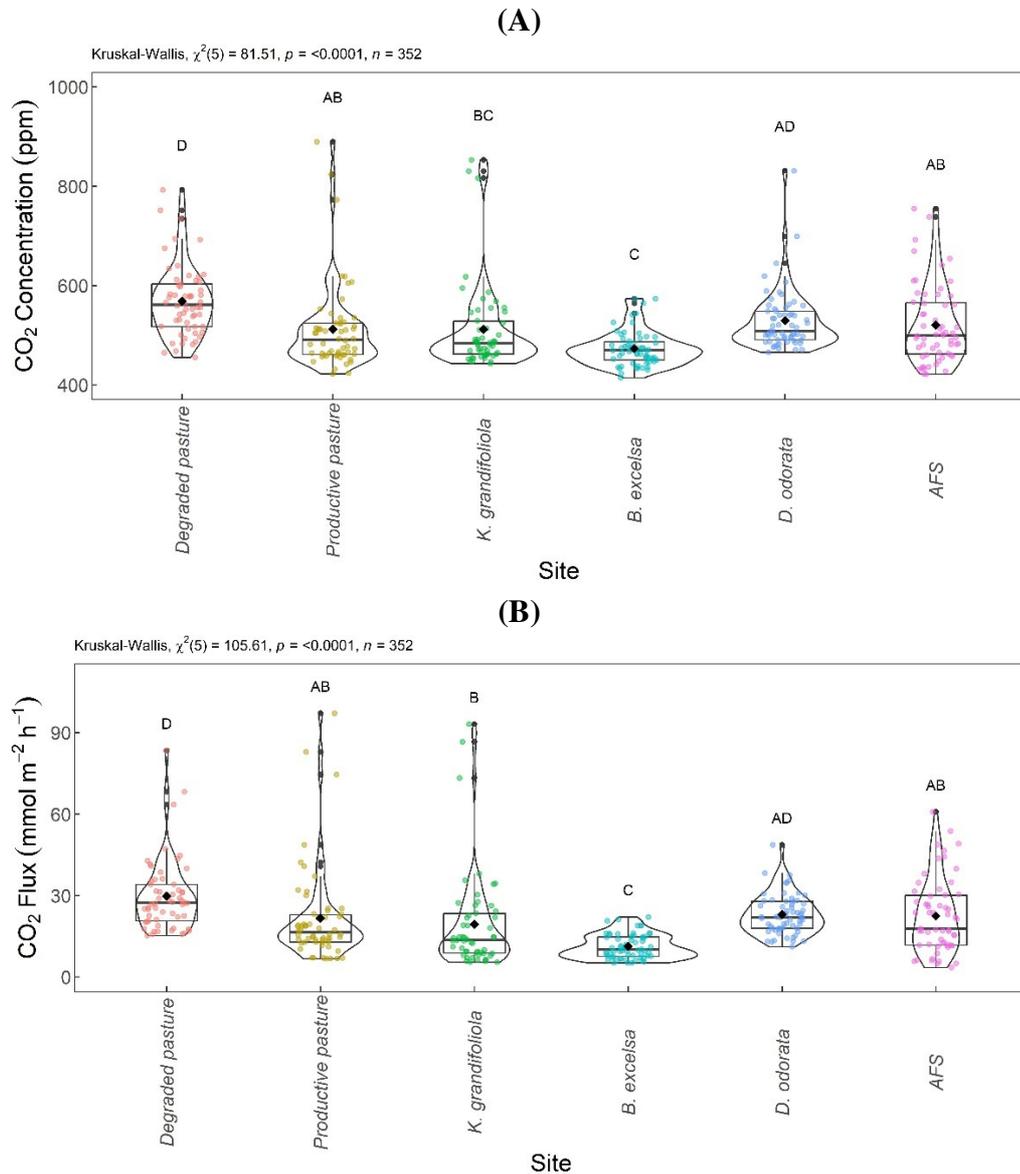


Figure 6. Gráfico de caixas para comparação da concentração de CO₂ entre os sites sistema integrado com *B. excelsa*, Agrofloresty system (AFS), pastagem produtiva, sistema integrado com *D. odorata*, pastagem degradada e sistema integrado com *K. grandifoliola* (A) e fluxo de CO₂ nos mesmos sites (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn ao nível de significância de 5%. Cada cor de ponto representa uma leitura através do Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA).

O menor valor para concentração de CO₂ observado na área de integração com *B. excelsa* não diferiu estatisticamente da área de integração com *K. grandifoliola* e diferiu de todas as

demais áreas. A área com maior concentração e fluxo de CO₂, a pastagem degradada, não diferiu da área de integração com *D. odorata*. As áreas de bosque, pastagem produtiva e integração com *D. odorata* e as áreas de SAF, pastagem produtiva e integração com *K. grandifoliola* não diferiram entre si.

Na Figura 7 pode-se visualizar as diferenças significativas entre as áreas avaliadas em relação ao CH₄. A concentração de CH₄ é demonstrada na Figura 7A o fluxo de CH₄ na Figura 7B.

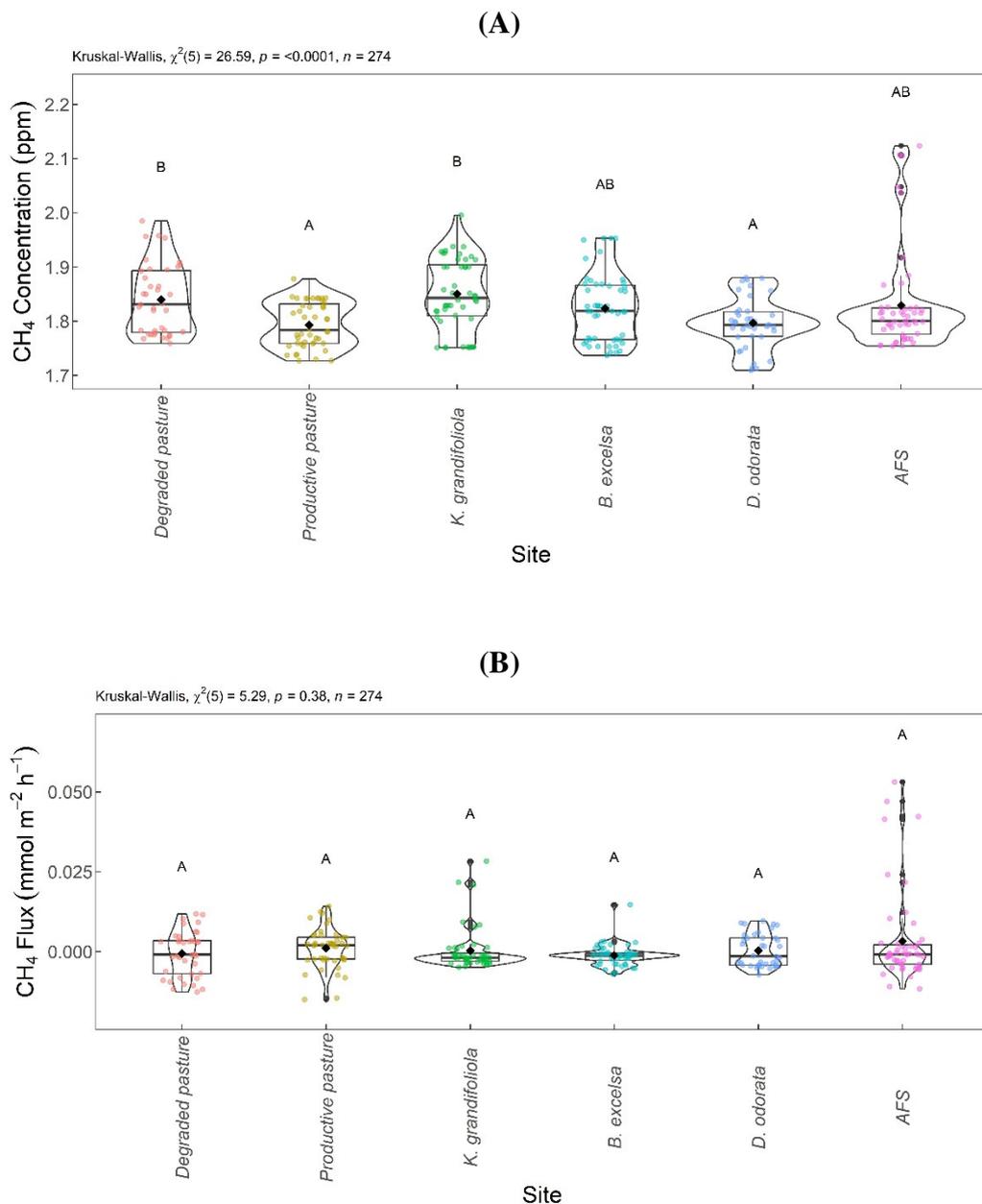


Figure 7. Gráfico de caixas para comparação da concentração de CH₄ entre os sites sistema integrado com *B. excelsa*, Agrofloresty system (AFS), pastagem produtiva, sistema integrado *D. odorata*, pastagem degradada e sistema integrado com *K. grandifoliola* (A) e fluxo de CH₄ nos mesmos sites (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn ao nível de significância de 5%. Cada cor de ponto representa uma leitura através do Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA).

Para concentração de CH₄, as áreas de integração com *B. excelsa*, AFS, pastagem produtiva e integração com *D. odorata* não diferiram entre si. Também não houve diferença entre as áreas de integração com *B. excelsa*, AFS, pastagem degradada e integração com *K. grandifoliola*. As áreas de pastagem produtiva e integração com *D. odorata* diferiram das áreas de pastagem degradada e integração com *K. grandifoliola*, onde essas últimas apresentaram os valores mais elevados. Para fluxo de CH₄ não houve diferenças estatísticas entre as áreas.

3.3.2. Influência da época na concentração e fluxo de CO₂ e CH₄

Os valores médios, desvio padrão, mediana, valores mínimo e máximo para concentração e fluxo de CO₂ e CH₄ de acordo com os meses avaliados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Médias, mediana, valores mínimo e máximo e desvio padrão para concentração e fluxo de CO₂ e CH₄ de acordo com os meses avaliados, Mojuí dos Campos, 2020.

Concentração de CO₂ (ppm)					
Meses	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Abril	525.95	504.25	414.30	853.26	93.06
Junho	535.58	510.06	451.35	831.37	71.11
Agosto	513.21	498.46	433.46	889.53	74.08
Outubro	501.53	492.92	421.46	792.67	65.30
Fluxo de CO₂ (mmol / m⁻² h⁻¹)					
	Abril	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Abril	21.46	16.76	6.70	93.14	15.82
Junho	22.06	20.01	5.15	60.81	11.31
Agosto	22.51	19.40	7.08	97.17	15.14
Outubro	18.74	16.85	3.48	83.44	14.28
Concentração de CH₄ (ppm)					
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Abril	1.863	1.833	1.753	2.123	0.085
Junho	1.826	1.819	1.751	1.956	0.055
Agosto	1.816	1.779	1.708	1.950	0.075
Outubro	1.795	1.790	1.736	1.864	0.031
Fluxo de CH₄ (mmol / m⁻² h⁻¹)					
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Abril	0.008	0.002	-0.001	0.053	0.012
Junho	0.001	0.002	-0.003	0.011	0.003
Agosto	-0.001	-0.002	-0.014	0.014	0.004
Outubro	-0.003	-0.003	-0.012	0.006	0.003

Tanto para CO₂, como para CH₄, houve uma tendência geral de diminuição da concentração e do fluxo na sequência de meses avaliados, sendo a maior média de concentração e fluxo de CO₂ e CH₄ no mês de abril e/ou junho e a menor no mês de outubro do ano de 2020.

Para concentração e fluxo de CO₂, aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis, houve diferenças significativas ($p < 0.005$) entre os grupos. Sendo assim, rejeitamos H₀ e concluímos que pelo menos um contraste de grupos difere entre si. Aplicando-se o teste de Dunn, houve diferenças significativas entre o mês de junho e outubro tanto para concentração, quanto para fluxo de CO₂.

Na Figura 8, pelos gráficos de caixas, pode-se visualizar essas diferenças significativas entre os meses avaliados. A concentração de CO₂ é demonstrada na Figura 8A o fluxo de CO₂ na Figura 8B.

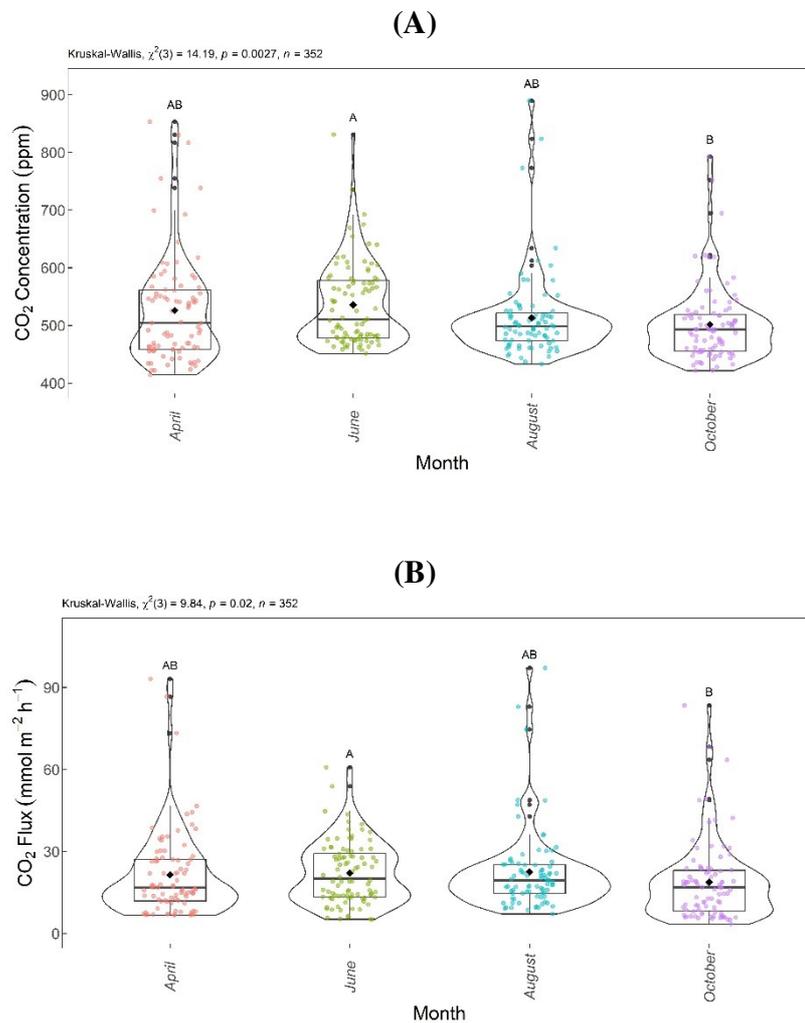


Figure 8. Gráfico de caixas para comparação da concentração de CO₂ entre os meses de abril, junho, agosto e outubro de 2020 (A) e fluxo de CO₂ no mesmo período (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn ao nível de significância de 5%. Cada cor de ponto representa uma leitura através do Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA).

Para concentração e fluxo de CO₂, apesar da tendência de decréscimo na sequência de meses avaliados, os meses de abril, junho e agosto não diferiram entre si, assim como os meses de abril, agosto e outubro.

Os meses de junho e outubro diferiram entre si. Os meses de junho e outubro são bem contrastantes no que se refere às condições climáticas nesta região. O mês de junho, excluindo os dias de chuva, foi caracterizado por dias nublados ou sol encoberto devido a presença de nuvens, que ocorria com frequência durante as coletas. O mês de outubro é caracterizado por altas temperaturas e baixos índices pluviométricos, comparado aos demais meses.

Na Figura 9, pode-se visualizar as diferenças significativas entre os meses avaliados no que se refere ao CH₄. A concentração de CH₄ é demonstrada na Figura 9A o fluxo de CH₄ na Figura 9B.

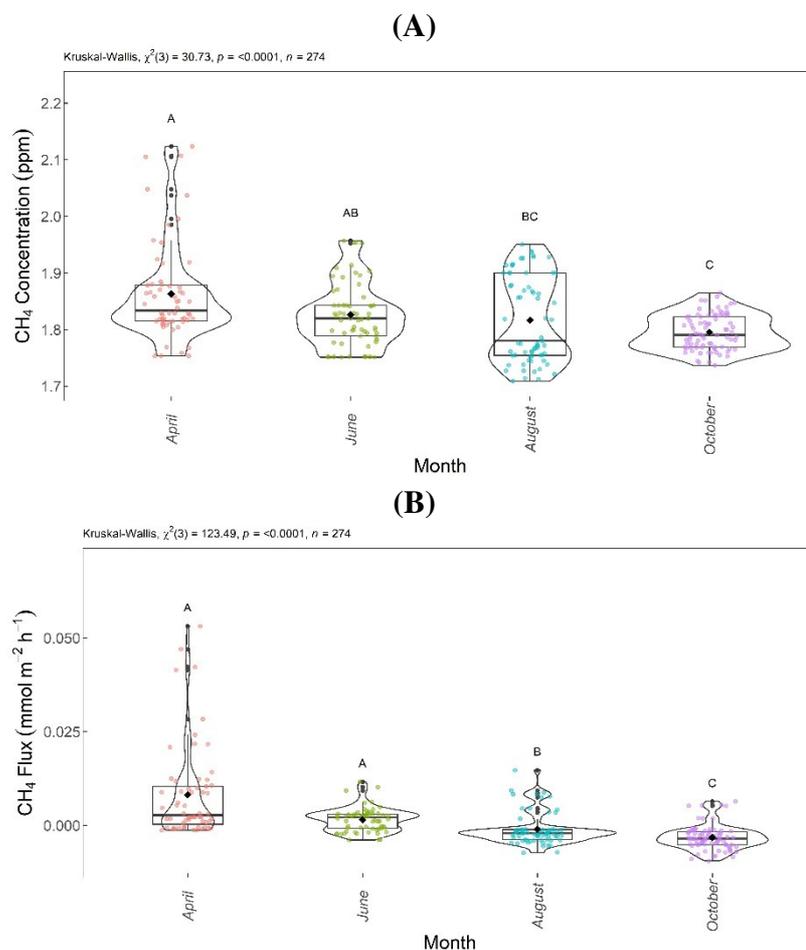


Figure 9. Gráfico de caixas para comparação da concentração de CH₄ entre os meses de abril, junho, agosto e outubro de 2020 (A) e fluxo de CH₄ no mesmo período (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn ao nível de significância de 5%. Cada cor de ponto representa uma leitura através do Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA).

Aplicando-se o teste de Dunn, houve diferenças significativas entre o mês de abril e os meses de agosto e outubro. Os meses de junho e outubro também diferiram entre si. Houve decréscimo tanto na concentração, quanto no fluxo na sequência de meses avaliados ao decorrer

do ano. Nos meses de agosto e outubro não houve emissão, sendo que nesse período houve captura de CH₄ da atmosfera.

3.3.3. Interação entre área e época na concentração e fluxo de CO₂ e CH₄

Na Figura 10 podem ser observadas as diferenças quando avaliada a interação entre as áreas e meses avaliados quando a concentração (Figura 10-A) e fluxo (Figura 10-B) de CO₂.

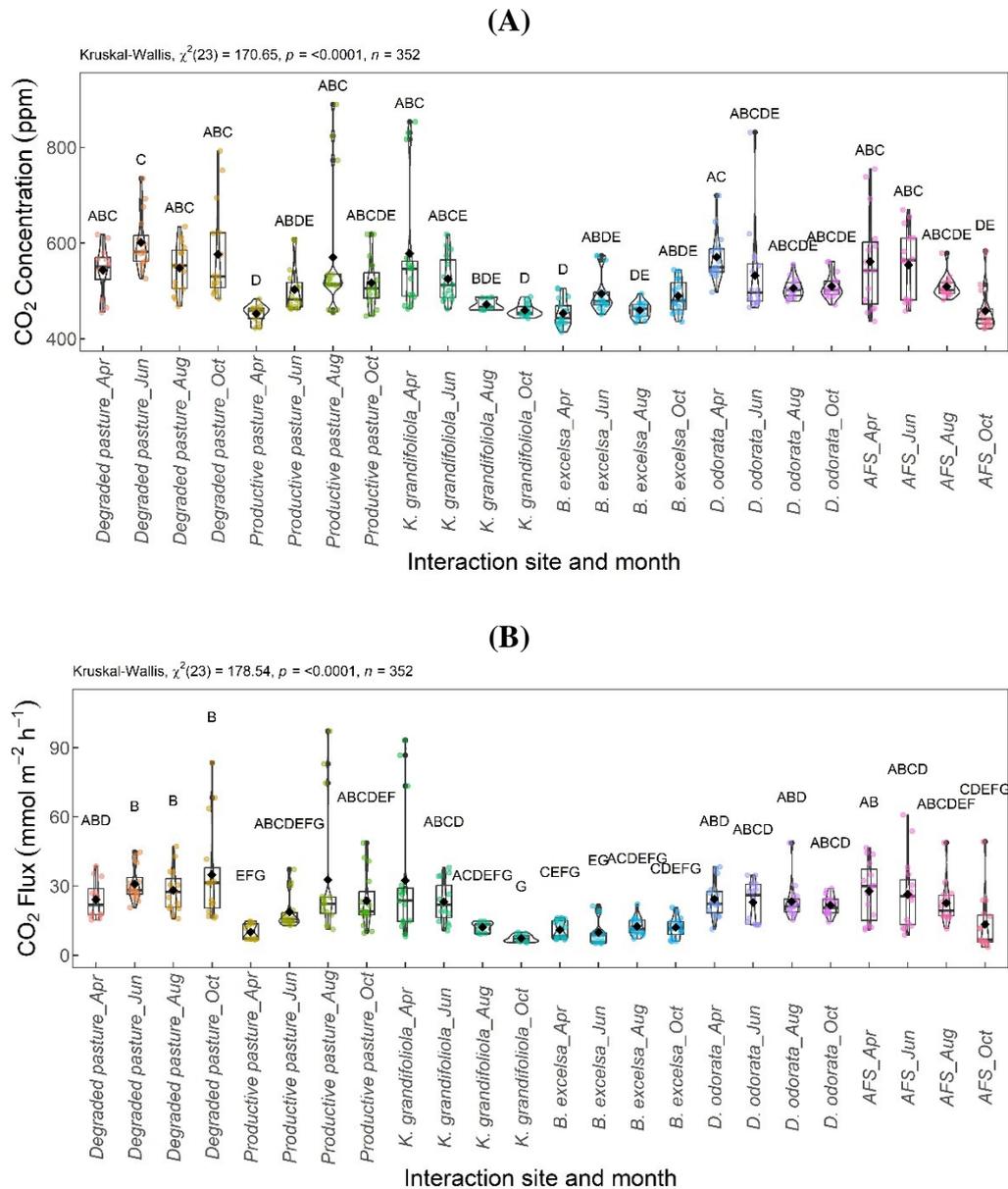


Figure 10. Gráfico de caixas para Interação local e mês para concentração de CO₂ (A) e fluxo de CO₂ (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn ao nível de significância de 5%. Cada cor de ponto representa uma leitura através do Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA).

Na Figura 11 é possível observar as diferenças quando avaliada a interação entre as áreas e meses avaliados quando a concentração (Figura 11-A) e fluxo (Figura 11-B) de CH₄.

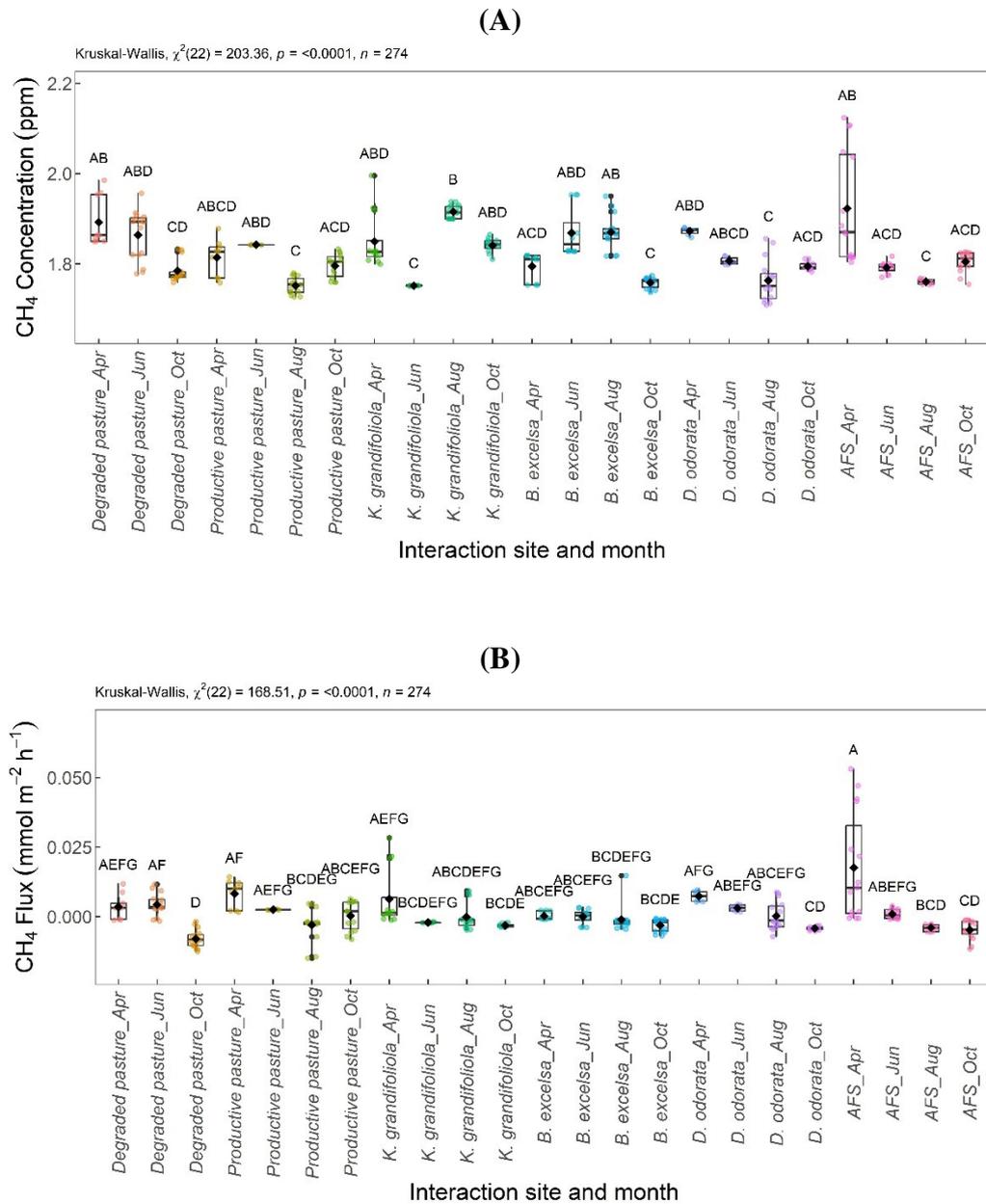


Figure 11. Gráfico de caixas para interação local e mês para concentração de CH₄ (A) e fluxo de CH₄ (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Dunn ao nível de significância de 5%. Cada cor de ponto representa uma leitura através do Ultra-portable Greenhouse Gas Analyzer (UGGA).

3.3.4. Análise de componentes principais (ACP)

Os primeiros valores da análise de componentes principais (PCA) referentes à concentração e fluxo de CO₂ nas áreas e meses avaliados são expressos na Figura 12-A.

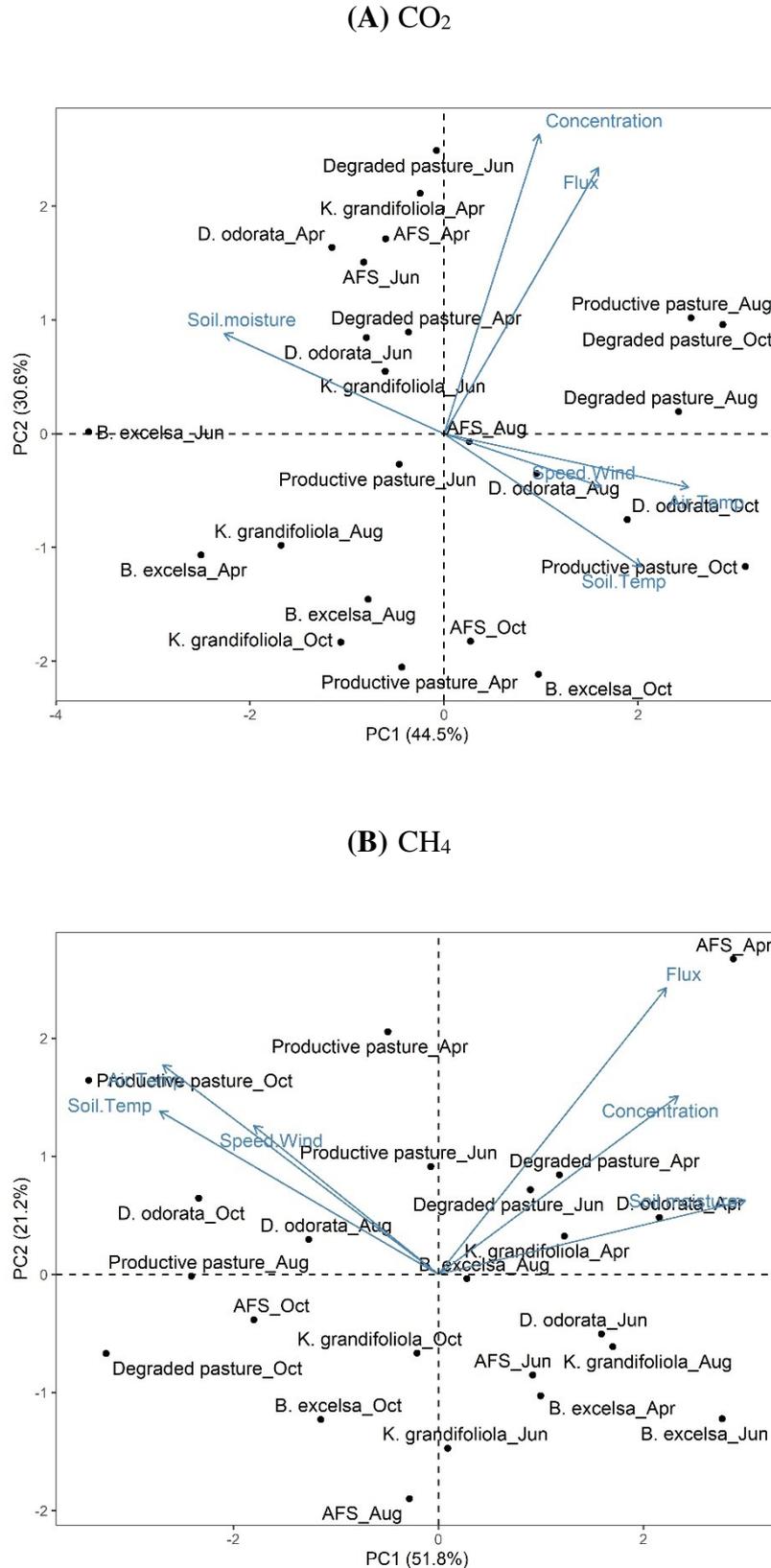


Figure 12. Gráfico biplot (PC1 e PC2) com as variáveis Concentração e Fluxo de CO₂ (A) e Concentração e Fluxo de CH₄ (B) e variáveis ambientais (temperatura do solo, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade do solo) em interação local e mês nas parcelas de integração silvipastoril (*B. excelsa*, *D. odorata*, and *K. grandifoliola*), parcelas de pastagens (pastagem produtiva e pastagem degradada) e sistema agroflorestal (AFS) nos meses de abril, junho, agosto e outubro de 2020.

Para a determinação do número de componentes principais, verificou-se que como os dois primeiros CPs gerados, a partir das análises que têm porcentagem de variância > 70%, conforme os pressupostos de Rencher (2010), reforçando que pelo menos 70% da variância total devem ser explicadas pelo primeiro e o segundo componentes principais.

Foi possível identificar associações entre as variáveis observadas, estabelecendo fatores comuns entre elas. Os dois primeiros componentes principais (PCs) foram responsáveis por 75.1% da variação total, em que o PC1 foi responsável por 44.5% e o segundo, PC2, por 30.6% das variações dos dados (Figura 12-A), indicando que os dois primeiros componentes principais explicam, efetivamente a variância amostral padrão do conjunto de variáveis.

Ao avaliar a interação entre as áreas e os meses monitorados, observa-se que as observações ao centro estão próximas da média geral, observações mais afastadas à direita estão acima da média e observações à esquerda estão abaixo da média geral. As variáveis concentração e fluxo de CO₂ estão fortemente correlacionadas. As variáveis ambientais (umidade do solo, velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura do solo) apresentam fraca correlação com a concentração e fluxo de CO₂.

Os resultados da segunda PCA comparam os dados da interação entre as áreas e meses avaliados, demonstrando a correlação com as variáveis ambientais para CH₄, conforme apresentados na Figura 12-B. Os dois primeiros PCs da PCA2 foram responsáveis por 73.0% da variação total, em que o PC1 foi responsável por 51.8% e o segundo, PC2, por 21.2% das variações dos dados.

Para CH₄, a concentração e fluxo estão positivamente correlacionadas com a umidade do solo e apresentam fraca correlação com as demais variáveis ambientais (velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura do solo).

Quanto a caracterização do Biplot (A) CO₂, no primeiro quadrante, os grupos Productive pasture_Aug, Degraded pasture_Oct e Degraded pasture_Aug, se caracterizam por apresentarem altos valores de fluxo e concentração de CO₂. No segundo quadrante, os grupos Degraded pasture_Jun, *K.grandifoliola*_Apr, AFS_Apr, *D. odorata*_Apr, AFS_Jun, Degraded pasture_Apr, *D.odorata*_Jun e *K.grandifoliola*_Jun se caracterizam por apresentarem altos valores de Soil moisture e baixos valores de Speed Wind, Air Temp. (temperatura do ar) e Soil Temp. (temperatura do solo). No terceiro quadrante, os grupos Productive pasture_Jun, *K.grandifoliola*_Aug, *B. excelsa*_Apr, *B. excelsa*_Aug, *K. grandifoliola*_Oct e Productive pasture_Apr se caracterizam por apresentarem baixos valores de concentração e fluxo de CO₂. Por fim, no quarto quadrante, os grupos *D. odorata*_Aug, *D. odorata*_Oct, Productive pasture_Oct, AFS_Oct e *B.excelsa*_Oct se caracterizam por apresentarem altos valores de

Speed Wind, Air Temp. e Soil Temp. e baixos valores de Soil moisture. O grupo B. excelsa_Jun apresenta características dos quadrantes II e III.

Em relação ao CH₄ (Biplot B), no primeiro quadrante, os grupos AFS_Apr, Degraded pasture_Apr, Degraded pasture_Jun, *D. odorata*_Apr, *K. grandifoliola*_Apr se caracterizam por apresentarem altos valores de fluxo e concentração de CH₄, Soil Temp. e Soil moisture. No segundo quadrante, os grupos Productive pasture_Apr, Productive pasture_Aug, Productive pasture_Oct, Productive Pasture_Jun, *D. odorata*_Oct e *D. odorata*_Aug se caracterizam por apresentarem altos valores de Speed Wind, Air Temp. e Soil Temp. No terceiro quadrante, os grupos AFS_Oct, *K. grandifoliola*_Oct, Degraded pasture_Oct, *B. excelsa*_Oct e AFS_Aug, se caracterizam por apresentarem baixos valores de fluxo, concentração, Soil Temp. e Soil moisture. No quarto quadrante, os grupos *D. odorata*_Jun, *K. grandifoliola*_Aug, AFS_Jun, *B. excelsa*_Apr, *B. excelsa*_Jun e *K. grandifoliola*_Jun caracterizam-se por apresentarem baixos valores de Speed Wind, Air Temp. e Soil Temp. O grupo Productive pasture_Aug apresenta características dos quadrantes II e III.

3. 4. Discussão

3.4.1. Influência da área na concentração e fluxo de CO₂ e CH₄

As emissões referentes a mudanças no uso da terra são altamente heterogêneas em todo o Brasil e nos usos do solo. Em geral, são maiores no bioma Amazônia, devido ao desmatamento (Garofalo et al. 2022).

As espécies *B. excelsa* e *K. grandifoliola* foram as maiores atenuadoras da emissão de CO₂. Torres et al. (2017), trabalhando com sistemas agrofloretais no sudeste do Brasil relataram que esses sistemas sequestram CO₂ da atmosfera e podem ajudar na política de redução de emissões de GEE (Torres, et al. 2017). Silva, et al. (2016), avaliando sistemas agrofloretais também na Amazônia Oriental chegaram à conclusão de que sistemas mais diversificados apresentam melhor qualidade ambiental.

Além da capacidade observada das espécies arbóreas *B. excelsa* e *K. grandifoliola* nesse sistema silvipastoril em mitigar tanto a concentração como o fluxo de CO₂ no sistema solo-atmosfera, lembra-se do carbono fixado no desenvolvimento das árvores, que apresentavam 10 anos de plantio, quando da realização das coletas. De acordo com Oliveira et al. (2022), em estudo feito com eucalipto, durante o período de crescimento dessas árvores no sistema silvipastoril (8 anos), o carbono fixado no tronco das árvores permitiu a neutralização das emissões de CO₂ eq. de 9,4 unidades animais (UA) ha⁻¹ e considerando apenas o carbono na

madeira resultante do processo de desdobro na serraria, o eucalipto no sistema silvipastoril aos oito anos de idade (165 árvores ha⁻¹) neutralizou as emissões de CO₂ eq. de 2,3 UA ha⁻¹.

De acordo com Ramos (2018), sistemas de manejo conservacionistas, como os silvipastoris com pastagens produtivas, apresentam atributos do solo favoráveis à manutenção do carbono no solo, devido ao seu baixo fluxo de CO₂, constituindo assim um sistema indicado para a captura e armazenamento de carbono, e, conseqüentemente, mitigação do efeito estufa adicional.

A produção média de CH₄ no solo esteve na média global para este gás na atmosfera, o qual corresponde a 1,800 ppm (Keppler et al. 2006) e 1,813 (WMO, 2012) e ficou abaixo de estudos realizados na FLONA (Floresta Nacional do Tapajós), unidade de conservação federal da natureza localizada na Amazônia, município de Belterra. A produção média de metano no solo da FLONA foi de 2,291 ± 0,340 ppm (Furtado Neto et al. 2019), e Oliveira Junior (2006) apresentou valores de 39% e 59% superiores à concentração de 2 ppm, no período seco e úmido, respectivamente a uma profundidade de 5 cm para a mesma área de estudo.

Destaca-se que no presente estudo, a produção de CH₄ foi maior nas áreas de pastagem degradada e integração com *K. grandifoliola*, contudo não houve diferenças quando analisado o fluxo de CH₄ (Figura 7). A integração com *K. grandifoliola* produz menor quantidade de serrapilheira quando comparada às demais áreas com integração, o que explica a maior concentração de CH₄ (Figura 4).

Tão importante quanto a redução das emissões, deve-se considerar, também, as remoções de gás carbônico da atmosfera. Nesse caso, a pastagem produtiva tem papel importante ao estocar no solo o carbono retirado do ar por meio da fotossíntese dos capins tropicais, muito eficientes nessa função. A integração com *K. grandifoliola* estoca carbono pela característica de rápido crescimento. Embora a espécie seja exótica, ela tem grande potencial produtivo na Amazônia e balanço favorável de emissões de gases de efeito estufa pela boa adaptação às condições edafoclimáticas da região.

3.4.2. Influência da época na concentração e fluxo de CO₂ e CH₄

Pela tendência de decréscimo na concentração e fluxo de CO₂ no período avaliado, nota-se que as maiores emissões aconteceram nos meses mais chuvosos. Silva et al. (2016), trabalhando com variação temporal do fluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo também na Amazônia Oriental, concluíram que o fluxo de CO₂ do solo foi influenciado pela sazonalidade pluviométrica, sendo maior no período chuvoso.

De acordo com Zanchi et al. (2009), a maior taxa de respiração do solo observada na estação chuvosa na região amazônica, provavelmente, deve-se ao aumento da produtividade neste período, o que pode afetar positivamente a respiração das raízes e os microorganismos do solo, que encontram condições favoráveis para a decomposição da matéria orgânica no período chuvoso; o que contribui para isso é a serrapilheira que se acumula durante a estação seca sobre o solo e o aumento da umidade do solo durante o período chuvoso.

A concentração e o fluxo de CH_4 foi decrescente no período avaliado (abril a outubro). O fluxo de CH_4 foi influenciado pela dinâmica das chuvas na região, pois dentro desse período, abril tem os maiores e outubro os menores índices pluviométricos. As emissões diminuíram de acordo com a redução das chuvas. Segundo Saggari et al. (2004), a emissão de CH_4 tem relação com a umidade do solo, a ocorrência de chuvas e temperatura do ar e do solo.

Siqueira Neto et al. (2011) verificaram correlação positiva entre umidade do solo e emissão de CH_4 em sistema de plantio direto. Segundo Mazzetto et al. (2014) as chuvas tendem a proporcionar aumento na porosidade preenchida por água do solo, condição que limitaria a difusão de O_2 no perfil do solo. O aumento na porosidade preenchida por água do solo pode proporcionar sítios de anaerobiose, devido ao aumento da umidade do solo, que associado ao aumento da densidade, reduz a difusão de O_2 , além disso, ocorre o aumento da atividade dos microorganismos sob maiores temperaturas, conseqüentemente maiores fluxos de emissão de CH_4 (Rosa, 2019).

3.4.3. Interação entre área e época na concentração e fluxo de CO_2 e CH_4

Pela análise da interação das concentrações e fluxos de CO_2 e CH_4 , é possível identificar o comportamento desses gases em cada área e em cada período nessa área avaliada. É possível observar que apesar da influência da área e dos meses do ano, a interação não seguiu uma tendência decrescente. Isso acontece também pela dinâmica complexa do sistema, pois apesar, por exemplo, das árvores colaborarem com a redução das emissões, essas proporcionam um ambiente que retém maior umidade no ambiente, o que como visto no presente estudo, está relacionado a maiores emissões.

3.4.3. Análise de componentes principais (ACP)

A concentração e o fluxo de CH_4 foram mais sensíveis à umidade do solo quando comparado com a concentração e o fluxo de CO_2 . Siqueira Neto et al. (2011) verificaram correlação significativa entre umidade do solo e aumento dos fluxos de metano em sistema de plantio direto e no cerrado, no entanto não observaram o mesmo em áreas de pastagens com

braquiária. Todavia, os autores constataram valores mais elevados de umidade no plantio direto e cerrado em comparação à pastagem e plantio convencional, e atribuíram tal fato a presença de resíduos vegetais na superfície do solo, que atuam como uma camada de impedimento físico à perda de umidade do solo em período de estiagem.

3.5. Conclusões

As áreas cultivadas com as espécies *B. excelsa* e *K. grandifoliola* foram as maiores atenuadoras da emissão de CO₂, sendo que a maior emissão ocorreu na área de pastagem degradada. Em relação ao período avaliado, as maiores emissões aconteceram nos meses mais chuvosos.

Quanto à produção de CH₄, observou-se que a produção foi maior nas áreas de pastagem degradada e integração com *K. grandifoliola*, contudo não houve diferenças quanto ao fluxo. A concentração e o fluxo de CH₄ foi decrescente no período avaliado (abril a outubro), ou seja, a emissão de CH₄ foi influenciada pela dinâmica das chuvas na região.

A concentração e o fluxo de CH₄ foram mais sensíveis à umidade do solo quando comparado com a concentração e o fluxo de CO₂.

Tão importante quanto a redução das emissões, deve-se considerar, também, as remoções de gás carbônico da atmosfera. Nesse caso, a pastagem produtiva tem papel importante ao estocar no solo o carbono retirado do ar por meio da fotossíntese dos capins tropicais, muito eficientes nessa função.

K. grandifoliola é uma espécie exótica de rápido crescimento e boa adaptação às condições edafoclimáticas da região e apresenta grande potencial produtivo no oeste da Amazônia. Solos de pastagens degradadas são emissoras de CO₂ e CH₄ e podem ser convertidas a áreas de produção agropecuária sustentável na amazônica com vantagens ambientais e econômicas.

A conversão de áreas de pastagens degradadas em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta reduziu as emissões de gases de efeito estufa na Amazônia aos 10 anos. A implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em áreas desmatadas há décadas, com pastagens degradadas e baixa capacidade produtiva, aponta alto potencial de mudança com o foco em desenvolver uma agropecuária sustentável na Amazônia.

Esta pesquisa é um suporte para tomada de decisão sobre implantação de agricultura conservacionista na Amazônia e produção de produtos naturais de alto valor agregado no mercado – castanha e cumaru – que causa baixo impacto na emissão de GEE e tem capacidade para incrementar a economia local. Recomenda-se novas pesquisas do mesmo segmento nesta

região, com o intuito de investigar estratégias de uso racional de recursos naturais na produção agropecuária, principalmente pelo atual cenário estabelecido da crise climática.

Referências

Artaxo, P. Mudanças climáticas e o Brasil. *Rev. USP* **2014**, 103, 8–12. <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/99191>.

Bartlett, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society of London Series A* 160, 268–282. doi: 10.1098/rspa.1937.0109.

Bernardi, R.E.; de Jonge, I.K.; Holmgren, M. Trees improve forage quality and abundance in South American subtropical grasslands. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2016**, 232: 227–231. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.003>.

Brasil, M.C.T.I. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. MCT, Brasília, 2016. <http://www.ccst.inpe.br/publicacao/terceira-comunicacao-nacional-do-brasil-a-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-mudanca-do-clima-portugues/> (accessed in november 26, 2023).

Cândido, A.C.T.F.; Guerreiro Martorano, L.; Cândido, B.U.F.; Nascimento, W.; Dias, C.T.d.S.; Lisboa, L.S.S.; Fernandes, P.C.C.; Silva, A.R.; Dias-Filho, M.B.; Beldini, T.P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. *Forests* **2023**, 14, 1463. <https://doi.org/10.3390/f14071463>

Carvalho, A.M.; Oliveira, W.R.D.; Ramos, M.L.G.; Coser, T.R.; Oliveira, A.D.; Pulrolnik, K.; Souza, K.W.; Vilela, L.; Marchão, L.R. Soil N₂O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **2017**, 107: 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9823-4>.

Carvalho, P.C.F.; Anghinoni, I.; de Moraes, A.; de Souza, E.D.; Sulc, R.M.; Lang, C.R.; Flores, J.P.C.; Lopes, M.L.T.; Silva, J.L.S.; Conte, O.; Wesp, C.L.; Levien, R.; Fontaneli, R.S.; Bayer, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2010**, 88, 259–273. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>.

de Azevedo, T.R.; Costa Junior, C.; Brandão Junior, A.; Cremer, M.D.S.; Piatto, M., Tsai, D.S.; Barreto, P.; Martins, H.; Sales, M.; Galuchi, T.; Rodrigues, A.; Morgado, R.; Ferreira, A.L.; Barcellos e Silva, F.; Viscondi, G.d.F.; dos Santos, K.C.; Cunha, K.B.d.; Manetti, A.; Coluna, I.M.E.; Albuquerque, I.R.d.; Junior, S.W.; Leite, C.; Kishinami, R. SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. *Sci. Data.* **2018**, 5 (1), 180045. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.45>.

Dias Filho, M.B. *Degradação de pastagens: o que é e como evitar*, 1 st ed.; Embrapa: Brasília, DF, Brasil, 2017; pp 19.

dos Santos, L.E.; Martorano, L.G.; Silva, A.R.; Gama, J.R.V. Teor de carbono em folhas, galhos e fustes de *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. e *Khaya grandifoliola* C. DC. em sistemas integrados na Amazônia oriental brasileira. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible* **2023**, 16 (43), 910–923. <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n43-026>

Dube, F.; Espinosa, M.; Stolpe, N.B.; Zagal, E.; Thevathasan, N.V.; Gordon, A.M.; Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. *Agrofor. Syst.* **2012**, 86, 113–128. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9471-7>.

Dunn, O.J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 6(3), 241. <https://doi.org/10.2307/1266041>

EMBRAPA, Brazilian Agricultural Research Corporation. ABC Sector Plan – Sector Plan for Mitigation and Adaptation to Climate Change for the Consolidation of a Low-Carbon Economy in Agriculture. (2022). Available online at: <https://www.embrapa.br/en/tema-agricultura-de-baixo-carbono/sobre-o-tema> (accessed August 30 2023).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária–EMBRAPA; Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, Brazil, 2006; p. 306

Fearnside, P.M. Environmente: Deforestation soars in the Amazon. *Nature* **2015**, 521:423. <https://doi.org/10.1038/521423b>.

Ferreira Junior, M.J.A.; Oliveira Junior, R.C.; Silva, R.; Moura, J.M.S.; Furtado Neto, A.; Ponte, M.X.; Beldini, T.P. Assessing the impact of different tillage systems and land uses on CO₂-C emissions in Eastern Amazonia. *African Journal of Agricultural* **2017**, 12(30), 2427-2441. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12218>.

Franzluebbers, A.J.; Stuedemann, J.A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop–livestock system in the southeastern USA. *Eur. J. Agron.* **2014**, 57, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.009>.

Furtado Neto, A.T.; Moura, J.M.S.; Silva, R.; Oliveira Junior, R.C.; Gatti, L.V.; Röckmann, T. Produção e Fluxo de Metano na Floresta Nacional do Tapajós. *Revista Brasileira de Meteorologia* **2019**, 34, 585-596. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778634407>.

Gabriel, K.R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* **1971**, 58 (3), 453-467. <http://dx.doi.org/10.1093/biomet/58.3.453>.

Garofalo, D.F.T.; Novaes, R.M.L.; Pazianotto, R.A.A.; Maciel, V. G.; Brandão, M.; Shimbo, J.Z.; Matsuura, M.I.S.F. Land-use change CO₂ emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2022**, 364: 132549. [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=1144859&biblioteca=vazio&busca=\(autoria:%22GAROFALO%22\)&qFacets=\(autoria:%22GAROFALO%22\)&sort=&paginaacao=t&paginaAtual=1](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=1144859&biblioteca=vazio&busca=(autoria:%22GAROFALO%22)&qFacets=(autoria:%22GAROFALO%22)&sort=&paginaacao=t&paginaAtual=1)

Giller, K.E.; Delaune, T.; Silva, J.V.; Descheemaeker, K.; van de Ven, G.; Schut, A.G.T.; van Wijk, M.; Hammond, J.; Hochman, Z.; Taulya, G.; et al. The future of farming: Who will produce our food? *Food Sec.* **2021**, 13, 1073–1099. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01184-6>

Glatzle, S.; Stuerz, S.; Giese, M.; Pereira, M.; Almeida, R.G.; Bungenstab, D.J.; Macedo, M.C.M.; Asch, F. Seasonal dynamics of soil moisture in an Integrated-Crop-Livestock-Forestry system in central-west Brazil. *Agriculture* **2021**, 11: 245, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030245>.

Global Methane Pledge. Available online: <https://www.globalmethanepledge.org/> (accessed on 23 August 2023).

Goldenfum, J.A. (Ed.). GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs: Derived From: The UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project. International Hydropower Association (IHA), 2010.

Hickman, J.E.; Palm, C.A.; Mutuo, P.; Melillo, J.M.; Tang, J. Nitrous oxide (N₂O) emissions in response to increasing fertilizer addition in maize (*Zea mays* L.) agriculture in western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **2014**, 100: 177-187. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9636-7>.

IPCC. Summary for Policymakers. In Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press: Cambridge, UK; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2022. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/summary-for-policymakers/016527EADDEE2178406C4A7CE7DEAEACA>

Keppler, F.; Hamilton, J.T.G.; Brass, M.; Röckmann, T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, **2006**, 439, 187-191. <https://doi.org/10.1038/nature04420>

Kim, D.G.; Kirschbaum, M.U. The effect of land-use change on the net exchange rates of greenhouse gases: a compilation of estimates. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2015**, 208: 114- 126.

Kim, D.G.; Thomas, A.D.; Pelster, D.; Rosenstock, T.S.; Sanz Cobena, A. Greenhouse gas emissions from natural ecosystems and agricultural lands in sub-Saharan Africa: synthesis of available data and suggestions for further research. *Biogeosciences* **2016**, 13: 4789-4809.

Kruskal, W.H.; Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583. <https://doi.org/10.2307/2280779>

Lameira, M.K.S.; Silva, H.K.M.; Gomes, K.M.A.; Ferreira, A.C.T.; Martorano, L.G.; Ribeiro, R.B.S.; Silva, A.R.; Gama, J.R.V. Capacidade produtiva de *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. em sistema de produção de pecuária integrada no Baixo Amazonas. *Rev. For. Mesoam. Kuru-Rfmk* **2022**, 19, 56–65. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/6102>.

Martorano, L.G.; Soares, W.B.; Moraes, J.R.S.C.; Aparecido, L.E.O. Villa, P.M. Climatology of Air Temperature in Belterra: Thermal Regulation Ecosystem Services Provided by the Tapajós National Forest in the Amazon. *Revista Brasileira de Meteorologia* **2021**, 36, 327-337. <https://doi.org/10.1590/0102-77863620015>.

Martorano, L.G.; Vitorino, M.I.; da Silva, B.P.P.C.; de Moraes, J.R.S.C.; Lisboa, L.S.; Sotta, E.D.; Reichardt, K. Climate conditions in the eastern amazon: Rainfall variability in Belem and indicative of soil water deficit. *Afr. J. Agric. Res.* **2017**, 12, 1801–1810.

Mazzetto, A.M.; Barneze, A.S.; Feigl, B.J.; Van Groenigen, J.W.; Oenema, O.; Cerri, C.C. Temperature and moisture affect methane and nitrous oxide emission from bovine manure patches in tropical conditions. *Soil Biol. Biochem.* **2014**, 76, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.026>

Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Plano ABC+. (2021). Available online at: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/abc-english.pdf/view> (accessed 30 August 2023).

Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações. Inventário Nacional de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (GEE) da Quarta Comunicação Nacional do Brasil – Emissões por subsetor. Emissões de GEE por Subsetor — Português (Brasil) (2021). Available online: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/arquivos/SIRENE/Comunicacoes-Nacionais-do-Brasil-a-UNFCCC/2020_12_22_4CN_v5_PORT_publicada.pdf (accessed August 30 2023).

Moraes, A.; Carvalho, P.C.F.; Anghinoni, I.; Lustosa, S.B.C.; Costa, S.E.V.G.A.; Kunrath, T. R. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. *Eur. J. Agron.* **2014**, *57*, 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>.

Nair, P.K.R. Climate change mitigation: A low-hanging fruit of agroforestry. In *Agroforestry - The future of global land Use*, 2nd ed.; Nair, P.K.R., Garrity, D. Eds.; Springer Netherlands, London, UK, 2012; Volume 1, pp. 31–67.

Nair, P.K.R.; Tonucci, R.G.; Garcia, R.; Nair, V.D. Silvopasture and carbon sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In *Carbon sequestration potential of agroforestry systems*, 2nd ed.; Kumar, B.M., Nair, P.K.R.; Eds.; Springer Netherlands: London, UK, 2011; Volume 1, pp. 145-162.

Nan, L.; Shang, L.; Zhixin, Y.; Jiang, Y. Estimation of agricultural greenhouse gases emission in interprovincial regions of China during 1996–2014. *Natural Hazards* **2020**, *100* (3): 1037–1058. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03838-3>

Nepstad, D.; McGrath, D.; Stickler, C.; Alencar, A.; Azevedo, A.; Swette, B.; Bezerra, T.; DiGiano, M.; Shimada, J.; Motta, R.; Armijo, E.; Castello, L.; Brando, P.; Hansen, M.; McGrath-Horn, M.; Carvalho, H.L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, **2014**, *344*(6188):1118-1123. <https://10.1126/science.1248525>

Oliveira Júnior, J.; Nilo, I.C.; Ferreira, R.T. Convergência Microrregional no Setor Agrícola Usando um Modelo com Efeito Threshold. *Economia* **2009**, *10* (3): 553–576.

Oliveira, P.P.A.; Pezzopane, J.R.M.; Barbardi, A.C.C.; Garcia, A.R.; Berndt, A.; Pedroso, A.F.; Januário, A.L. Medeiro, L.S.R. Potencial de produção de carne carbono neutro por bovinos machos da raça Nelore em sistema silvipastoril com capim-Piatã e eucalipto: Embrapa Pecuária Sudeste - São Carlos, SP. ISSN 1980-6841, Abril, 2022. Documentos 142, Embrapa.

Paula, R.R.; Reis, G.G.; Reis, M.G.F.; Neto, S.N.O.; Leite, H.G.; Melido, R.C.N.; Lopes, H.N.S.; Souza, F.C.S. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. *Agrofor. Syst.* **2013**, *87*: 1295–1307. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9638-5>.

Peters, M.; Rao, I.; Fisher, M.; Subbarao, G.; Martens, S.; Herrero, M.; Hoek, R. van der.; Schultze-Kraft, R.; Miles, J.; Castro, A.; Graefe, S.; Tiemann, T.; Ayarza, M.; Hyman, G. In *Eco-Efficiency: From Vision to Reality Tropical forage-based systems to mitigate greenhouse gas emissions*. Hershey, C. H., Neate, P., Eds IN: CIAT. 2013. Eco-efficiency: From vision to reality - Issues in tropical agriculture. Cali, Colombia: 25 May 2012.

Ramos, J.C.d.A. Emissão de CO₂, quantidade e qualidade do carbono do solo em sistemas agrícolas na região do cerrado do Mato Grosso do Sul. Doutorado em Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, 01 Nov 2018.

Rencher, A.C. *Methods of Multivariate Analysis*, 2nd ed.; A John Wiley & Sons, Inc. Publication: Hoboken, NJ, USA, 2002; p. 727.

Rosa, J.K.d. Emissões de gases do solo e de excretas de bovinos em integração lavoura-pecuária e pastagem permanente. Doutorado em Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil, 29 Abr 2019.

Saggar, S., N.S.; Bolan, R.; Bhandral, C.B.; Hedley, J.L. A review of emissions of methane, ammonia, and nitrous oxide from animal excreta deposition and farm effluent application in grazed pastures. *N. Z. J. Agric. Res.* **2004**, 47(4):513–44. <https://doi.org/10.1080/00288233.2004.9513618>.

Sakita, G.Z.; Lima, P.M.T.; Abdalla Filho, A.L.; Bompadre, T.F.V.; Ovani, V.S.; Chaves, C.M.S.; Bizzuti, B.E.; Costa, W.S.; Paim, T.P.; Campioni, T.S.; et al. Treating tropical grass with fibrolytic enzymes from the fungus *Trichoderma reesei*: Effects on animal performance, digestibility and enteric methane emissions of growing lambs. *Anim. Feed Sci. Tech.* **2022**, 286, 115253. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115253>

Santos, I.L.; Oliveira, A.D.; Figueiredo, C.C.; Malaquias, J.V.; Santos Junior, J.D.G.; Ferreira, E.A.B.; Sa, M.A.C.; Carvalho, A.M. Soil N₂O emissions from long-term agroecosystems: interactive effects of rainfall seasonality and crop rotation in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2016**, 233: 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.027>.

Shapiro, S.S. Wilk, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* **1965**, 52 (3/4): 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>

Silva, C.M.; Vasconcelos, S.S.; Morão Júnior, M.; Bispo, C.J.C.; Kato, O. R.; Silva Junior, A.C.; Castelani, D.C. Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. *Acta Amaz.* **2016**, 46 (1): 1-12 <https://doi.org/10.1590/1809-4392201500193>.

Silva, J.C.N.; Silva, A.R.; Veloso, C.A.C.; Dantas, E.F.; do Sacramento, J.A.A.S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. *Rev. Bras. Eng. Agric. E Ambient.* **2018**, 22, 837–842. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p837-842>.

Siqueira Neto, M.; Piccolo, M.C.; Costa Junior, C.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; 2011. Greenhouse gas emissions in different land uses in the Cerrado biome. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2011**, 35: 63-76. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100006>.

Smith, K.A. Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales. *European Journal of Soil Science* **2017**, 68:137-155. <https://doi.org/10.1111/ejss.12409>.

Tornton, P.K.; Herrero, M. Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2010**, 107: 19667–19672. <https://www.pnas->

org.translate.googleusercontent.com/translate?_x_tr_sl=pt&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=wapp.

Torres, C.M.M.E.; Jacovine, L.A.G.; Neto, N.O. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. *Sci Rep* **2017**, *7*: 16738. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16821-4>.

Wickham, H.; Navarro, D.; Pedersen, T.L. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (3rd ed.). Springer. <https://ggplot2-book.org/>

Wilkinson J, Bors C, Burgis F, Lorke A, Bodmer P. Measuring CO₂ and CH₄ with a portable gas analyzer: Closed-loop operation, optimization and assessment. *PLoS ONE* **2018**, *13*(4): e0193973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193973>.

WMO World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin): The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011. n. 8, p. 1-4, 2012

Zanchi, F.B.; da Rocha, H.R.; De Freitas, H.C.; Kruijt, B.; Waterloo, M.J.; Manzi, A.O. Measurements of soil respiration and simple models dependent on moisture and temperature for an Amazonian southwest tropical Forest. *Biogeosciences Discuss*, **2009**, *6*: 6147-6177. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-6147-2009>.

CAPÍTULO IV - Indicadores de sustentabilidade expressos em atributos do solo sob sistema silvipastoril no oeste da Amazônia, Brasil

Resumo: Objetivou-se avaliar a dinâmica da matéria orgânica do solo como indicador de sustentabilidade em uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) implantada em 2010 com sistema integrado de produção pecuária no oeste do Pará. A unidade é composta por talhões contendo diferentes usos do solo, sendo esses, pastagem produtiva (*Panicum maximum* cv. Mombaça) a pleno sol, pastagem degradada (*Panicum maximum* cv. Mombaça como espécie predominante) a pleno sol, floresta secundária, bosque natural e três sistemas integrados silvipastoris (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*), destinados ao bem-estar do rebanho bovino, na região oeste paraense. Em cada local de estudo foram coletadas seis repetições de amostras de solo deformadas e indeformadas nas seguintes profundidades: 0,00 - 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30, 0,30 – 0,50 m no mês de março do ano de 2020. Foram realizadas as análises de matéria orgânica do solo, macronutrientes, micronutrientes, pH, densidade e granulometria. Os valores dos atributos químicos do solo apresentaram variações sob os usos de solo nas profundidades avaliadas. A densidade do solo foi significativamente menor na floresta secundária em relação as demais áreas ao longo de todo perfil do solo avaliado. O tempo de implantação dos sistemas integrados avaliados nesse trabalho, nas condições do estudo estabelecido, não foi determinante na alteração de quantidades do C e estoque de C no solo nas áreas de sistema integrado silvipastoril, sendo necessária a permanência de estudos ao longo do tempo e o acompanhamento para identificação de mudanças nas propriedades do C sob esses sistemas nessa região.

Palavras-chave: Carbono; estoque de carbono; densidade do solo; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; pastagem.

Abstract: The objective was to evaluate the dynamics of soil organic matter in a Technological Reference Unit (URT) implemented in 2010 with an integrated livestock production system in western Pará. The unit is composed of plots containing different soil uses, these being, productive pasture (*Panicum maximum* cv. Mombaça) in full sun, degraded pasture (*Panicum maximum* cv. Mombaça as the predominant species) in full sun, secondary forest, natural forest and three integrated silvopastoral systems (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* and *Khaya grandifoliola*), intended for the well-being of the cattle herd, in the western region of Pará. At each study site, six replicates of deformed and undisturbed soil samples were collected at the following depths: 0.00 - 0.10, 0.10 – 0.20, 0.20 – 0.30, 0.30 – 0.50 m. Analyzes of soil organic

matter, macronutrients, micronutrients, pH, density and granulometry were carried out. The values of soil chemical attributes showed variations under soil uses at the depths evaluated. Soil density was significantly lower in the secondary forest compared to other areas throughout the entire soil profile evaluated. The implementation time of the integrated systems evaluated in this work, under the conditions of the established study, was not decisive in changing the amounts of C and C stock in the soil in the areas of integrated silvopastoral system, requiring continued studies over time and monitoring to identify changes in the properties of C under these systems in this region.

Keywords: Carbon; carbon stock; soil density; *Bertholletia excelsa*; *Dipteryx odorata*; *Khaya grandifoliola*; pasture.

4.1.Introdução

As florestas tropicais mantêm cerca de dois terços da biodiversidade terrestre (Barlow et al. 2018), onde a contribuição das espécies florestais recicla para atmosfera vapor d'água pelo processo evapotranspiratório (Malhi, 2012), além de armazenar cerca de 50% do carbono terrestre (Erb et al. 2018; Baccini et al. 2012).

A floresta Amazônica, quimicamente, possui papel preponderante na formação das nuvens, o que se torna altamente comprometido pelo processo das queimadas, muitos núcleos de condensação enviados para atmosfera em um curto período de tempo, influenciando no tamanho das gotas de chuva na região (Cordova et al. 2004; Artaxo et al. 2005), reforçando que as pesquisas vêm sinalizando sobre a importância de manutenção do componente florestal na dinâmica climática global (Artaxo et al. 2022). Apesar de sua importância, as florestas tropicais estão a ser gravemente afetadas com perdas significativas de carbono, principalmente pelas atividades humanas (França et al. 2020, Friedlingstein et al. 2022), por exemplo, pelo avanço do desmatamento.

Entre os nove estados que constituem a Amazônia brasileira, o Pará apresentou as maiores taxas de desmatamento nas últimas décadas (INPE, 2021), com média de 4.786 ± 328 km² ano⁻¹ de taxa de perdas de áreas com florestas. A região de Santarém-Belterra, no oeste paraense está entre essas áreas de forte pressão pelo processo agrícola produtivo, com aumento das áreas cultivadas com grãos devido à topografia e condições climáticas favoráveis, bem como as melhorias na infraestrutura portuária e logística para escoamento pelo porto fluvial de Santarém (Durigan et al. 2017). As taxas de desmatamento na região para converter em terras

agricultáveis são mais baixas quando comparadas com outros tipos de mudança de uso da terra (Thaler et al. 2019).

A perda de biomassa florestal intensifica também as perdas de C no solo, contribuindo ainda mais para as emissões de GEE, apontados como aceleradores de mudanças climáticas globais (Morgan et al. 2019). No Brasil, a agricultura e as mudanças no uso da terra são responsáveis por aproximadamente 80% das emissões nacionais de gases de efeito estufa e cerca de 51% das emissões brasileiras de CO₂ tem origem no bioma Amazônia (Song et al. 2015).

A conversão de ecossistemas naturais em sistemas modificados pelo homem é considerada a principal causa das emissões antrópicas de CO₂ para a atmosfera (Brando et al. 2020). Contudo, dependendo do sistema produtivo adotado, essas áreas podem atuar como sumidouro de emissões de C (Caviglia-Harris 2018). Entre os indicadores de estoques de C do solo é possível avaliar os valores de textura e de densidade do solo, por exemplo, os quais estão associados aos aportes de C provenientes de serapilheira ou resíduos de culturas anuais, em sistemas como o plantio direto, em decorrência da manutenção da umidade no solo que reflete na regulação térmica nas camadas mais superficiais do solo (Martorano et al., 2009). Essas e outras variáveis contribuem espacialmente em processos que explicam a heterogeneidade nos estoques de C no solo, tornando difícil inventariar estas alterações nos estoques em diferentes ecossistemas (Gomes et al. 2019).

Assim, a perda de biomassa florestal influencia na conservação de características edáficas relacionadas à manutenção de qualidade do solo, uma vez que a perda de biodiversidade, o rápido declínio da fertilidade e a alteração das propriedades físicas e químicas do solo, as quais respondem ao desmatamento (Kassa et al. 2017; Franco et al. 2019).

A textura e estrutura do solo estão associadas à distribuição de partículas e ao arranjo das partículas nos agregados, respectivamente. A porosidade também é um atributo importante, pois é responsável por um conjunto de fenômenos que desenvolvem uma série de mecanismos essenciais na física do solo, como retenção e fluxo de água e ar (Reinert e Reichert, 2006).

As propriedades químicas do solo também podem ser consideradas variáveis bastante responsivas sobre a qualidade do solo após o processo de degradação, uma vez que o solo é um dos estoques de carbono mais eficientes, podendo armazenar até três vezes mais carbono no solo em comparação com a vegetação ou a atmosfera (Lal, 2004). Ressalta-se que a maior fração nutricional está na forma orgânica, presente em matéria orgânica, tornando-se sensível a perdas em decorrência de qualquer forma de manejo inadequado do solo (Cantarella, 2007; Cerri & Cerri, 2007). A conversão da vegetação nativa para terras agrícolas ou pastagens pode causar

acúmulo ou perda de carbono orgânico do solo, dependendo do tipo de gestão aplicada (Fujisaki et al. 2015; Carvalho et al. 2010; Fearnside e Barbosa, 1998)

Quantificar a biomassa e o estoque de carbono do solo (C) é o primeiro passo para avaliar os impactos das mudanças do clima no uso da terra na Amazônia (Fearnside, 2018). Os solos, com importante papel no ciclo do C global, fornecem muitos serviços ecossistêmicos que beneficiam os seres humanos, como a regulação climática (através do sequestro de carbono no solo e na biomassa das plantas), ciclo da água e regulação da erosão do solo (através da infiltração de água no solo) e apoio à produção primária, mantendo a qualidade do solo e conservação da água (*Millennium Ecosystem Assessment Ecosystem and Human Well-Being*, 2005).

A conversão das florestas na região amazônica para pastagens e a baixa capacidade produtiva tem apontado indicadores de alta emissão de GEE na região pela pecuária (Reis et al. 2018; Oliveira et al. 2022). Estratégias de recuperação e/ou renovação de pastagens em vias de degradação estão apontando indicadores como aumento no rendimento agrícola nacional com redução dos impactos no solo e na necessidade de abertura de novas áreas (Dias-Filho, 2014; Barbieri et al., 2017; Sousa et al., 2020; Capristo et al., 2021). Entre essas estratégias estão os sistemas agrícolas integrados que combinam atividades agrícolas, pecuárias e florestais na mesma área, a exemplo dos sistemas que integram pecuária com silvicultura, denominada de silvipastoril.

A mudança pela adoção do sistema dependerá da situação econômica e características geográficas da região, acesso a incentivos financeiros, instalações agrícolas e competências dos agricultores, estratégia de produção, bem como aspectos culturais (Balbino et al. 2011a, b; Galford et al. 2013; Gil et al. 2015). Os benefícios são inúmeros, principalmente em se tratando de melhorias nas condições físicas, propriedades químicas e biológicas do solo (Faccio Carvalho et al. 2021; Silva et al. 2021) que são importantes indicadores de sustentabilidade, dada a complexidade dos processos envolvidos no solo e suas interações ambientais (Vezzani e Mielniczulk, 2009). Variáveis associadas à fertilidade do solo, aspectos físicos como estrutura, atividade biológica e matéria orgânica devem ser avaliados, dada a sensibilidade em decorrência do tempo de adoção desses sistemas produtivos, a partir da adoção de métodos quantitativos ou qualitativos com maior sensibilidade (Simon et al. 2022).

Como aspectos de sustentabilidade, que é um foco desse trabalho, busca-se um sistema sustentável porque defende a utilização dos nutrientes, água e luz disponíveis com a máxima eficiência, trazem retornos econômicos aos agricultores através da produção de diversos produtos agrícolas, é baseada em importantes processos edáficos como a dinâmica da matéria

orgânica do solo (MOS) e a ciclagem de nutrientes são favorecidos e influenciados positivamente pela maior densidade de plantas e por fim, constantes entradas de serapilheira e cobertura do solo associadas à existência de sistemas radiculares extensivos em sistemas florestais consorciados contribuem para o aumento dos níveis de C e N orgânico do solo, melhorando a qualidade do solo ao longo do tempo.

Portanto, objetivou-se com o presente estudo avaliar características físicas e químicas do solo como indicador de sustentabilidade em uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) implantada em 2010 com sistema de produção pecuária integrada no oeste do Pará.

4.1. Material e métodos

4.2.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado no município de Mojuí dos Campos, no estado do Pará - Brasil, sendo a área experimental uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) de sistemas de produção integrados silvipastoris, implantada na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, através de uma parceria da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Amazônia Oriental com o proprietário da unidade produtiva. A Fazenda está localizada nos limites dos municípios, portanto, abrange Mojuí dos Campos, Belterra e Santarém.

A unidade é composta por talhões contendo diferentes usos do solo, sendo esses, pastagem produtiva (*Panicum maximum* cv. Mombaça) a pleno sol, pastagem degradada (*Panicum maximum* cv. Mombaça como espécie predominante) a pleno sol, floresta secundária, bosque e três sistemas integrados silvipastoris (*Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata* e *Khaya grandifoliola*), destinados ao bem-estar do rebanho bovino, na região oeste paraense.

A área de estudo encontra-se a 152 metros de altitude, localizada entre as coordenadas geográficas 02°38'11" de latitude S e 54°56'13" de longitude W. Na Figura 1, observa-se o mapa temático contendo as classes de solos dominantes como primeiro componente do mapa de solos da região. As condições climáticas apresentam características típicas de clima Am₃ (Martorano et al., 2017), em que as chuvas anuais variam entre 2000 a 2500 mm, tendo no mês menos chuvoso valores abaixo de 60 mm, conforme descrito por Martorano et al. (1993) para esse subtipo climático. Como a área experimental encontra-se no raio de abrangência da estação meteorológica do município de Belterra, a temperatura média anual é 24,9 °C com máximas da ordem de 29,7°C e mínimas de 20,9°C (Martorano et al., 2021), O solo da área de estudo é classificado como Latossolo Amarelo textura argilosa (Embrapa, 2006), sendo possível verificar na Figura 1 as classes de solos dominantes na área de estudo, onde é possível

identificar a localização do sistema implantado em 2010, contendo os talhões com os componentes arbóreos, pastagem a pleno sol e a área de floresta no entorno, na fazenda Nossa Senhora Aparecida (Mojuí dos Campos/PA).

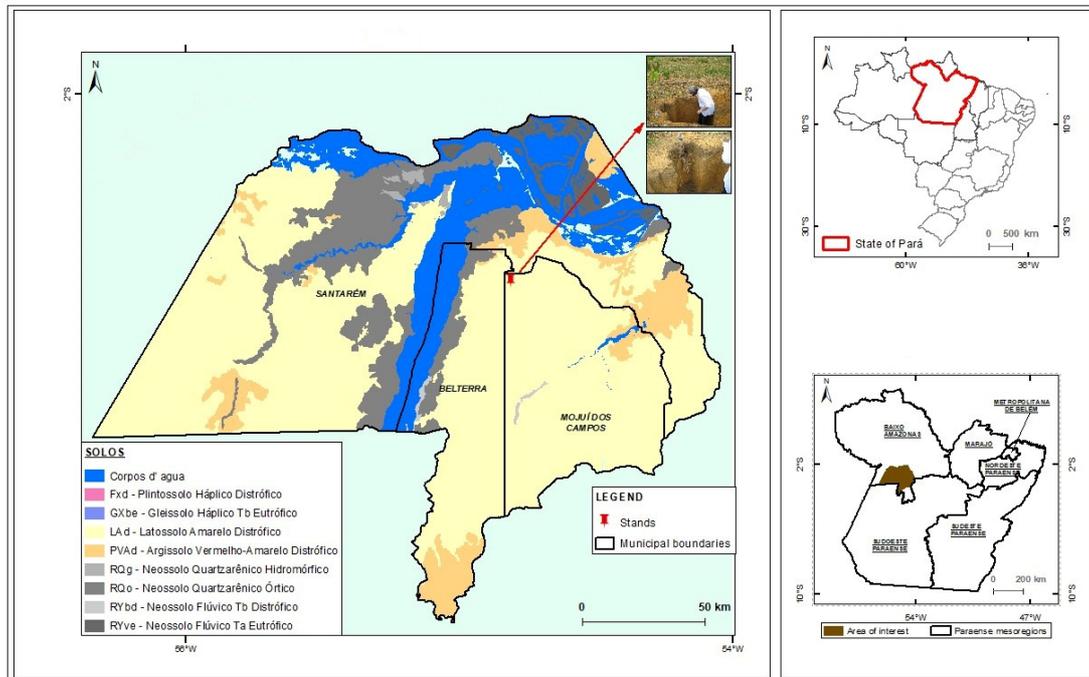


Figura 1. Mapa físico da classe de solos na localização da área de estudo no município de Mojuí dos Campos, no Estado do Pará (Brasil), destacando a Fazenda Nossa Senhora Aparecida, ano 2024.

Fonte Autores.

4.2.2. Histórico de uso das áreas de estudo

Nesta pesquisa, estudou-se um sistema silvipastoril, implantado no ano de 2010, cujo arranjo é formado por duas pastagens produtivas e cultivos silviculturais adjacentes, que servem como áreas de bosques para conforto térmico animal. Também foi avaliada uma pastagem em vias de degradação, que apresenta um bosque de formação natural no centro da área. A caracterização e o histórico das áreas de estudo estão descritos na Tabela 1 e as especificações nas áreas avaliadas no entorno aos três talhões florestais estão descritos na Tabela 2, conforme Cândido et al. (2023) e Silva et al. (2018).

Tabela 1 – Caracterização e histórico das áreas de estudo na Fazenda Nossa Senhora Aparecida – Mojuí dos Campos, Pará. Ano: 2020.

Área	Manejo	
Castanha da Amazônia (<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.)	Estes cultivos silviculturais compõem o sistema silvipastoril, implantados em arranjo tipo bosque, localizados ao lado das pastagens produtivas, servindo como talhões sombreados para proporcionar conforto térmico ao rebanho bovino. Destaca-se que as espécies florestais implantadas foram selecionadas com o intuito de produção de bens e serviços na propriedade rural. Cada espécie foi implantada em uma área de 0,92 ha, em espaçamento 7 × 5 m, totalizando 280 plantas que foram consorciadas com culturas agrícolas anuais até o estabelecimento do componente arbóreo nos talhões. Antes da implantação da URT fez-se coleta e análise do solo, contendo as seguintes características: pH = 5,26, MO = 30,66 g kg ⁻¹ , Al ³⁺ = 0,43 cmol _c dm ⁻³ , Ca ²⁺ = 2,96 cmol _c dm ⁻³ , Mg ⁺ = 0,93 cmol _c dm ⁻³ , potássio 0,13 cmol _c dm ⁻³ , fósforo 2,17 mg dm ⁻³ , soma de bases trocáveis = 4,08 cmol _c dm ⁻³ , capacidade de troca de cátions = 4,51 cmol _c dm ⁻³ e V% = 37, de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (2011). Antes do plantio das árvores, o pH e a fertilidade do solo foram corrigidos. Destaca-se que a área, anteriormente era formada por pastagem em vias de degradação e baixa capacidade de suporte.	
Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd)		
Mogno Africano (<i>Khaya grandifoliola</i> C. DC)		

Tabela 2 – Caracterização e histórico no entorno aos talhões com espécies florestais plantadas na Fazenda Nossa Senhora Aparecida – Mojuí dos Campos, Pará. Ano: 2020.

Bosque natural	Esta área é formada por mangueiras (<i>Mangifera indica</i> L.), castanheiras (<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.), árvores de jenipapo (<i>Genipa americana</i> L.), coqueiros (<i>Cocos nucifera</i>) e variadas palmeiras. As árvores que formam esta área são caracterizadas por serem de formação natural, formando um arranjo sem espaçamento definido, formando uma área de aproximadamente 0,70 ha no centro da pastagem em degradação. A arquitetura das copas das árvores desta área apresenta um alto sombreamento com acúmulo de serrapilheira, por isso no sub-bosque não é observado o desenvolvimento de vegetação.
Pastagem degradada	Pastagem formada por <i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça, implantada no ano de 2010. A área apresenta baixa capacidade de suporte, caracterizada segundo Dias Filho (2017) no nível 3 (forte) de degradação pela baixa produtividade, presença excessiva (> 40%) de plantas daninhas, e baixa proporção de forrageiras.
Pastagem produtiva	Uso anterior composto por pastagens em vias de degradação. No ano de 2010 foi realizado o plantio de Soja (cultivar Tracajá). Na segunda adubação da soja foi semeada a forragem (<i>Brachiaria ruziziensis</i>) (20 kg ha ⁻¹). No período de 2011 a 2013, realizou-se o plantio de arroz (Cultivar Sertanejo) (2011) e milho (BRS 1040) (2012 e 2013). Em 2014 foi semeado <i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça, o qual permanece até o presente momento.
Floresta secundária	A área de mata nativa utilizada como controle do experimento foi caracterizada como uma vegetação típica de floresta amazônica, classificada como arbórea densa, com flora arbórea de 15 a 30 m de altura. A área foi tradicionalmente explorada no ano de 1996. Está em estado de regeneração natural com cipós e parcialmente fechados dosséis. A área total de mata nativa é de aproximadamente 18 hectares, localizados a uma distância aproximada de 20 m das áreas de integração silvopastoril (Silva et al., 2018).

4.2.2. Coleta das amostras de solo

A coleta de solo foi realizada no mês de março de 2020 em todas as áreas de estudo. Destaca-se que o terreno onde estão implantados os sistemas de produção apresentam relevo

plano e que não há manchas de solo nos locais. Em cada local de estudo foram coletadas seis repetições de amostras de solo deformadas (com trado holandês) e também indeformadas (com auxílio de coletor e anéis metálicos com volume conhecido) nas seguintes profundidades: 0,0 – 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30 e 0,30 – 0,50 m.

Após a coleta, as amostras deformadas passaram pelo processo de terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras foram homogeneizadas e encaminhadas para as análises de matéria orgânica do solo, macronutrientes, micronutrientes, pH e granulometria no Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental (EMBRAPA/Belém) seguindo a metodologia da Embrapa (1997).

As amostras indeformadas seguiram para análise da densidade do solo no Laboratório de Tecnologia da Madeira (UFOPA/Santarém). Para isso, as amostras foram secas em estufa a 105°C, por um período de 48h, após este período a massa de solo foi mesurada em balança analítica (Embrapa, 2007). Em seguida o cálculo foi realizado conforme a Equação 1.

$$D_s = \frac{M}{V} \quad (1)$$

D: densidade da amostra (kg m^{-3})

M: massa da amostra (kg)

V: volume do anel ou cilindro (m^{-3})

4.2.3. Cálculo do estoque de carbono no solo

O cálculo do estoque de carbono foi realizado segundo Ellert & Bettany (1995), conforme a (Equação 2). Como referência foi utilizada uma área de floresta secundária para corrigir a massa do solo nos demais sistemas de produção estudados, conforme Conceição (2006).

$$E = (T * D_s * e) / 10 \quad (2)$$

em que, E é o estoque de carbono (Mg ha^{-1}), T é o teor de carbono (g kg^{-1}), D_s é a densidade do solo (g cm^{-3}) e e é a espessura da camada do solo (cm).

4.2.4. Análise dos dados

Inicialmente, realizou-se a análise descritiva, com o objetivo de fornecer uma visão geral dos dados, incluindo medidas de tendência central (como média, mediana e moda) e medidas

de dispersão (como desvio padrão e intervalo interquartil). Essas estatísticas descritivas ajudam a entender a distribuição dos dados, identificar valores atípicos e compreender a variabilidade dentro do conjunto de dados.

Para a realização das análises subsequentes, as variáveis foram padronizadas para terem média 0 e variância unitária. Em seguida, realizou-se a Análise de Componentes Principais (ACP). O objetivo é analisar p variáveis X_1, X_2, \dots, X_p e encontrar novas variáveis resultantes de combinações lineares, denominadas Z_1, Z_2, \dots, Z_p , chamadas de variáveis índices ou componentes principais:

$$Z_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p$$

em que: a_{pj} são os elementos correspondentes ao respectivo autovetor relacionado ao componente Z_i e $j = 1, 2, \dots, p$. Essas novas variáveis são não correlacionadas e capturam a maior parte da variância presente no conjunto de dados, desprezando o ruído. A ACP é útil para identificar padrões e relações entre as variáveis e facilita a visualização e interpretação dos dados em um espaço de menor dimensão (Manly; Alberto, 2017).

Além disso, realizou-se a análise de agrupamento, uma técnica exploratória que divide um conjunto de dados em grupos com base em sua similaridade. O objetivo é agrupar observações semelhantes em grupos distintos, enquanto maximiza a diferença entre os grupos e minimiza a diferença multivariada dentro dos grupos. Existem várias abordagens para realizar a análise de agrupamento, incluindo métodos hierárquicos e não hierárquicos. Nesse trabalho, foi utilizado a abordagem hierárquica. A distância euclidiana foi usada para calcular as distâncias entre as p variáveis X_1, X_2, \dots, X_p para n objetos:

$$d_{ij} = \left\{ \sum_{i=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 \right\}^{1/2}$$

em que x_{ik} é o valor da variável X_k para o objeto i e x_{jk} é o valor da mesma variável para o objeto j (Jhonson; Wichern, 2007). De forma conjunta, foi também utilizado o método aglomerativo de Ward.D2 para a construção do dendrograma, que é uma representação visual da estrutura de agrupamento dos dados, contendo as observações agrupadas em diferentes níveis de similaridade.

As observações são representadas nos eixos horizontais, enquanto a medida de similaridade (ou dissimilaridade) entre elas é representada no eixo vertical. No dendrograma, a

altura das ramificações indica a dissimilaridade entre os grupos que estão sendo unidos. Quanto maior a altura, maior a dissimilaridade entre os grupos. Observações unidas em alturas mais baixas são mais similares entre si. A inspeção do gráfico ajuda a identificar o número de grupos presentes nos dados. Isso pode ser feito observando onde cortar o dendrograma horizontalmente para formar os grupos desejados, procurando-se onde as ramificações são mais longas. Uma vez que os grupos são identificados, é possível interpretá-los examinando as observações contidas em cada grupo.

Cada vez que se obtém variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto de variáveis consideradas, é possível fazer uma divisão de grupos. Nesta análise, as áreas foram agrupadas com base no seu grau de semelhança, com o objetivo de classificar os grupos mais homogêneos. Pela disposição no gráfico, ambientes pouco distanciados são mais semelhantes do que os amplamente distanciados.

A partir da visualização dos dendrogramas ficou evidente que uma divisão em 5 grupos explicaria a estrutura subjacente dos dados neste estudo. Todas as análises descritas anteriormente foram executadas no ambiente R (R CORE TEAM, 2021), utilizando os pacotes AgroR (Shimizu, 2022) para as análises descritivas, FactoMineR (Le, 2008) para a ACP, e factoextra (Kassambara, 2020) para a análise de agrupamento e representações gráficas.

Os dados de densidade, carbono e estoque de carbono do solo foram submetidos à análise da variância e as diferenças entre médias avaliadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%, utilizando o programa computacional SAS. Essas variáveis apresentaram homogeneidade de variância pelo teste Levene e normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. Foi verificado existência de pontos discrepantes pelo teste t-Student e independência de resíduos pelo teste de Durbin-Watson.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Caracterização granulométrica e atributos químicos do solo

Nas áreas de estudo predomina a fração argila (Tabela 3), sendo o solo classificado como Latossolo Amarelo textura argilosa (Embrapa, 2006). Predomina argila em todas as áreas, seguida de silte e areia (em menor fração). Essa predominância parece seguir o mesmo padrão para as diferentes profundidades.

Tabela 3 - Caracterização granulométrica do solo nas áreas estudadas, segundo as profundidades, Mojuí dos Campos, 2020.

Áreas	Granulometria					
	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia
	g kg ⁻¹			g kg ⁻¹		
	Profundidade 0,00 – 0,10 m			Profundidade 0,10 – 0,20 m		
<i>B. excelsa</i>	826,67	128,33	45,00	860,00	99,50	40,50
DP	100,13	89,51	11,37	63,24	62,17	3,08
<i>D. odorata</i>	806,67	140,17	53,16	840,00	113,83	46,17
DP	86,41	78,50	9,49	100,40	92,82	7,98
<i>K. grandifoliola</i>	813,33	135,17	51,50	856,67	97,50	45,83
DP	58,88	56,40	5,09	66,23	60,66	6,79
Bosque natural	790,00	151,00	59,00	846,67	104,83	48,50
DP	30,33	25,95	13,02	16,33	16,73	3,62
Pastagem degradada	753,33	181,00	65,67	770,00	173,50	56,50
DP	65,32	58,69	8,43	157,86	156,36	6,02
Pastagem produtiva	760,00	195,17	44,83	813,33	144,17	42,50
DP	40,00	38,03	6,18	20,65	19,61	4,68
Floresta secundária	713,33	233,00	53,67	726,67	237,67	35,66
DP	46,19	10,82	35,92	23,09	18,72	5,51
	Profundidade 0,20 – 0,30 m			Profundidade 0,30 – 0,50 m		
<i>B. excelsa</i>	866,67	93,17	40,16	896,67	69,83	33,50
DP	56,09	51,00	7,00	55,74	53,19	5,46
<i>D. odorata</i>	876,67	84,83	38,50	916,67	54,83	28,50
DP	38,81	34,69	6,06	26,58	25,97	1,97
<i>K. grandifoliola</i>	856,67	108,00	35,33	906,67	64,00	29,33
DP	51,25	48,48	4,97	68,90	65,11	4,32
Bosque natural	883,33	77,17	39,50	900,00	66,00	34,00
DP	32,04	26,83	8,09	33,47	28,51	9,21
Pastagem degradada	873,33	88,83	37,83	906,67	62,33	31,00
DP	46,76	43,10	5,81	41,31	40,69	5,40
Pastagem produtiva	830,00	127,17	42,83	850,00	109,50	40,50
DP	53,29	36,66	17,77	85,56	56,11	30,21
Floresta secundária	820,00	155,00	25,00	853,33	123,00	23,67
DP	20,00	18,52	1,73	23,09	21,70	2,08

Médias de seis repetições nas áreas: integração com *B. excelsa*; integração com *D. odorata*; integração com *K. grandifoliola*; bosque natural; pastagem degradada; pastagem produtiva e floresta secundária; DP: Desvio-padrão.

Observa-se, através do dendrograma, que na profundidade de 0,0-0,10 m, para a caracterização granulométrica do solo, as áreas de integração com *D. odorata* e integração com *K. grandifoliola* apresentaram maior semelhança, por possuírem menor distância euclidiana (Figura 2). Na camada 0,10-0,20 m as áreas de bosque e integração com *D. odorata* apresentaram maior semelhança, na camada 0,20 - 0,30 m as áreas de pastagem degradada e integração com *D. odorata* e na camada de 0,30 – 0,50 m as áreas de bosque apresentou semelhança com integração com *B. excelsa*, assim como a área de pastagem degradada apresentou semelhança com a área de integração com *K. grandifoliola* (Figura 2). Não houve um padrão de similaridade, demonstrando que cada camada apresenta um comportamento diferente quanto a granulometria do solo.

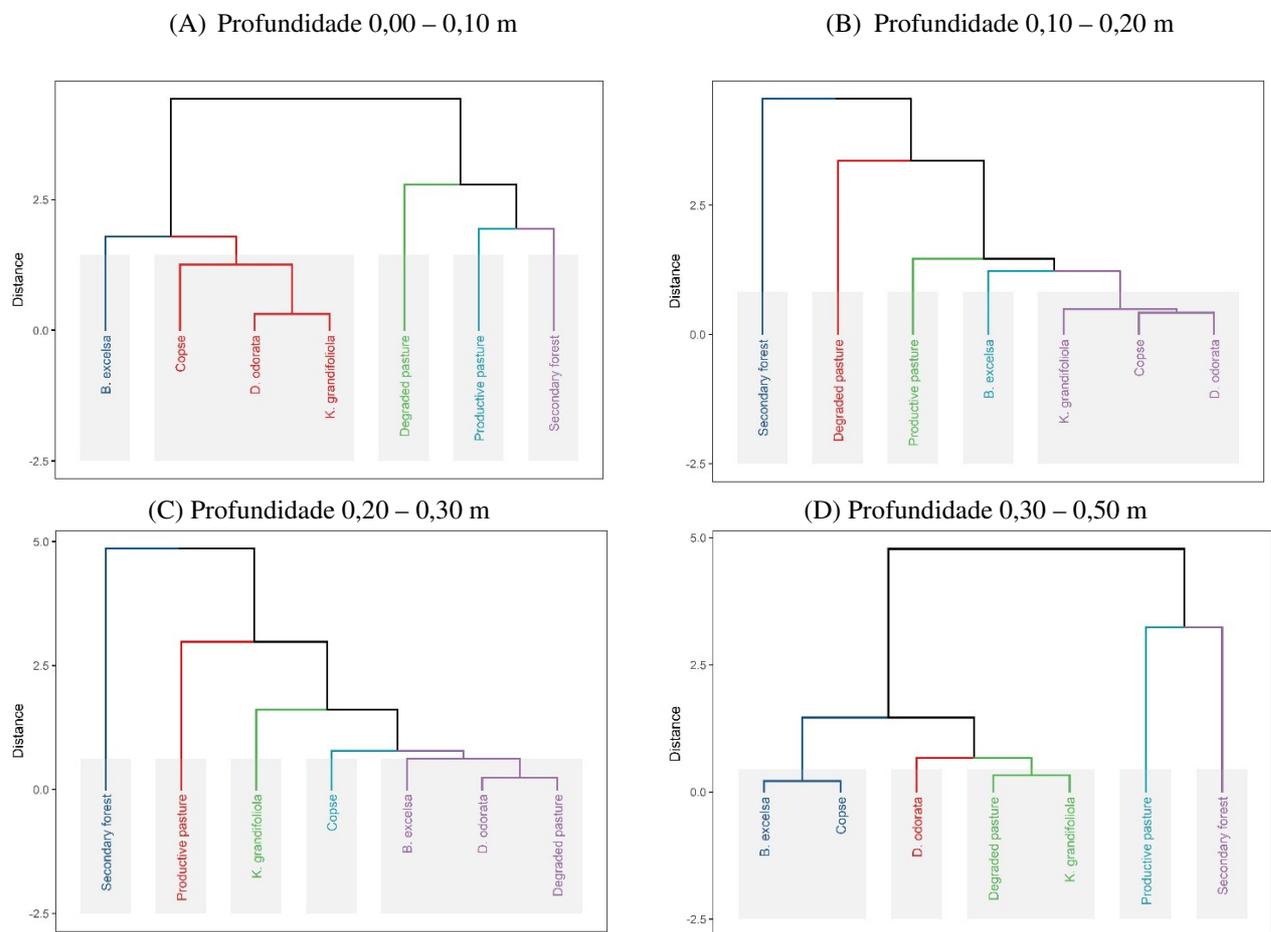


Figura 2. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis caracterização granulométrica do solo nas áreas estudadas: floresta secundária (Secondary forest), bosque natural (Copse), integração com *K. grandifoliola* (*K. grandifoliola*), integração com *B. excelsa* (*B. excelsa*), integração com *D. odorata* (*D. odorata*) pastagem produtiva (Productive pasture), pastagem degradada (Degraded pasture) nas profundidades: A: profundidade 0,0 – 0,10 m; B: profundidade 0,10 – 0,20 m; C: profundidade 0,20 – 0,30 m e D: profundidade 0,30 – 0,50 m.

Os valores da análise de componentes principais (PCA) referentes à caracterização granulométrica do solo nas áreas avaliadas são expressos na Figura 3.

Para a determinação do número de componentes principais, verificou-se os dois primeiros CPs (componentes principais) gerados, a partir das análises que têm porcentagem de variância de 100% devido à natureza dos dados, que são as três frações do solo. O primeiro eixo da PCA (PC1) explicou 81% dos resultados e o segundo eixo, (PC2), por 19% das variações dos dados (Figura 3).

Ao avaliar a interação entre as áreas e os meses monitorados, observa-se que as observações ao centro estão próximas da média geral. As áreas no primeiro quadrante: Degraded_pasture_0-10, Copse_0-10, *D. odorata*_0-10, *K. grandifoliola*_0-10, Degraded_pasture_10-20 e *B. excelsa*_0-10 caracterizam-se por apresentarem maiores valores de areia. As áreas no segundo quadrante: Copse_10-20, *K. grandifoliola*_10-20, Copse_20-30, *D. odorata*_10-20, Copse_30-50 e Degraded_pasture_30-50 caracterizam-se por apresentarem maiores valores de argila e menores valores de silte. As áreas no terceiro quadrante: *K. grandifoliola*_30-50, *D. odorata*_30-50, *K. grandifoliola*_20-30, Secondary forest_30-50 e Secondary forest_20-30 se caracterizam por apresentarem menores valores de areia. Por último, as áreas Productive pasture_20-30 e 10-20, Secondary forest_0-10, Productive pasture_0-10 e Secondary forest_10-20 se caracterizam por apresentarem maiores valores de silte.

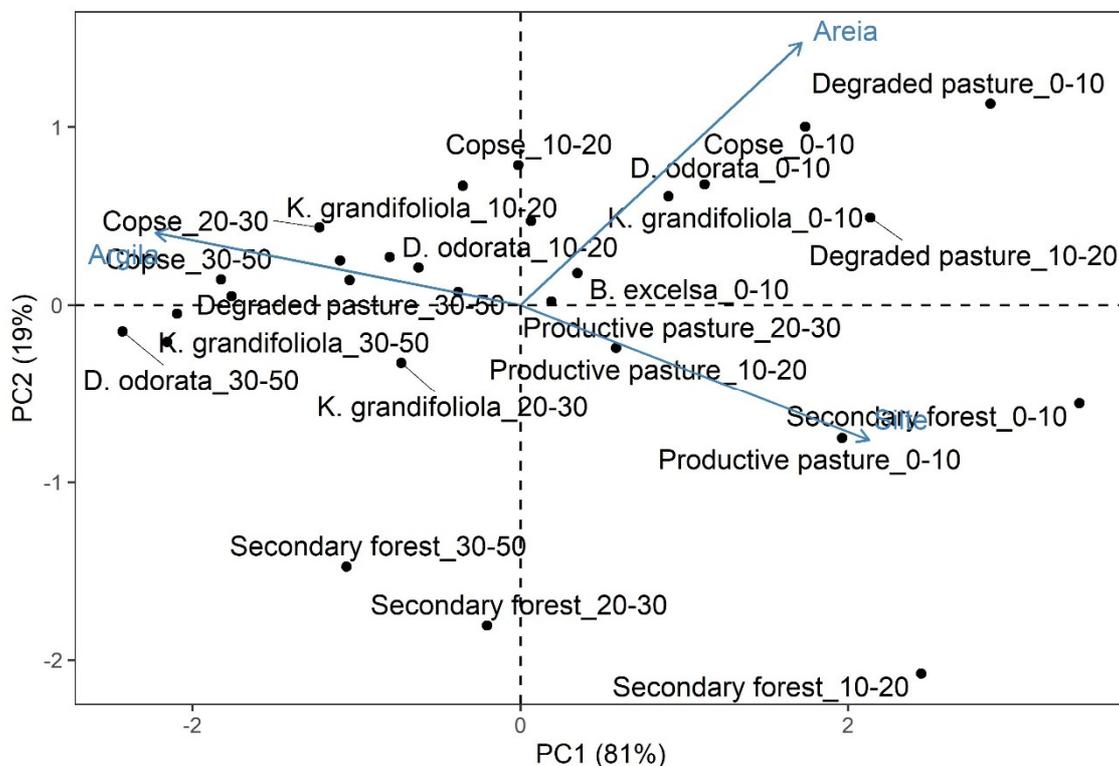


Figura 3. Gráfico biplot (CP1 e CP2) com as variáveis da caracterização granulométrica do solo para as áreas de integração com *B. excelsa*; integração com *D. odorata*; integração com *K. grandifoliola*; bosque natural; pastagem degradada; pastagem produtiva e floresta secundária nas profundidades 0,0 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m; 0,20 – 0,30 m e 0,30 – 0,50 m. Mojuí dos Campos, 2020.

Os valores médios e desvio padrão encontrados para os atributos químicos do solo para as áreas de integração com *B. excelsa*, integração com *D. odorata*, integração com *K. grandifoliola*, bosque natural, pastagem degradada, pastagem produtiva e floresta secundária encontram-se na Tabela 4. Os valores dos atributos químicos do solo apresentaram variações sob os usos de solo nas profundidades avaliadas. O pH do solo dos locais de pesquisa é baixo, característica comum dos solos da Amazônia (Demattê; Demattê, 1993).

Tabela 4 - Caracterização dos atributos químicos do solo nas áreas estudadas, segundo as profundidades, Mojuí dos Campos, 2020. (continua)

Áreas	N	P	K	Na	Al	Ca	Ca+Mg	pH	H +Al	CTC		Saturação	
	%	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			água	cmol _c dm ⁻³	Total	Efetiva	Base	Alumínio
		cmol _c dm ⁻³	V%	m%									
Profundidade 0,00 – 0,10 m													
<i>B. excelsa</i>	0,17	6,86	74,94	6,67	0,58	3,06	3,29	4,48	5,97	9,48	4,09	32,42	22,63
DP	0,03	4,31	48,14	1,31	0,55	2,10	2,77	0,34	0,95	2,89	2,56	19,45	23,50
<i>D. odorata</i>	0,21	11,39	151,94	14,72	0,36	3,92	5,16	4,40	6,24	11,86	5,97	46,55	7,15
DP	0,02	8,36	63,27	12,49	0,36	1,48	1,79	0,21	0,87	1,66	1,57	9,75	3,19
<i>K. grandifoliola</i>	0,20	6,42	42,20	9,92	0,67	2,73	3,82	4,20	7,87	11,85	4,64	34,04	14,82
DP	0,02	2,74	15,65	2,02	0,52	0,87	1,11	0,35	3,01	3,97	0,98	4,11	10,18
Bosque natural	0,23	8,79	166,41	11,46	0,28	4,62	5,33	4,34	6,64	12,45	6,09	41,26	8,62
DP	0,04	3,50	52,92	3,03	0,15	2,57	4,06	0,25	1,02	4,80	4,06	17,28	8,77
Past. degradada	0,25	11,64	144,42	8,46	0,17	5,68	7,54	4,80	6,47	14,42	8,12	53,13	3,03
DP	0,04	7,25	44,54	2,64	0,14	2,73	3,44	0,59	0,62	3,69	3,42	10,27	8,87
Past. produtiva	0,21	17,89	251,29	15,34	0,20	3,75	5,35	4,63	6,86	12,92	6,25	46,30	3,42
DP	0,06	11,61	134,36	3,62	0,07	0,83	1,41	0,18	0,80	2,28	1,72	5,95	1,74
Floresta	0,53	3,00	48,67	12,67	0,27	4,10	5,37	5,30	8,03	13,52	5,75	40,76	5,14
DP	0,18	0,00	21,36	4,51	0,15	1,21	1,60	0,10	2,37	2,56	1,54	11,00	3,26
Profundidade 0,10 – 0,20 m													
<i>B. excelsa</i>	0,14	4,69	50,68	6,04	0,74	1,95	2,61	4,39	5,66	8,43	3,51	32,57	26,62
DP	0,03	2,16	21,99	0,82	0,52	1,27	1,55	0,49	1,61	1,17	1,08	19,30	23,10
<i>D. odorata</i>	0,17	5,08	82,86	9,68	0,64	2,36	2,99	4,43	5,13	8,38	3,89	37,04	21,62
DP	0,01	1,62	39,58	3,28	0,53	1,54	1,92	0,40	1,01	1,09	1,52	17,43	20,54
<i>K. grandifoliola</i>	0,15	5,35	28,31	8,51	1,00	1,11	1,59	3,90	5,76	7,46	2,70	21,99	40,05
DP	0,02	2,65	17,44	1,34	0,39	0,66	0,94	0,50	0,86	1,35	0,70	8,87	17,35
Bosque natural	0,16	4,94	80,09	8,95	0,71	1,89	1,97	4,34	6,12	8,34	2,92	26,10	24,76
DP	0,01	1,75	27,21	1,88	0,37	1,12	0,76	0,33	0,77	1,27	0,75	6,24	14,26
Past. degradada	0,19	5,74	114,65	7,60	0,29	4,04	4,91	4,78	5,52	10,76	5,53	44,84	9,07
DP	0,03	1,60	63,49	2,07	0,29	2,92	3,30	0,55	0,50	3,37	3,19	15,07	10,89
Past. Produtiva	0,16	7,71	163,00	12,28	0,26	2,14	2,80	4,90	5,75	9,02	3,53	36,23	7,71

DP	0,01	1,68	133,35	2,88	0,12	0,37	0,41	0,16	0,57	0,49	0,49	5,90	4,28
Floresta	0,24	1,33	50,67	13,33	0,60	1,83	2,43	5,23	5,28	7,85	3,16	32,74	19,99
DP	0,15	0,58	24,58	3,51	0,26	0,66	0,66	0,06	0,82	0,56	0,41	8,71	11,73
Profundidade 0,20 – 0,30 m													
<i>B. excelsa</i>	0,12	2,80	42,51	5,78	0,75	1,78	2,40	4,40	5,11	7,64	3,28	31,13	31,76
DP	0,03	0,86	23,29	0,75	0,60	1,35	1,75	0,54	1,44	2,17	1,23	20,39	31,83
<i>D. odorata</i>	0,14	3,26	47,36	8,87	0,77	1,52	1,91	4,34	4,49	6,56	2,84	30,74	32,96
DP	0,01	1,26	19,42	3,88	0,58	1,02	1,25	0,50	1,04	0,75	0,73	18,44	28,90
<i>K. grandifoliola</i>	0,12	2,70	16,18	7,18	1,00	0,69	1,04	3,90	5,07	5,74	2,11	18,08	50,93
DP	0,01	1,61	7,03	0,87	0,29	0,50	0,78	0,38	0,88	1,56	0,62	7,75	19,83
Bosque natural	0,13	4,05	44,12	7,82	0,92	0,87	1,19	4,08	4,91	6,25	2,26	20,73	43,68
DP	0,02	2,74	22,34	1,40	0,37	0,60	0,68	0,28	1,29	1,70	0,56	9,40	21,95
Past. degradada	0,12	3,10	73,06	5,69	0,51	1,56	2,03	4,71	4,08	6,32	2,75	34,12	23,35
DP	0,01	1,82	45,19	0,80	0,30	1,19	1,36	0,65	1,03	0,94	1,15	17,97	15,84
Past. Produtiva	0,13	5,51	131,27	11,09	0,37	1,48	1,91	4,91	5,07	7,37	2,67	30,72	15,63
DP	0,03	2,30	136,90	2,71	0,22	0,47	0,59	0,26	0,64	0,88	0,67	8,61	10,11
Floresta	0,22	1,33	24,33	10,34	0,97	0,90	1,33	5,27	4,84	6,24	2,36	22,63	40,84
DP	0,15	0,58	7,57	2,52	0,15	0,10	0,11	0,11	0,96	1,03	0,19	3,05	4,64
Profundidade 0,30 – 0,50 m													
<i>B. excelsa</i>	0,12	2,64	29,01	5,36	0,89	1,07	1,42	4,42	4,47	5,99	2,40	24,40	43,49
DP	0,02	2,27	20,51	0,55	0,50	0,88	1,10	0,55	1,57	1,68	0,68	19,00	30,14
<i>D. odorata</i>	0,11	2,11	31,26	7,14	0,84	0,71	0,92	4,25	3,99	5,02	1,87	20,24	47,36
DP	0,02	0,34	16,78	0,92	0,39	0,42	0,53	0,33	0,56	0,46	0,36	11,04	24,25
<i>K. grandifoliola</i>	0,11	1,54	9,61	6,54	0,98	0,41	0,60	3,97	3,44	4,10	1,63	16,15	60,03
DP	0,03	0,63	3,63	0,61	0,33	0,25	0,34	0,41	0,71	0,65	0,14	8,68	20,75
Bosque natural	0,11	2,70	33,04	7,29	1,16	0,42	0,66	4,11	4,18	4,96	1,94	15,00	61,85
DP	0,03	1,46	13,11	1,21	0,27	0,31	0,39	0,28	1,21	1,54	0,46	6,17	16,35
Past. degradada	0,10	2,21	61,71	5,08	0,75	0,87	1,20	4,61	3,83	5,21	2,13	26,22	40,69
DP	0,02	1,22	47,50	0,15	0,36	0,79	0,93	0,71	1,00	0,48	0,67	19,09	21,89
Past. produtiva	0,12	3,89	94,63	9,58	0,55	0,85	1,12	4,79	4,45	5,85	1,95	23,51	29,84
DP	0,03	2,55	119,87	2,52	0,33	0,23	0,35	0,22	0,39	0,56	0,43	8,37	19,11
Floresta	0,39	1,33	19,67	8,67	0,90	0,77	1,17	5,23	4,24	5,45	2,12	22,28	43,08
DP	0,39	0,58	3,05	1,15	0,20	0,25	0,35	0,06	0,34	0,23	0,14	5,95	12,52

Médias de seis repetições nas áreas: integração com *B. excelsa*; integração com *D. odorata*; integração com *K. grandifoliola*; bosque natural; pastagem degradada; pastagem produtiva e floresta secundária; DP: Desvio-padrão. N: nitrogênio, P: fósforo, K: potássio, Na: sódio, Al: alumínio, Ca: cálcio, Ca+Mg: cálcio mais magnésio, pH: potencial hidrogeniônico, H +Al: acidez potencial, CTC: capacidade de troca de cátions.

Na Figura 4, pode ser observado o dendrograma, obtido da matriz de dados padronizados para os atributos químicos do solo.

A diferenciação dos grupos representada pelos dendrogramas foi marcante, apresentando maior similaridade entre eles, com o bosque natural e integração com *D. odorata* na camada 0,00 – 0,10 m, bosque natural e integração com *B. excelsa* na camada 0,10 – 0,20 m, bosque natural e integração com *K. grandifoliola* na camada 0,20 – 0,30 m e pastagem degradada e integração com *D. odorata* na camada 0,30 – 0,50 m, mostrando as particularidades de cada ambiente, pois as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos (Valladares et al. 2008). O bosque natural é uma área com enriquecimento de matéria orgânica pela alta quantidade de serrapilheira depositada e excretas de animais que descansam no local. Nas camadas superiores se assemelha a áreas de integração por essas apresentarem as mesmas características, pois são utilizadas como áreas de descanso do rebanho bovino, principalmente nas horas mais quentes do dia.

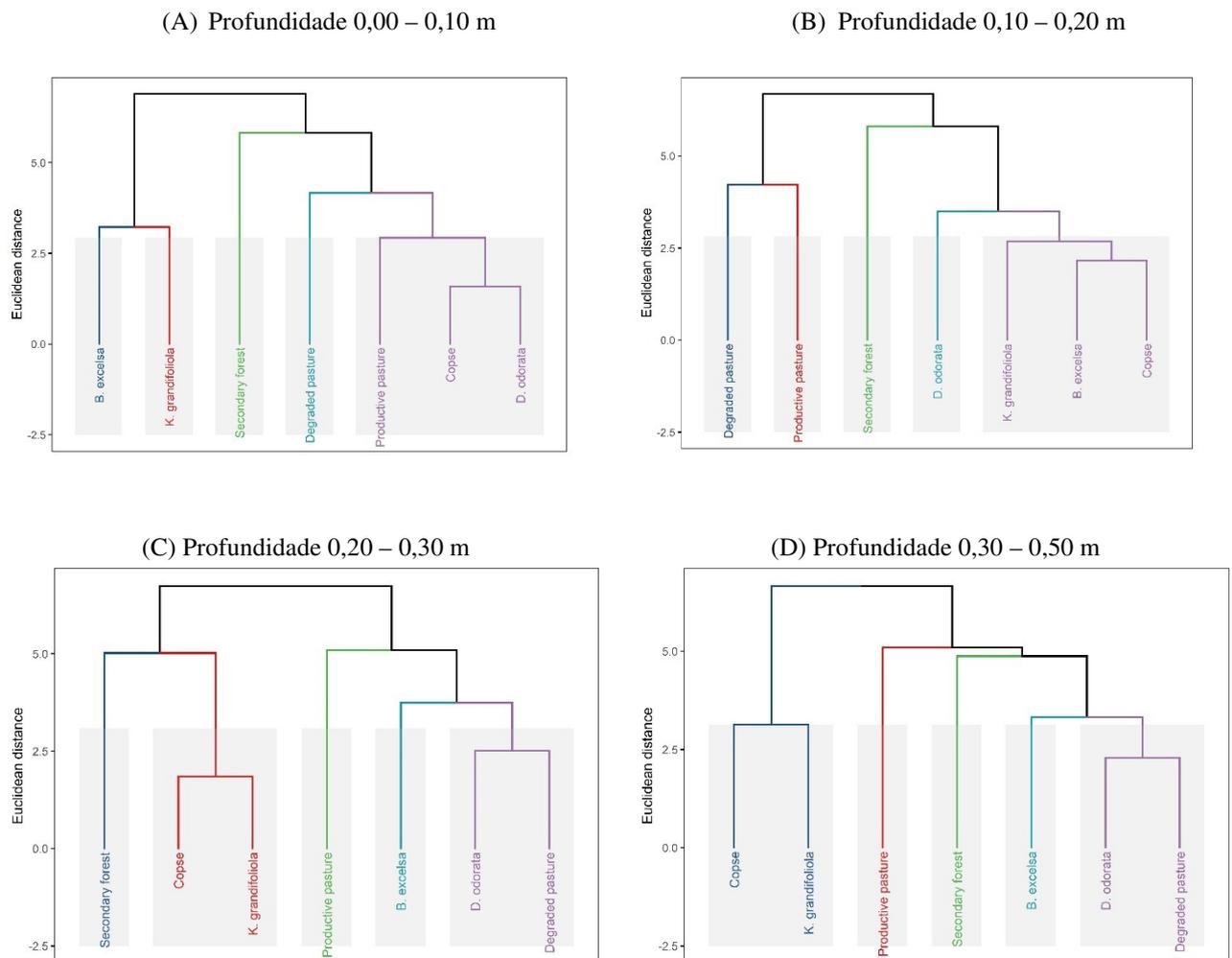


Figura 4. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis atributos químicos do solo nas áreas estudadas: floresta secundária (Secondary forest), bosque natural (Cope), integração com *K. grandifoliola* (*K. grandifoliola*), integração com *B. excelsa* (*B. excelsa*), integração com *D. odorata* (*D. odorata*) pastagem produtiva (Productive pasture), pastagem degradada (Degraded pasture) nas profundidades: A: profundidade 0,0 – 0,10 m; B: profundidade 0,10 – 0,20 m; C: profundidade 0,20 – 0,30 m e D: profundidade 0,30 – 0,50 m. Mojuí dos Campos, 2020.

A análise de componentes principais dos atributos químicos do solo vem confirmar a análise de agrupamento para os ambientes estudados (Figura 5).

Dentro deste contexto, a primeira e a segunda componente principal foram necessárias para explicar a variância total, devido estas apresentarem elevados autovalores (69,7% na PC1 e 12,2% na PC2, totalizando 81,9% da variância total). Isso mostra que, de treze variáveis, passam-se a utilizar dois componentes principais, havendo redução de dimensionalidade das variáveis originais, com perda de explicação de menos de 20% nas duas profundidades estudadas.

As variáveis pH e N e as variáveis Al e saturação por alumínio (m%) estão fortemente correlacionadas. As demais variáveis (Na, H+Al, CTC total, V%, Ca, Ca+Mg, CTC efetiva, P e K) apresentam fraca correlação com Al e m%.

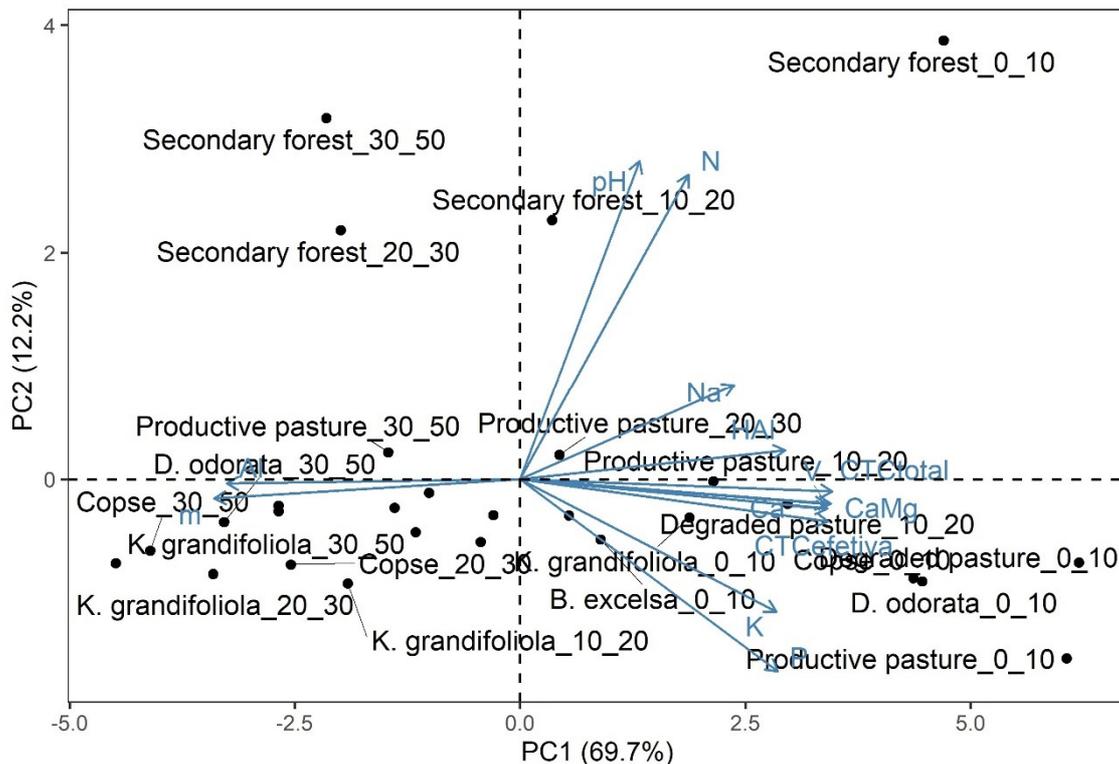


Figura 5. Gráfico biplot (CP1 e CP2) com as variáveis de atributos químicos do solo para as áreas de integração com *B. excelsa*; integração com *D. odorata*; integração com *K. grandifoliola*; bosque natural; pastagem degradada; pastagem produtiva e floresta secundária nas profundidades 0,0 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m; 0,20 – 0,30 m e 0,30 – 0,50 m. Mojuí dos Campos, 2020.

4.3.2. Densidade e Carbono no solo

Os valores médios e desvio-padrão encontrados para as variáveis densidade, matéria orgânica, carbono (C) e estoque de carbono do solo para as áreas de integração com *B. excelsa*,

integração com *D. odorata*, integração com *K. grandifoliola*, bosque natural, pastagem degradada, pastagem produtiva e floresta secundária encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização da densidade, matéria orgânica (MO), carbono (C) e estoque de C do solo nas áreas estudadas, segundo as profundidades, Mojuí dos Campos, 2020.

Áreas	Densidade	MO	C	Estoque C	Densidade	MO	C	Estoque C
	g cm ⁻³	g kg ⁻¹			g cm ⁻³	g kg ⁻¹		
	Profundidade 0,00 – 0,10 m				Profundidade 0,10 – 0,20 m			
<i>B. excelsa</i>	1,17	33,43	19,38	14,04	1,17	32,08	18,60	20,14
DP	0,05	9,78	5,67	4,11	0,00	7,92	4,59	4,97
<i>D. odorata</i>	1,20	40,80	23,65	17,14	1,18	30,12	17,46	18,90
DP	0,04	3,88	2,25	1,63	0,00	7,76	4,50	4,87
<i>K. grandifoliola</i>	1,15	42,98	23,35	16,92	1,14	41,98	20,00	21,65
DP	0,10	8,03	2,96	2,14	0,00	20,23	5,57	6,03
Bosque natural	1,20	60,36	35,19	25,50	1,18	60,05	28,54	30,90
DP	0,05	18,03	11,67	8,46	0,00	27,47	4,75	5,14
Pastagem degradada	1,11	40,94	23,73	17,19	1,14	33,82	17,36	18,80
DP	0,06	10,71	6,21	4,50	0,00	11,47	4,18	4,53
Pastagem produtiva	1,13	33,38	22,23	16,10	1,17	35,71	18,22	19,73
DP	0,07	15,45	6,18	4,47	0,00	10,73	1,55	1,68
Floresta secundária	0,87	43,97	25,50	18,77	1,09	17,36	10,07	10,88
DP	0,17	9,73	5,64	6,57	0,00	3,78	2,19	2,46
	Profundidade 0,20 – 0,30 m				Profundidade 0,30 – 0,50 m			
<i>B. excelsa</i>	1,19	29,56	17,13	19,72	1,20	20,80	12,06	26,97
DP	0,00	13,73	7,96	9,16	0,00	5,19	3,01	6,73
<i>D. odorata</i>	1,22	25,95	15,04	17,31	1,20	23,15	10,94	24,48
DP	0,00	4,54	2,63	3,03	0,00	11,69	3,35	7,51
<i>K. grandifoliola</i>	1,15	30,65	17,77	20,45	1,22	17,83	10,33	23,12
DP	0,00	14,03	8,14	9,36	0,00	4,98	2,89	6,46
Bosque natural	1,17	43,14	17,05	19,62	1,18	42,16	17,14	38,36
DP	0,00	37,62	10,91	12,56	0,00	32,31	6,26	14,01
Pastagem degradada	1,19	22,88	13,26	15,26	1,20	15,48	8,97	20,08
DP	0,00	6,60	3,83	4,40	0,00	2,56	1,48	3,32
Pastagem produtiva	1,17	21,39	12,40	14,27	1,21	14,51	8,41	18,82
DP	0,00	8,73	5,06	5,82	0,00	4,85	2,81	6,29
Floresta secundária	1,17	20,30	11,77	13,51	1,12	14,38	8,34	18,56
DP	0,00	7,62	4,42	4,81	0,00	3,54	2,05	4,00

Médias de seis repetições nas áreas: integração com *B.excelsa*; integração com *D. odorata*; integração com *K. grandifoliola*; Bosque natural; pastagem degradada; pastagem produtiva e floresta secundária; DP: Desvio-padrão. MO: matéria orgânica, C: carbono e Estoque C: estoque de carbono. Mojuí dos Campos, 2020.

A densidade do solo foi significativamente menor na floresta secundária em relação as demais áreas ao longo de todo perfil do solo avaliado (Figura 6), resultados semelhantes são relatados por Chaves (2018). Nenhuma interação entre área e camada foi significativa para densidade.

A conversão da floresta para outros usos do solo, foi associada a um aumento na densidade do solo. Resultados semelhantes foram corroboradas por Durigan et al. (2017) e Cherubin et al. (2015) em pesquisas que abordaram a transformação da vegetação nativa para a implementação de sistemas agrícolas.

A variação na densidade do solo é influenciada pela diminuição na incorporação de matéria orgânica no solo, sobretudo devido à redução na entrada desta, proveniente da vegetação (Silva et al., 2018). Importa salientar que o pisoteio do gado bovino também contribuem para a compactação do solo, resultando em um conseqüente aumento em sua densidade (Chaves, 2018).

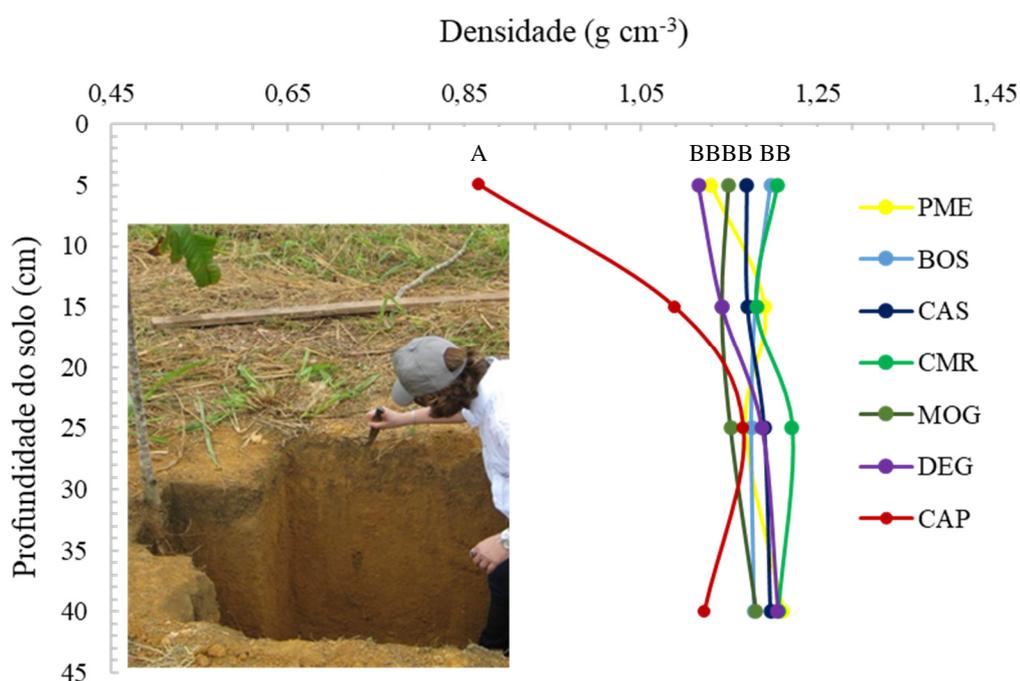


Figura 6. Gráfico dos valores da densidade do solo até 0,50 m de profundidade nos diferentes sistemas de uso do solo em Mojuí dos Campos - PA. Áreas: PAST.P: pastagem produtiva; BOS: bosque natural; CAS: integração com *B. excelsa*; CMR: integração com *D. odorata*; MOG: integração com *K. grandifoliola*; PAST.D: pastagem degradada e CAP: floresta secundária. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância. Mojuí dos Campos, 2020.

De modo geral, nas áreas de estudo, observou-se um aumento nos valores de densidade do solo com o aumento da profundidade, uma característica comum em solos com elevado teor

de argila, devido à eluviação da argila ao longo do perfil, ao peso do gado exercido pelas camadas superiores e à menor incorporação de matéria orgânica nas camadas mais profundas do solo (Freitas et al., 2018). No entanto, é relevante ressaltar que nenhum dos locais de estudo apresentou valores de densidade do solo capazes de comprometer o desenvolvimento da cultura agrícola, visto que todos permaneceram abaixo de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, considerado como um limiar crítico para solos argilosos, conforme estabelecido por Camargo e Alleoni (1997).

As pastagens avaliadas, apesar de submetidas a diferentes práticas de manejo, apresentaram densidades do solo similares entre si. Este fato pode ser atribuído ao curto período de implementação dos dois sistemas pastoris (< 10 anos), não sendo possível identificar alterações edáficas significativas na estrutura física do solo. Em uma pastagem nominal com maior tempo de estabelecimento (16 anos), sujeita a manejo por meio de queimadas, Camargo et al. (1999) registraram uma densidade do solo na camada superficial de $1,21 \text{ g cm}^{-3}$, indicando um valor superior ao encontrado nas áreas denominadas pastagem produtiva e pastagem degradada. Da mesma forma, ao avaliarem pastagens nominais na região amazônica, Moraes et al. (2002), Deon (2013) e Sales et al. (2018) observaram valores de densidade na camada superficial do solo, variando entre $1,15 \text{ g cm}^{-3}$, $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,21 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Sales et al. (2018) constataram, em áreas sob agricultura convencional, valores de densidade acima de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, superiores aos registrados nas áreas avaliadas no presente estudo.

A concentração de carbono (C) (Figura 7) e estoque de C (Figura 8) foi significativamente maior na área de bosque natural em relação a demais áreas ao longo de todo perfil do solo avaliado. Entre as demais áreas não houve diferença significativa quanto ao C e estoque de C. Nenhuma interação entre área e camada foi significativa para C e estoque de C.

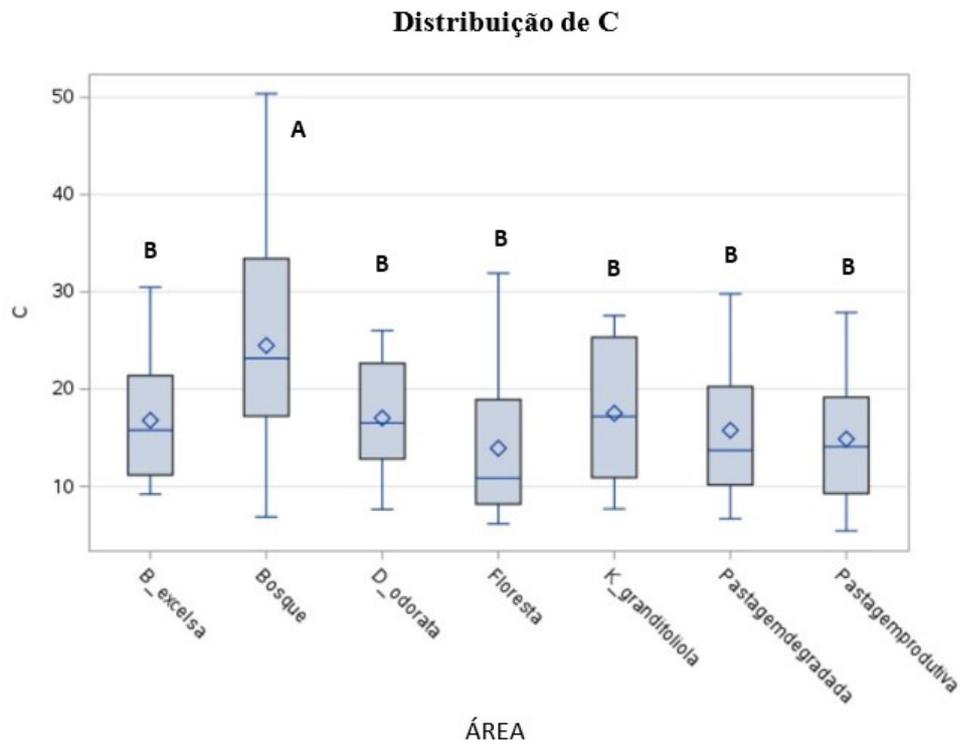


Figura 7. Gráfico de caixa da variação do Carbono (C) no solo nas áreas de integração com *B. excelsa*; bosque natural; integração com *D. odorata*; floresta secundária; integração com *K. grandifoliola*; pastagem degradada e pastagem produtiva. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. Mojuí dos Campos, 2020.

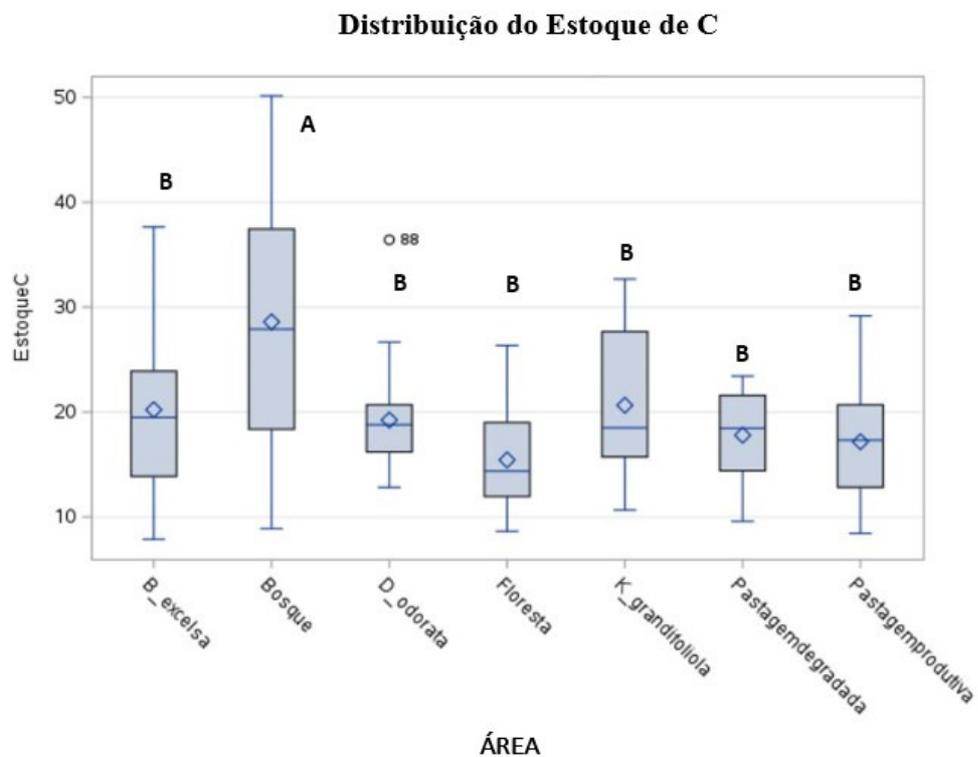


Figura 8. Gráfico de caixa da variação do Estoque de carbono no solo nas áreas de integração com *B. excelsa*; bosque natural; integração com *D. odorata*; floresta secundária; integração com *K. grandifoliola*; pastagem

degradada e pastagem produtiva. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. Mojuí dos Campos, 2020.

A inexistência de disparidades significativas nos estoques de carbono do solo, subsequentemente à conversão da floresta para áreas de pastagem e integração, é presumivelmente atribuível à elevada concentração de argila no solo. Conforme descrito por Tognon et al. (1998), a presença de argila favorece a formação de agregados no solo, os quais desempenham um papel crucial na proteção física da matéria orgânica do solo (MOS). Nesse contexto, a perda de matéria orgânica tende a ser gradual em solos argilosos.

De acordo com Stahl et al. (2017), as elevadas quantidades de armazenamento de C no solo na floresta amazônica ($3,31 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) pode ser parcialmente recuperado em pastagens somente após 24 anos de implantação, e com o uso de práticas de manejo sustentável (como exemplo, evitar queimadas e sobrepastoreio, utilizar um plano de rotação de pastoreio e uma mistura de espécies C3 e C4). Além disso, vários estudos demonstram o potencial das pastagens acumularem carbono através da intensificação e diversificação (por exemplo, integração lavoura-pecuária, sistemas integrados lavoura-floresta e lavoura-pecuária-floresta), onde, em alguns casos, os estoques de C do solo podem ser maiores do que áreas com florestas (Grahmann et al. 2020; Silva et al. 2017; Vicente et al. 2019; Damian et al. 2021). O tempo de implantação dos sistemas integrados avaliados nesse trabalho, nas condições do estudo estabelecido, não foi determinante na alteração de quantidades do C e estoque de C no solo, exceto para a área de bosque natural, sendo necessário a permanência de estudos ao longo do tempo e o acompanhamento para identificação de mudanças nas propriedades do C sob esses sistemas nessa região.

O sistema foi implantado em 2010 e ficou sem recurso após quatro anos da implantação, onde, após esse período, não houve manejo.

Os dendrogramas por camada resultante da análise hierárquica de agrupamentos para as variáveis de estoque de Matéria orgânica, Carbono e estoque de carbono do solo nas áreas estudadas são encontrados na Figura 9 e o Biplot da análise de componentes principais (CP1 e CP2) com as variáveis de carbono (C), matéria orgânica (OM) e estoque de carbono na Figura 10.

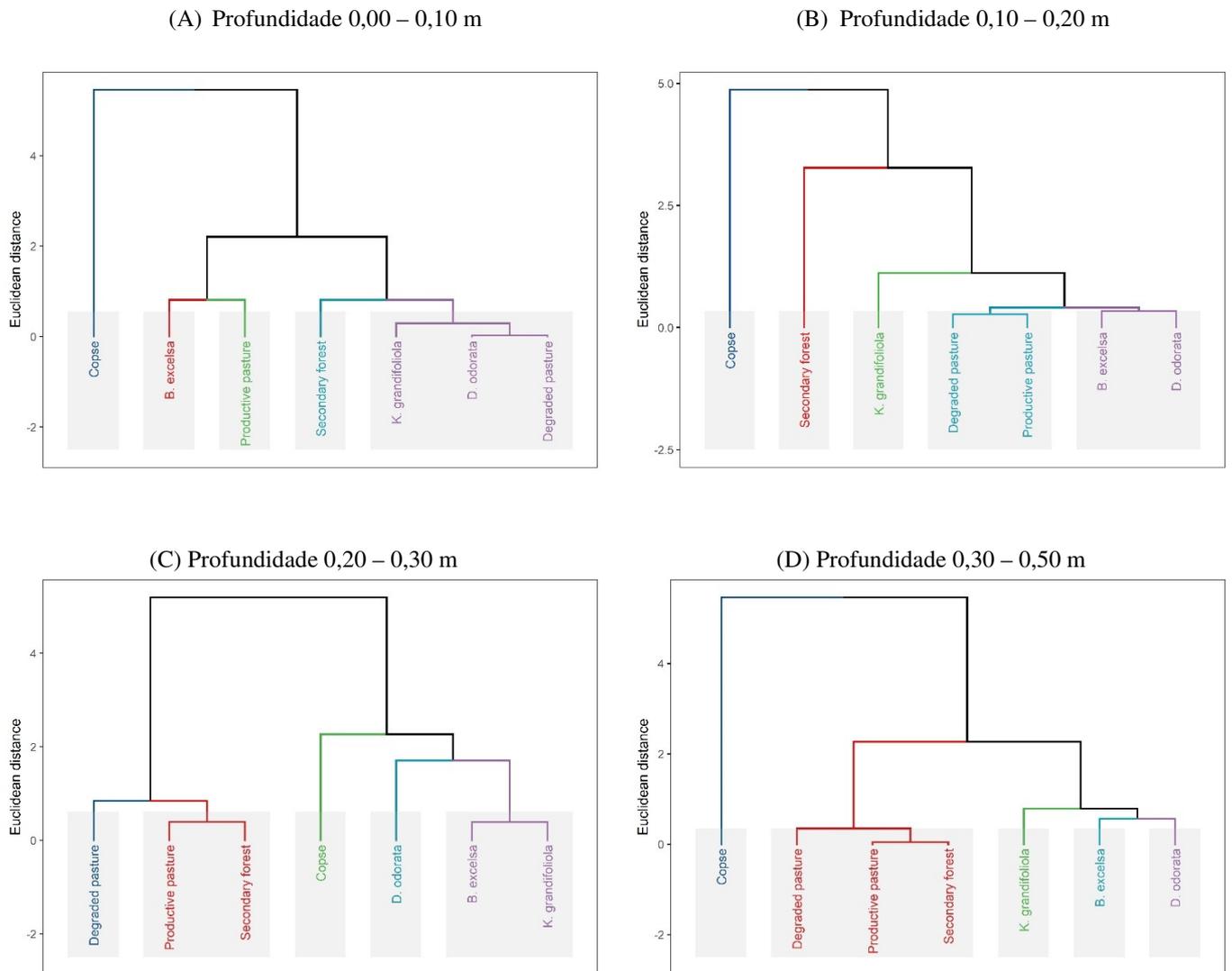


Figura 9. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis de estoque de Matéria orgânica, Carbono e estoque de carbono do solo nas áreas estudadas nas profundidades: A: profundidade 0,0 – 0,10 m; B: profundidade 0,10 – 0,20 m; C: profundidade 0,20 – 0,30 m e D: profundidade 0,30 – 0,50 m. Mojuí dos Campos, 2020.

De acordo com a análise hierárquica, na camada de 0,00 – 0,10 m, houve maior similaridade entre as áreas de pastagem degradada e integração com *D. odorata*. Na camada 0,10 – 0,20 m, houve maior similaridade entre as áreas de pastagem degradada e pastagem produtiva e as áreas de integração com *B. excelsa* e integração com *D. odorata*. Na camada 0,20 – 0,30 m houve maior similaridade entre as áreas de pastagem produtiva e floresta secundária e as áreas integração com *B. excelsa* e *K. grandifoliola*, e na camada 0,30 – 0,50 m, houve maior similaridade entre as áreas de pastagem produtiva e floresta secundária.

Na ACP, pode-se visualizar que a primeira e a segunda componente principal foram suficientes para explicar a variância total, devido estas apresentarem elevados autovalores (70,5% na PC1 e 28,1% na PC2, totalizando 98,6% da variância total).

As variáveis matéria orgânica (OM) e a variável C estão fortemente correlacionadas devido ao alto teor de C na matéria orgânica.

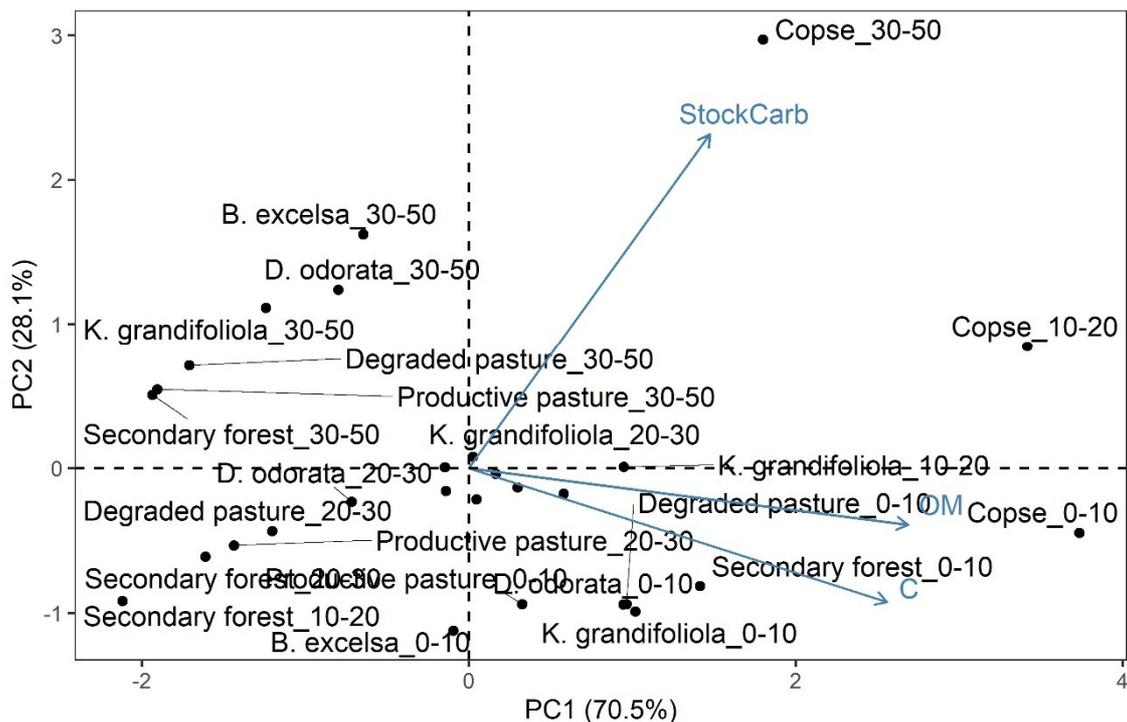


Figura 10. Gráfico biplot (CP1 and CP2) com as variáveis de carbono (C), matéria orgânica (OM) e estoque de carbono (StockCarb) do solo para as áreas integração com *B. excelsa*; integração com *D. odorata*; integração com *K. grandifoliola*; bosque natural; pastagem degradada; pastagem produtiva e floresta secundária nas profundidades 0,0 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m; 0,20 – 0,30 m e 0,30 – 0,50 m. Mojuí dos Campos, 2020.

4.4. Conclusão

Os valores dos atributos químicos do solo apresentaram variações sob os usos de solo nas profundidades avaliadas. A diferenciação dos grupos representada pelos dendrogramas foi marcante, nas camadas superiores, a área de bosque natural se assemelha a áreas no sistema integrado, evidenciando-se as mesmas características, decorrente do aporte de matéria orgânica pela alta quantidade de serrapilheira depositada e excretas de animais que descansam no local.

A densidade do solo foi significativamente menor na floresta secundária em relação as demais áreas avaliadas ao longo de todo perfil do solo.

A concentração de carbono (C) e estoque de C foi significativamente maior na área de bosque natural em relação as demais áreas ao longo de todo perfil do solo avaliado e de acordo

com a análise hierárquica, as áreas apresentaram similaridades em todas as camadas, indicando que o tempo de implantação dos sistemas integrados ainda não é sensível a presença do C e estoque de C no solo.

O sistema silvipastoril é uma estratégia de decisão produtiva de longa duração, sendo a densidade do solo uma das variáveis que sinalizam a capacidade de sair de uma condição de degradação para uma área com satisfatórios armazenamentos de C sob esses sistemas nessa região.

Referências

Artaxo, P., Hansson, H. C., Andreae, M. O., Bäck, J., Alves, E. G., Barbosa, H. M., Kesselmeier, J. (2022). Tropical and Boreal Forest Atmosphere Interactions: A Review. *Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology*.

Artaxo, P.; Gatti, L. V.; Leal, A. M. C.; Longo, K.M.; Freitas, S. R.; Lara, L. L.; Pauliquevis, T. M.; Procpópio, A. S.; Rizzo, L. V. Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazonica*, v. 35, n. 2, p. 185-196, 2005.

Baccini, A., Goetz, S., Walker, W.; Laporte, N.T.; Sun, M.; Sulla-Menashe, D.; Hackler, J.; Beck, P.S.A.; Dubayah, R.; Friedl, M.A.; Samanta, S.; Houghton, R. A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Clim Change* 2, 182–185 (2012). <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>

Barlow, J., França, F., Gardner, T.A., Hicks, C.C., Lennox, G.D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E.P., Ferreira, J., Guénard, B., Gontijo, L. C., Isaac, V., Lees, A.C., Parr, C.L., Wilson, S.K., Young, P.J., Graham, N.A.J. The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature*. 2018 Jul;559(7715):517-526. doi: 10.1038/s41586-018-0301-1. Epub 2018 Jul 25. PMID: 30046075.

Brando PM, Soares-Filho B, Rodrigues L, Assunção A, Morton D et al (2020) The gathering firestorm in southern Amazonia. *SciAdv* 6:1–9 <http://advances.sciencemag.org/content/6/2/eaay1632>.

Camargo, O.A. de; Alleoni, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

Camargo, P.B.; Trumbore, S.E.; Martinelli, L.A.; Davidson, E.A.; Nepstad, D.C.; Victoria, R.L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. *Global Change Biology*, Oxford, v. 9, p. 693–702, 1999.

Carvalho JLN, Avanzi JC, Silva MLN, Mello CR, Cerri CEP. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 277–290. (2010). doi: 10.1590/ S0100-06832010000200001.

Caviglia-Harris JL (2018) Agricultural innovation and climate change policy in the Brazilian Amazon: Intensification practices and the derived demand for pasture. *J Environ Econ Manag* 90:232–248. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.06.006>

Caviglia-Harris JL (2018) Agricultural innovation and climate change policy in the Brazilian Amazon: Intensification practices and the derived demand for pasture. *J Environ Econ Manag* 90:232–248. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.06.006>

Chaves, S.S.F. Dinâmica do carbono no solo sob diferentes usos da terra em Paragominas, PA. 2014. 85 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

Cherubin, M.R. et al. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 615-625, 2015.

Cordova, A. M.; Gatti, L. V.; Longo, K.; Freitas, S.; Artaxo, P.; Procópio, A. S.; Silva Dias, M.A.F.; Freitas, E.D.; 2004. Nitrogen oxide measurements in an Amazon site and enhancements associated with a cold front. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 4: 2.3012.331.

Damian JM, Matos ES, Pedreira BC, Carvalho PCF, Premazzi LM et al (2021a) Predicting soil C changes after pasture intensification and diversification in Brazil. *Catena* 202:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105238>

Demattê, J.L.I.; Demattê, J.A.M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta Amazônica e do Cerrado do Brasil Central. *Scientia Agrícola*, v.50, p.272-286, 1993. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161993000200016>

Deon, D.S. Mudança de uso da terra e impacto na matéria orgânica do solo em dois locais no Leste da Amazônia. 2013. 151 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

Durigan, M. R.; Cherubin, M. R.; Camargo, P. B.; Ferreira, J. N.; Berenguer, E.; Gardner, T. A.; Barlow, J.; Dias, C. T. S.; Signor, D.; Oliveira-junior, R. C.; Cerri, C. E. P. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. *Sustainability*, Basel, v. 9, p. 379-394, 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA –Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, Brazil, 2006; p. 306.

Faccio Carvalho PC, Savian JV, Della Chiesa T, Sousa Filho W, Terra JA, Pinto P, Martins AP, Villarino S, Trindade JK, Nunes PA, Piñeiro G. Land-use intensification trends in the rio de la plata region of south america: toward specialization or recoupling crop and livestock production. *Front Agric Sci Eng*. 2021; 8:97-110. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020380>

Fearnside, PM, Barbosa RI. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*. 108, 147–166. (1998).

Fearnside, PM. Brazil's Amazonian Forest carbon, the key to Southern Amazonia's significance for global climate. *Regional Environmental Change*. 18, 47–61. (2018).

França, F. M., Cassandra, B. E., Peralta, G., James. R. P. W., Graham, N. A. J., Tylianakis, J. M., Berenguer, E., Lees, A. C., Ferreira, J., Louzada, J., Barlow, J. 2020. Climatic and local stressor interactions threaten tropical forests and coral reefs *Phil. Trans. R. Soc. B* 375:2019011620190116 <http://doi.org/10.1098/rstb.2019.0116>

Franco, A.L.C.; SOBRAL, B. W.; SILVA, A.L.C.; WALL, D. H. Amazonian deforestation and soil biodiversity. *Conservation Biology*. v. 33, p. 590-600, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.13234>.

Freitas, I. A. O.; Casagrande, J. C.; Silva, L. S.; Campos, M. C. C. Estoque de carbono de Latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 228-239, 2018.

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C., Hauck, J., & Zeng, J. (2022). Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*, 14(4), 1917-2005.

Fujisaki K, Perrin AS, Desjardins T, Bernoux M, Balbino, LC e Brossard M. From forest to cropland and pasture systems, a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Global Change Biology*. 21, 2773–2786. (2015). doi: 10.1111/ gcb.12906.

Gomes LCG, Faria RM, Souza E, Veloso GV, Schaefer CEGR et al (2019) Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma* 340:337–350. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>

Grahmann K, Dellepiane VR, Terra JA, Quincke JA (2020) Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency. *Agric Ecosyst Environ* 287:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106710>

INPE (2021) National Institute for Space Research. <http://www.inpe.br/> Koele N, Bird M, Haig J, Marimon-Junior BH, Marimon BS et al (2017) Amazon Basin Forest pyrogenic carbon stocks: First estimate of deep storage. *Geoderma* 306:237–243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.029>

INPE (2021) National Institute for Space Research. <http://www.inpe.br/> Koele N, Bird M, Haig J, Marimon-Junior BH, Marimon BS et al (2017) Amazon Basin Forest pyrogenic carbon stocks: First estimate of deep storage. *Geoderma* 306:237–243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.029>

Johnson, R. A.; Wichern, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 6. ed. Pearson, 2007.

Kassa, H; Dondeyne, S; Poesen, J; Frankl, A; Nyssen, J. Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks: the case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. v. 247, p. 273-282, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.034>.

Kassambara, A.; Mundt, F. (2020). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

Lal, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 2004, 304, 1623–1627.

Le, S.; Josse, J.; Husson, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 2008, 25(1), 1-18. [10.18637/jss.v025.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01). <https://core.ac.uk/download/pdf/6303121.pdf>

Manly, B.F.J.; Alberto, J.A.N. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 4rd. ed. Bookman: Porto Alegre, Brasil, 2019. pp.254.

Mariana Regina Durigan, Maurício Roberto Cherubin, Plínio Barbosa de Camargo, Joice Nunes Ferreira, Erika Berenguer, Toby Alan Gardner, Jos Barlow, Carlos Tadeu dos Santos Dias, Diana Signor, Raimundo Cosme de Oliveira Junior and Carlos Eduardo Pellegrino Cerri. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. *Sustainability*, 2017. doi:10.3390/su9030379

Martorano, L. G., Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., Faria, R. T. D., Mielniczuk, J., & Comiran, F. (2009). Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 397-405.

Martorano, L. G., Soares, W. B., Moraes, J. R. da S. C. de, Nascimento, W., Aparecido, L. E. de O., & Villa, P. M. (2021). Climatology of Air Temperature in Belterra: Thermal Regulation Ecosystem Services Provided by the Tapajós National Forest in the Amazon. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36 (2), 327-337. doi:10.1590/0102-77863620015

Martorano, L.G.; Vitorino, M.I.; da Silva, B.P.P.C.; de Moraes, J.R.S.C.; Lisboa, L.S.; Sotta, E.D.; Reichardt, K. Climate conditions in the eastern amazon: Rainfall variability in Belem and indicative of soil water deficit. *Afr. J. Agric. Res.* 2017, 12, 1801–1810.

Millennium Ecosystem Assessment Ecosystem and Human Well-Being, Synthesis. Washington DC, Island Press. (2005).

Moraes, M.F.; Oliveira, G.C.; Kliemann, H.J.; Severiano, E.C.; Sarmiento, P.H.L.; Nascimento, M.O. Densidade e porosidade do solo como diagnóstico do estado de degradação de solos sob pastagens na região dos Cerrados. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Belo Horizonte. Água e biodiversidade: anais. Belo Horizonte: SOBRADE, 2002. p. 256-258, 2002.

Morgan WT, Darbyshire E, Spracklen DV, Artaxo P, Coe H (2019) Non deforestation drivers of fires are increasingly important sources of aerosol and carbon dioxide emissions across Amazonia. *Sci Rep* 9: 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53112-6>

Oliveira DC, Maia SMF, Freitas RA, Cerri CA. Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. *Reg Environ Change*. 2022; 22:87. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01945-9>

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2021. Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Reinert, D.J.; Reichert, J.M. (2006). *Propriedades Físicas do Solo*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria

Reis VRR, Deon DS, Muniz LC, Garcia US, Cantanhêde ISL, Rego CARM, Costa JB, Marques EO. Soil chemical attributes under crop-livestock-forest integration system and in different land uses in mata dos cocais region. *J Agr Sci*. 2018; 10:370-80. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n4p370>

Sales, A.; Silva, A. R.; Veloso, C. A. C.; Carvalho, E. J. M.; Miranda, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. *Colloquium Agrariae*, v. 14, n.1, Jan-Mar. p.01-15. 2018.

Shimizu, G. D., Rodrigo Y. P. Marubayashi; L. S. A. Goncalves. (2022). *AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences*. R package version 1.3.2. <https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>

Silva PLF, Oliveira FP, Martins AF, Tavares DD, Amaral AJ. Fertility, carbon stock and aggregate stability of an Alfisol under integrated farming systems. *Pesq Agropec Trop*. 2021;51: e66505. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166505>

Silva, J.C.N.; Silva, A.R.; Veloso, C.A.C.; Dantas, E.F.; do Sacramento, J.A.A.S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. *Rev. Bras. Eng. Agric. E Ambient*. 2018, 22, 837–842. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p837-842>

Silva RO, Barioni LG, Hall JAJ, Moretti AC (2017) Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. *Agric Syst* 153:201–211. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>

Simon CP, Gomes TF, Pessoa TN, Soltangheisi A, Bieluczyk W, Camargo PB, Martinelli LA, Cherubin MR. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. *Rev Bras Cienc Solo*. 2022;46:ve0210103. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210103>

Song, X.-P.; Huang, C.; Saatchi, S.S.; Hansen, M.C.; Townshend, J.R. Annual Carbon Emissions from Deforestation in the Amazon Basin between 2000 and 2010. *PLoS ONE* 2015, 10, e0126754.

Stahl C, Fontaine S, Klumpp K, Picon-Cochard C, Grise MM et al (2017) Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia. *Glob Chang Biol* 23:3382–3392. <https://doi.org/10.1111/gcb.13573>

Thaler GM, Viana C, Toni F (2019) From frontier governance to governance frontier: the political geography of Brazil's Amazon transition. *World Dev* 114:59–72. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.022>

Thaler GM, Viana C, Toni F (2019) From frontier governance to governance frontier: the political geography of Brazil's Amazon transition. *World Dev* 114:59–72. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.022>

Tognon, A.A.; Demattê, J.L.I.; Demattê, J.A.M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil Central. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 55, p. 343-354, 1998.

Valladares, G. S.; Gomes, E. G.; Mello, J. C. C. B. S.; Pereira, M. G.; Anjos, L. H. C.; Ebeling, A. G.; Benites, V. M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.1, p.285-296, 2008

Vezzani FM, Mielniczulk J. Uma visão sobre a qualidade do solo. *Rev Bras Cienc Solo*. 2009; 33:743-55. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>

Vicente L.C, Gama-Rodrigues E.F, Gama-Rodrigues A.C, Marciano C.R (2019) Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. *Catena* 182:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104139>

Yadvinder, M., The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. *J. Ecol.* 100, 65–75 (2012).

CAPÍTULO V – Índice de vegetação normalizada associado ao processo evolutivo de componentes arbóreos em sistema silvipastoril na Amazônia Oriental, Brasil

RESUMO

Os sistemas de produção integrados como, por exemplo, o integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), ao longo do tempo aponta indicadores de sustentabilidade, podem ser monitorados por sensores remotos e avaliados em campo, adotando diferentes estratégias de investigação técnico-científica. O uso da termografia no infravermelho próximo permite identificar o papel do componente arbóreo, por exemplo, na regulação térmica para garantir o conforto aos animais. As avaliações de indicadores no solo reforçam que: densidade, fertilidade e fluxos de carbono no solo já expressam melhorias ao comparar com os valores em pastagens degradadas, reforçando que esses sistemas são resilientes e reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Objetivou-se Avaliar a técnica índice de vegetação normalizada (NDVI) para monitorar facilmente a variabilidade espacial e temporal sazonal da produtividade e qualidade de um sistema silvipastoril na Amazônia. A análise foi realizada usando imagens do satélite Sentinel (2A e 2B), sendo o período utilizado, o de maior redução das chuvas na região. Foram realizados balanços hídricos anuais, referentes ao período de 2019 a 2023. As áreas com o sistema silvipastoril demonstraram maior resiliência durante períodos de estresse hídrico, explicada pela capacidade das raízes das árvores em acessar água nas camadas mais profundas do solo, mantendo a atividade fotossintética e, conseqüentemente, a produção de fitomassa mesmo em períodos secos.

PALAVRAS-CHAVE: integração lavoura-pecuária-floresta; *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, *Khaya grandifoliola*, imagens de satélite.

ABSTRACT

Integrated production systems, such as crop-livestock-forest integration (ILPF), over time indicate sustainability indicators, capable of being monitored by remote sensors and evaluated in the field, adopting different technical-scientific investigation strategies. The use of near-infrared thermography allows us to identify the role of the arboreal component, for example, in thermal regulation to ensure comfort for animals. Assessments of soil indicators reinforce that: density, fertility and carbon fluxes in the soil already show improvements when compared to values in degraded pastures, reinforcing that these systems are resilient and reduce greenhouse gas emissions. The objective was to use the normalized vegetation index (NDVI) to identify patterns in a silvopastoral system capable of supporting monitoring actions, new scientific

investigations and certification activities for the carbon market and payment for environmental services, in different contexts, especially in compliance with goals of the sustainable development objectives (ODS) for national agricultural production. The analysis was carried out using images from the Sentinel satellite (2A and 2B), with the period used being the one with the greatest reduction in rainfall in the region. Annual water balances were carried out, covering the period from 2019 to 2023. Areas with the silvopastoral system demonstrated greater resilience during periods of water stress, explained by the ability of tree roots to access water in the deeper layers of the soil, maintaining photosynthetic activity and, consequently, the production of phytomass even in dry periods.

PALAVRAS-CHAVE: crop-livestock-forest integration; *Bertholletia excelsa*, *Dipteryx odorata*, *Khaya grandifoliola*, satellite images.

5.1.Introdução

No Brasil, o bioma Amazônia possui aproximadamente 55 milhões de hectares de pastagens dedicadas à pecuária, dos quais 57% estão classificados como moderadamente ou degradados (MapBiomas, 2022). No bioma Amazônia a expansão agrícola, entre 1985 e 2005, atingiu 6,7% em expansão anual e caiu para 1% entre 2005 e 2017, mas em termos absolutos as perdas em áreas de florestas no bioma Amazônia (-0,31%) foi mais expressiva ao comparar com os demais biomas brasileiros (Souza et al. 2020).

Os impactos ambientais decorrentes da produção pecuária na Amazônia estão associados ao desmatamento, emissões de gases de efeito estufa pela baixa qualidade das pastagens, bem como a degradação do solo, intensificada pelo processo erosivo das chuvas com perdas significativas de matéria orgânica e nutrientes (Bronick & Lal, 2005; Rueda et al., 2020); Silva et al., 2022; Rocha et al. 2023). Essas condicionantes, intensificam a pressão em áreas de floresta nativa que fragiliza os indicadores de sustentabilidade dessa atividade produtiva na região (Bueno et al., 2021, Silva, et al, 2024).

Os sistemas silvipastoris representam uma importante estratégia para mudar essa realidade, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais, sendo uma das alternativas sustentáveis em áreas de pastagens degradadas. Esses sistemas são reconhecidos por sua multifuncionalidade, visto que permitem a intensificação da produção por meio do manejo integrado dos recursos naturais, contribuindo para evitar a degradação desses recursos e promovendo a recuperação da capacidade produtiva das áreas envolvidas (Paciullo et al., 2011; Silva et al., 2018a). São definidos por atividade que reúne em seu processo produtivo práticas

pecuárias e florestais pontando indicadores de sustentabilidade no sistema (Cordeiro, et al., 2018).

Com o avanço na aplicação do sensoriamento remoto por satélite, um número crescente de índices e/ou indicadores, a partir das respostas espectrais vêm auxiliando no monitoramento e/ou avaliação da cobertura vegetal (Yan et al. 2022). Existem mais de cem indicadores desenvolvidos (Jinru e Su, 2017), sendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) um dos mais utilizados (Jinru e Su, 2017). O NDVI permite monitorar a dinâmica da vegetação da superfície terrestre (Linderholm, 2006) e tem sido aplicado na avaliação de diferentes padrões de mudanças na vegetação em nível global, nacional e escalas regionais (Liu et al., 2022).

Esse índice foi proposto por Rouse et al., (1973), e expressa a razão entre a diferença e a soma das medidas de refletância, nos canais do vermelho e infravermelho próximo. Nesses comprimentos de ondas, a vegetação possui maior capacidade de refletância em vermelho e o solo em infravermelho próximo. O NDVI está fortemente relacionado aos aspectos fisiológicos da vegetação, possibilitando avaliar a dinâmica vegetativa em períodos de estresses térmico-hídricos que podem comprometer a atividade fotossintética das plantas (Poelking et al., 2007).

Castagna et al., (2024) destacam a necessidade urgente de promover e apoiar programas de pesquisa no bioma Amazônia. Ao promover o desenvolvimento de infraestruturas e programas de formação personalizados, podemos capacitar os investigadores para enfrentar os desafios específicos da região e desbloquear todo o potencial do sensoriamento remoto para estudar a evapotranspiração.

No presente estudo objetivou-se avaliar a técnica NDVI para monitorar facilmente a variabilidade espacial e temporal sazonal da produtividade e qualidade de um sistema silvipastoril na Amazônia.

5.2. Material e métodos

A área de estudo localiza-se na Fazenda Nossa Senhora Aparecida, uma propriedade privada, sendo os talhões entre as coordenadas geográficas 02°38'11"S e 54°56'13"W, com uma altitude de 152 metros, situada no município de Mojuí dos Campos, no estado do Pará, Brasil. Trata-se de uma Unidade de Referência Tecnológica (URT), implantada inicialmente com sistema integrado de Lavoura-Pecuária-Floresta, atualmente consolidado na modalidade sistema silvipastoril. Nesta área, os animais utilizam as áreas florestadas como abrigo, especialmente durante períodos de alta incidência solar. A implementação desta URT foi realizada em 2010 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA - Amazônia

Oriental), em parceria com o produtor local, sendo pioneira na introdução de sistema integrado de produção pecuária na região oeste do Pará. Este esforço foi realizado considerando o contexto das iniciativas de baixa emissão de carbono na Amazônia, no âmbito do Programa Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Programa ABC).

A URT está situada em ambiente regido pela tipologia climática Am3, conforme adaptação ao método de Köppen, proposto por Martorano et al. (1993). Nesse subtipo climático, a temperatura média mensal é sempre superior a 18°C e no mês menos chuvoso os valores pluviométricos ficam abaixo de 60 mm com totais pluviais ao longo do ano variando entre 1.500 e 2.000 mm. As condições térmicas na URT em termos de média anual variam entre 25,5°C e 26,0°C, enquanto nas áreas circundantes, as médias de temperatura do ar podem variar entre 25,5°C e 27,0°C. É relevante notar que as temperaturas mínimas, ocorrendo nas primeiras horas do dia, oscilam entre 21,0°C e 22,5°C. A umidade do ar na área de estudo varia em média entre 84% e 86% (Martorano et al. 2017).

As espécies florestais foram plantadas em três parcelas separadas, incluindo a castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K.), o cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) e o mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC). No primeiro ano, as espécies florestais foram plantadas em consórcio com culturas agrícolas. Cada parcela consiste de oito linhas de uma das espécies florestais com um espaçamento de 7 x 5 metros, totalizando 280 plantas em uma área de 0,92 hectares. Os talhões são intercalados a uma distância de 166 metros para a criação de gado Nelore, sendo que a forragem utilizada é o *Panicum maximum* (Cândido et al. 2024), essas áreas foram denominadas Pasto 1, Pasto 2 e Pasto 3.

O solo é caracterizado como Latossolo Amarelo textura argilosa (Embrapa, 2006) e em análise anterior à implantação do sistema silvipastoril, o solo apresentava as seguintes características: pH = 5,26, MO = 30,66 g kg⁻¹, Al³⁺ = 0,43 cmol_c dm⁻³, Ca²⁺ = 2,96 cmol_c dm⁻³, Mg⁺ = 0,93 cmol_c dm⁻³, potássio 0,13 cmol_c dm⁻³, fósforo 2,17 mg dm⁻³, soma de bases trocáveis = 4,08 cmol_c dm⁻³, capacidade de troca de cátions = 4,51 mmol_c dm⁻³ e saturação por bases = 37%, de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (2011). Informações detalhadas sobre o histórico e implantação da unidade experimental podem ser encontradas em Cândido et al. (2024), Cândido et al. (2023) e Silva et al. (2018b).

A análise do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é com base nos valores extraídos, a partir da fórmula $NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$, utilizando a calculadora raster do QGIS, versão 3.22.4-Białowieża. Foram obtidas imagens rasters das bandas 04 (vermelho) e 08 (infravermelho próximo), com projeção UTM/WGS84, no formato JPEG200, disponibilizadas de forma gratuita, aberta e completa pelo Copernicus Data Space

Ecosystem, da ESA (Agência Espacial Europeia), dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, com nível de processamento 1C, que fornece refletância ortorretificada Top-Of-Atmosphere (TOA). A escolha das datas das imagens, especificadas na Tabela 1 refere-se ao período com ausências de nuvens no local de estudo em intervalos anuais, adquiridas no Bloco 21MYT, durante a Órbita Relativa 067.

Tabela 1. Identificador (ID) correspondente a missão, data, horário e linha de base de processamento das imagens dos satélites (Sentinel-2A e Sentinel-2B)

ID da missão	Data de detecção dos dados	Horário de início de detecção dos dados	Linha de base de processamento
S2B	19/10/2019	14h00min59s	N0208
S2A	08/10/2020	14h01min1s	N0500
S2B	18/09/2021	14h00min19s	N0500
S2A	08/10/2021	13h57min11s	N0400
S2B	28/10/2023	13h57min9s	N0509

Foram extraídos 20 pontos coincidindo com as copas das árvores, no interior de cada polígono, excluindo-se 10 metros de bordadura. Os valores dos NDVIs foram adicionados aos pontos, através do algoritmo ‘Add Raster Values to Features’ do SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses), obtendo a planilha para análise estatística. Na Figura 2 é possível observar a área de estudo contendo os pontos de coleta nos talhões e nas áreas sem o componente florestal, ou seja, formado por pastagem a pleno sol, sendo essas imagens obtidas com drone.



Figura 2. Imagem fotográfica da área de estudo contendo os três talhões com os componentes arbóreos e os talhões com pastagem a pleno sol. Mojuí dos Campos, 2023.

Para identificar as condições hídricas na área de estudo foram levantados dados disponíveis da base Data Services (NASA/POWER CERES/MERRA2-OPeNDAP), levando-se em consideração o alto desempenho dos modelos de estimativa avaliados por Moraes et al. (2020). Assim sendo, foram analisados os dados referente a série histórica entre 2019 a 2023, referente a temperatura do ar média e precipitação pluvial (mm) para estimar os balanços hídricos, utilizando-se a planilha proposta por Rolin et al. (1999), considerando-se as coordenadas geográficas da URT com o sistema de produção integrado para uma capacidade de água disponível no solo de 300 mm. Vale destacar que o método adotado foi de Thornthwaite e Mather (1955), pela limitação do número de variáveis meteorológicas, considerando-se que para Amazônia possui bom desempenho nas estimativas das taxas evapotranspiratórias.

5.2.1. Análise estatística

Os dados de NDVI das parcelas avaliadas foram submetidos à análise da variância e as diferenças entre médias avaliadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%, utilizando o programa computacional SAS. Essas variáveis apresentaram homogeneidade de variância pelo teste Levene e normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. Foi verificada existência de pontos discrepantes pelo teste t-Student e independência de resíduos pelo teste de Durbin-Watson. Os dados também foram submetidos a análise de componente principal (ACP) para reduzir a dimensionalidade do conjunto de informações, mantendo a maior quantidade possível de variação presente nos dados de NDVI nos talhões e nas áreas com pastagem.

5.3. Resultados e discussão

Na Figura 1 é possível observar a dinâmica do regime de chuva evidenciando que março foi o mês mais chuvoso da série histórica, ocorrido em 2022 (Figura 1A), sendo nesse mesmo ano os menores valores de déficit de água no solo (Figura 1 B). Por outro lado, o ano de 2023 foi marcado por baixa oferta pluvial, confirmando os expressivos valores de deficiência de água, as quais foram associadas ao fenômeno El Niño forte na região oeste do Pará. Valores expressivos foram observados na evapotranspiração potencial e real em 2023, reforçando os efeitos dessa anomalia climática na região. O mês mais chuvoso durante o período de coleta das variáveis no campo foi março de 2022.

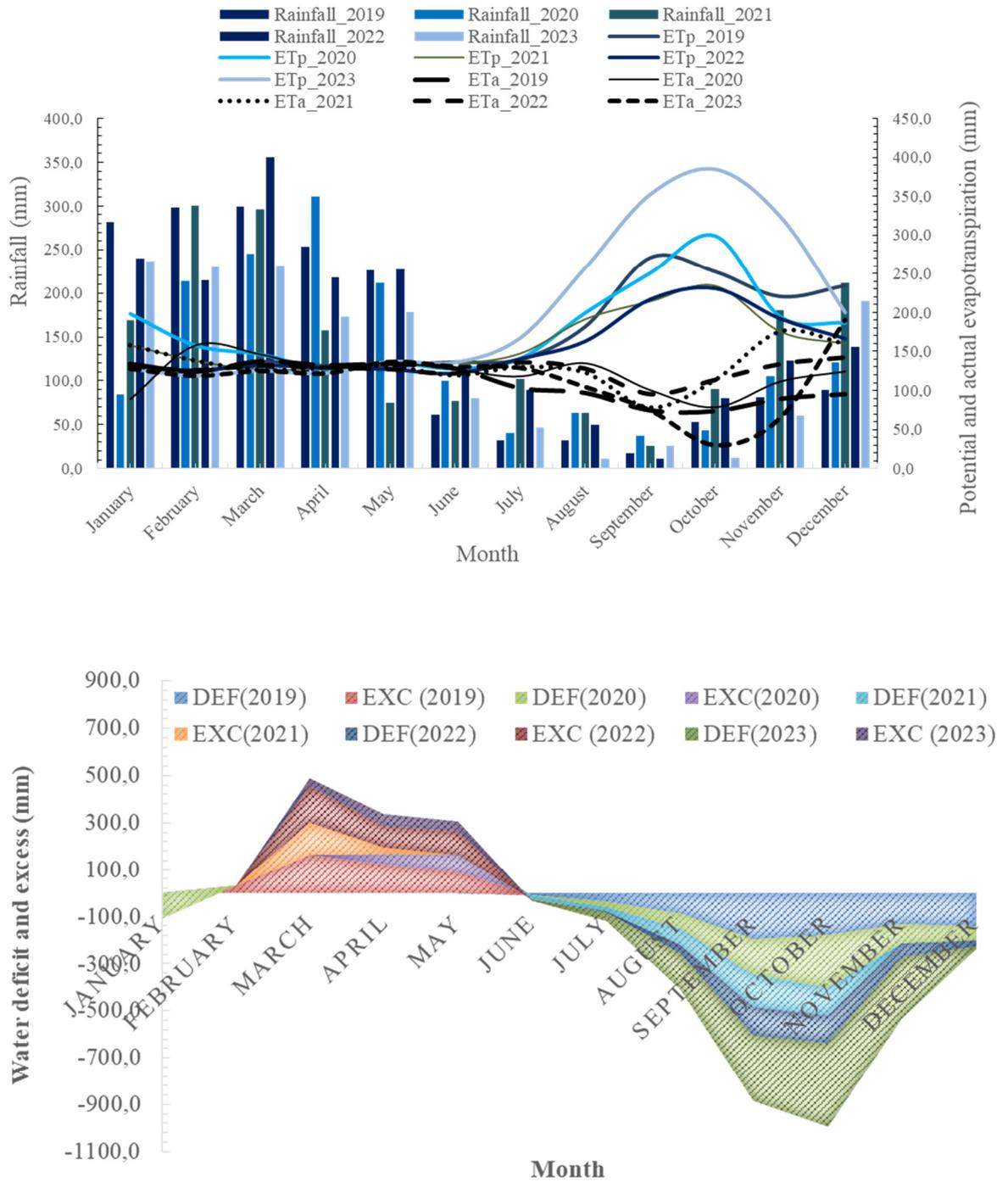


Figura 1. Valores de precipitação pluvial (PRP), evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) em mm (A) e valores de deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) na área de estudo em Mojuí dos Campos, Pará, Brasil.

Na Tabela 2 podem ser visualizadas as médias de cada área avaliada em todos os anos: 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023. Observou-se variação do NDVI em resposta aos diferentes tipos cobertura do solo, onde os valores de menor NDVI foram inferiores a 0,25 e os maiores valores com NDVI superior a 0,50.

Observa-se que as áreas de sistema silvipastoril (Castanheira da Amazônia, Mogno Africano, e Cumaru) apresentam, de forma consistente, valores mais altos de NDVI em comparação com as áreas de pasto (Pasto 1, Pasto 2 e Pasto 3), sugerindo uma maior densidade e capacidade fotossintética da vegetação nos sistemas integrados.

É importante destacar que, no decorrer do ano de 2020, os sistemas silvipastoris passaram por um processo de desbaste, o qual teve como consequência uma redução significativa nos valores de NDVI.

Tabela 2. Médias de NDVI no período de cinco anos consecutivos (2019 -2023) nas áreas de sistema silvipastoril e áreas de pasto. Mojuí dos Campos, Pará.

Área	NDVI 2019	NDVI 2020	NDVI 2021	NDVI 2022	NDVI 2023
Castanheira da Amazônia	0,57 a	0,36 a	0,37 a	0,31 b	0,34 a
Mogno Africano	0,55 a	0,37 a	0,37 a	0,36 a	0,35 a
Cumaru	0,55 a	0,38 a	0,37 a	0,33 ab	0,30 b
Pasto 1	0,42 b	0,24 b	0,27 b	0,24 c	0,23 c
Pasto 2	0,36 c	0,20 c	0,28 b	0,23 cd	0,20 c
Pasto 3	0,35 c	0,21 bc	0,28 b	0,21 d	0,20 c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si na coluna pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

Na Figura 3 é apresentado o box plot, que aponta a variação do NDVI nas áreas analisadas anualmente. Para os anos de 2020 a 2023, os valores de NDVI tendem a ser próximos, com um comportamento similar dentro de cada grupo (sistemas silvipastoris e pastagens). Isso sugere que, independentemente do ano, os sistemas silvipastoris mantêm um nível de cobertura vegetal e saúde das plantas consistentemente superior em comparação às pastagens a pleno sol. Os anos com menor pluviosidade, ou seja, associado a evento climático adverso, como o fenômeno El Niño observado em 2023, tendem a apresentar valores menores de NDVI em todas as áreas, refletindo o impacto do estresse hídrico sobre o vigor da vegetação. Isso é particularmente evidente nas áreas de pastagem, que mostram uma redução mais acentuada nos valores de NDVI, indicando uma maior vulnerabilidade à variabilidade climática.

Conforme observado por Barbosa et al. (2011), o comportamento do NDVI é fortemente influenciado pela precipitação pluvial e demonstra uma resposta temporal, com uma defasagem

que pode variar entre dois a três meses. Em outras palavras, o NDVI reflete reduções no teor de água no solo após um período específico de diminuição das chuvas, confirmando os resultados de Vicente-Serrano et al. (2012), os quais investigaram a resposta da vegetação à condição hídrica do solo através da avaliação da reflectância vegetal.

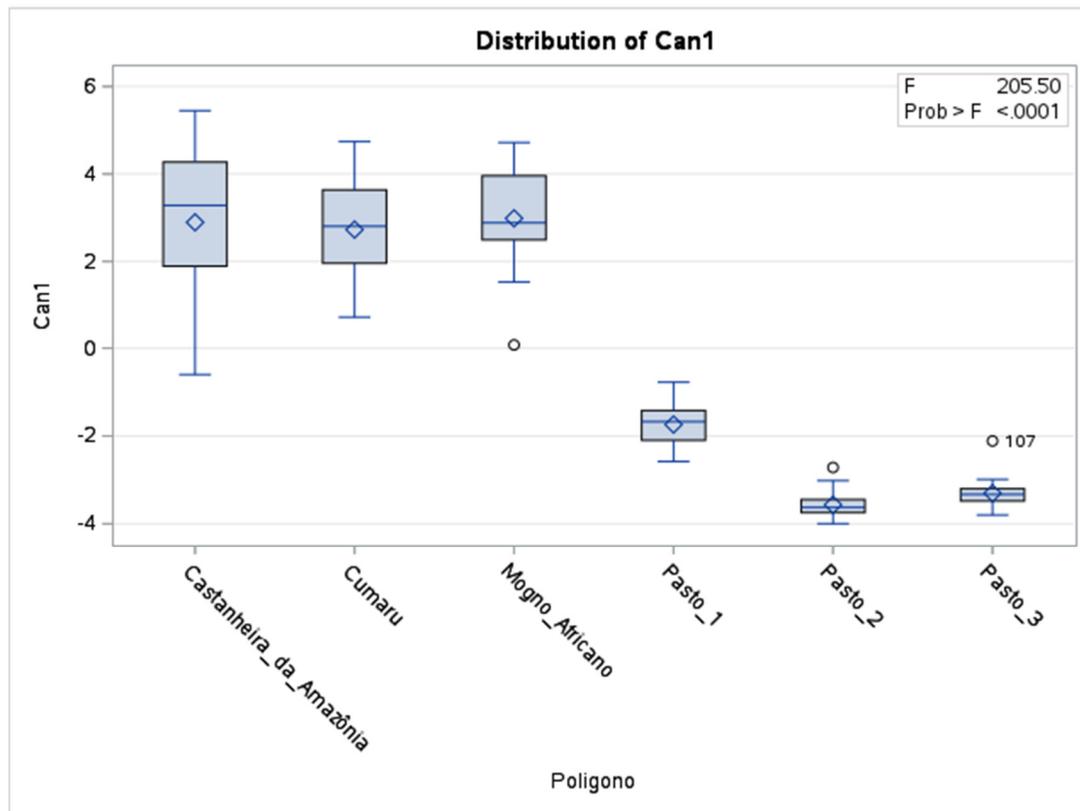


Figura 3. Gráfico de caixas explicando a variação do NDVI para as áreas avaliada no período de 2019 a 2023 em Mojuí dos Campos.

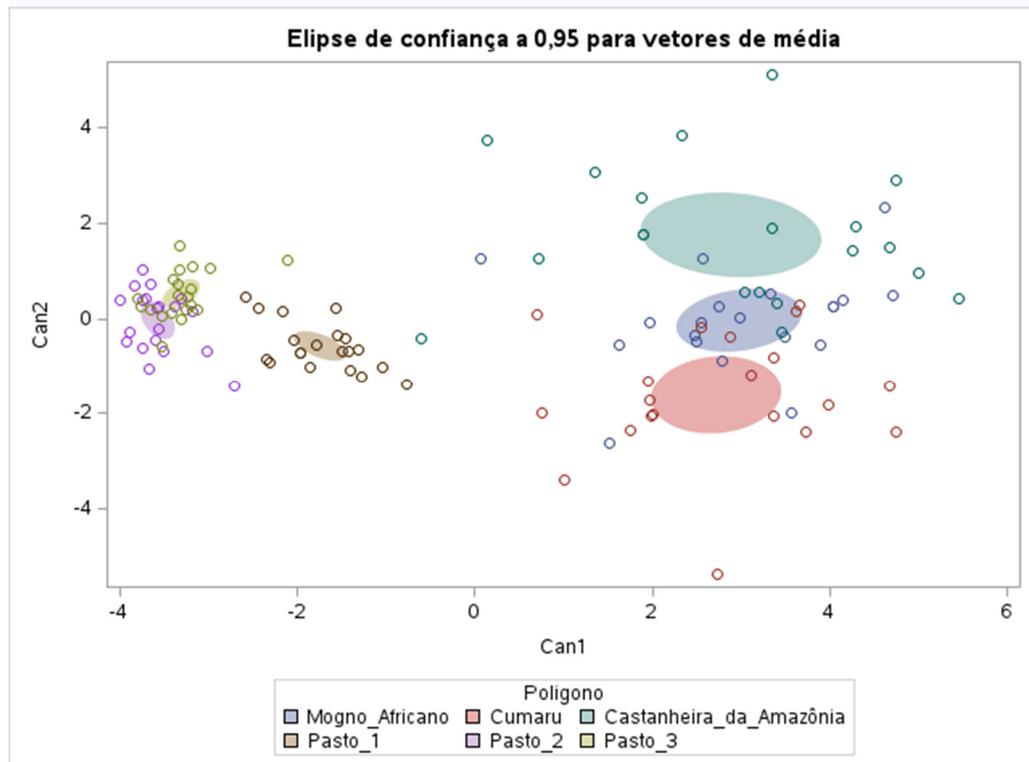


Figura 4. Gráfico discriminante dos NDVIs para os diferentes tipos de vegetação.

Na Figura 4 observa-se que Mogno Africano e o Cumaru estão mais próximos no espaço da componente principal, sugerindo que têm características mais similares em relação às variáveis analisadas. A Castanheira da Amazônia está mais afastada das duas outras espécies arbóreas, indicando diferenças nos padrões de NDVI. Os grupos Pasto 1, Pasto 2 e Pasto 3 apresentaram maior sobreposição entre si e expressaram diferenças suficientes para serem distinguidos dos componentes arbóreos no sistema silvipastoril.

A posição relativa das elipses no espaço de componentes aponta que a primeira componente (Can1) pode estar associada a um gradiente de alteração antrópica ou de manejo das terras, enquanto a segunda componente (Can2) representa as variações ecológicas ou de composição da vegetação.

Houve diferença estatística significativa em relação às áreas de sistema silvipastoril e pastagens, com valores maiores de NDVI observado nas áreas de sistema silvipastoril. Esse resultado pode ser explicado por Huete et al. (2006), que reforçam quanto a capacidade de suprir a falta de água no solo em áreas com florestas, pois as mesmas apresentam estratégias de reposição de água pelas raízes mais profundas, garantindo a atividade fotossintética e,

consequente, mantendo ou suavizando sua capacidade de produção de fitomassa, em períodos secos.

Durante os meses de setembro a novembro, a vegetação natural tende a perder vigor vegetativo devido à escassez de chuvas. No entanto, é observado que os valores de NDVI nas áreas de sistema silvipastoril são superiores em comparação às áreas de pastagem. Esse fenômeno indica que as espécies arbóreas conseguem manter sua atividade fotossintética, em grande parte devido ao sistema radicular que possibilita a extração de água das camadas mais profundas do solo, conforme discutido por Carvalho Jr et al. (2009). Resultados obtidos por Zhao et al. (2015) também corroboram essa observação, demonstrando que no início do período seco, as áreas com culturas anuais e pecuária apresentam um baixo crescimento vegetativo, enquanto nas áreas de floresta as plantas continuam a crescer, devido à sua alta capacidade de explorar água das camadas mais profundas do solo, mesmo durante o período menos chuvoso. É importante notar que a redução de fotoassimilados, resultante da diminuição da área foliar, é mais pronunciada na vegetação com cultivos florestais, diferenciando significativamente os padrões observados (Pismel, et al., 2016).

Essas descobertas destacam a necessidade urgente de promover e apoiar programas de pesquisa no bioma Amazônia. Ao promover o desenvolvimento de infra-estruturas e programas de formação personalizados, podemos capacitar os investigadores para enfrentar os desafios específicos da região e desbloquear todo o potencial do sensoriamento remoto para estudar a evapotranspiração.

5.4. Conclusão

O NDVI como ferramenta de monitoramento ambiental em sistemas de produção integrada é forte indicador de monitoramento ambiental em áreas que estão sendo restauradas na Amazônia Oriental e que estão adotando práticas produtivas semelhantes em outras regiões do Brasil com alto potencial de serem certificadas em programas como mercado de carbono e pagamento por serviços ambientais.

Foi observada variação significativa em NDVI entre as áreas com sistema silvipastoril e pastagens a pleno sol, reforçando a capacidade do componente arbóreo em manter as maiores respostas espectrais nos períodos em que ocorre a redução da oferta pluvial, intensificam as demandas evapotranspiratórias e os estoques de água no solo se esgotam, confirmados pelos elevados déficits hídricos entre julho a novembro na área de estudo.

As variações detectadas nos valores de NDVI confirmam que na região as imagens devem ser analisadas entre setembro e outubro quando ocorrem as menores ofertas pluviais,

confirmadas pelos valores de deficiência hídrica no solo, reduzindo-se a capacidade vegetativa nas pastagens, confirmadas pelos baixos valores de NDVI.

As áreas com o sistema silvipastoril demonstraram maior resiliência durante períodos de estresse hídrico, explicada pela capacidade das raízes das árvores em acessar água nas camadas mais profundas do solo, mantendo a atividade fotossintética e, conseqüentemente, a produção de fitomassa mesmo em períodos secos.

Referências

BARBOSA, J. Z.; POGGERE, G.; MANCINI, M.; SILVA, S. H. G.; MOTTA, A. C. V.; MARQUES, J. J. G. S. E M.; CURI, N. National-scale spatial variations of soil phosphorus retention capacity in Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v.128, p.1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103271>

BUENO, R. S.; MARCHETTI, L.; COCOZZA, C.; MARCHETTI, M.; SALBITANO, F. Could cattle ranching and soybean cultivation be sustainable? A systematic review and a meta-analysis for the Amazon. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, v.14, p.285-298, 2021. <https://doi.org/10.3832/ifor3779-014>

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, v.124, p.3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

CÂNDIDO, A.C.T.F.; DA SILVA, T.A.; CÂNDIDO, B.U.F.; TAPAJÓS, R.; CHAVES, S.S.N.F.; SILVA, A.R.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C.T.D.S.; FERNANDES, P.C.C.; DIAS-FILHO, M.B.; LISBOA, L. S. S.; ALMEIDA, R. G.; MOURA, J. M. S.; BELDINI, T. P.; MARTORANO, L. G. Carbon and Methane as Indicators of Environmental Efficiency of a Silvopastoral System in Eastern Amazon, Brazil. *Sustainability* 2024, 16, 2547. <https://doi.org/10.3390/su16062547>

CÂNDIDO, A.C.T.F.; GUERREIRO MARTORANO, L.; CÂNDIDO, B.U.F.; NASCIMENTO, W.; DIAS, C.T.D.S.; LISBOA, L.S.S.; FERNANDES, P.C.C.; SILVA, A.R.; DIAS-FILHO, M.B.; BELDINI, T.P. Infrared Thermal Profiles in Silvopastoral and Full-Sun Pastures in the Eastern Amazon, Brazil. *Forests* 2023, 14, 1463. <https://doi.org/10.3390/f14071463>

CARVALHO JÚNIOR, O. A., COUTO JÚNIOR, A. F., SILVA, N. C., MARTINS, E. S., CARVALHO, A. P. F., GOMES, R. A. T. Avaliação dos Classificadores Espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em Séries Temporais NDVI-MODIS no Campo de Instrução Militar de Formosa (GO). *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 61, p. 399-412, 2009.

CASTAGNA, D.; BARBOSA, L.S.; MARTIM, C.C.; PAULISTA, R.S.D.; MACHADO, N.G.; BIUDES, M.S.; DE SOUZA, A.P. Evapotranspiration Assessment by Remote Sensing in Brazil with Focus on Amazon Biome: Scientometric Analysis and Perspectives for Applications in Agro-Environmental Studies. *Hydrology* 2024, 11, 39. <https://doi.org/10.3390/hydrology11030039>

CORDEIRO, S. A.; SILVA, M. L. da; OLIVEIRA NETO, S. N. de; OLIVEIRA, T. M. Simulação da variação do espaçamento na viabilidade econômica de um sistema agroflorestal. *Floresta e Ambiente*, v.25 n.1, p. 1-8, 2018.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L06405, 2006.

JINRU, X.; SU, BAOFENG. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *J. Sensors*, 2017, 1353691:1-1353691:17

LINDERHOLM, H. W. Growing season changes in the last century, *Agricultural and Forest Meteorology*, v 137, 1–2, 2006, 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.006>.

LIU, X.; LI, Q.; TAN, S.; WU, X.; SONG, X.; GAO, H.; HAN, Z.; JIA, A.; LIANG, G.; LI, S. Evaluation of carbon mineralization and its temperature sensitivity in different soil aggregates and moisture regimes: A 21- year tillage experiment. *Science of the Total Environment*, v.837, p.1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155566>

MAPBIOMAS. Coleção v.7 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil. Available on: Accessed on: Fev. 2024

MARTORANO, LG, NECHET, D, PEREIRA, LC. Tipologia climática do Estado do Pará: Adaptação do método de Köppen. *Bol. De Geogr. Teorética* 23, 45–46 (1993). Doi: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbfg>.

MARTORANO, L.G.; VITORINO, M.I.; SILVA, B.P.P.C.; LISBOA, L.S.; SOTTA, E.D.; REICHARDT, K. Climate conditions in the eastern amazon: Rainfall variability in Belem and indicative of soil water deficit. *Afr. J. Agric. Res.* 2017, 12, 1801–1810.

MORAES, J.R.S.C.; ROLIM, G.S.; MARTORANO, L.G.; APARECIDO, L.E.O.; BISPO, R.C.; VALERIANO, T.T.B.; ESTEVES, J.T. Performance of the ECMWF in air temperature and precipitation estimates in the Brazilian Amazon. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 141, p. 803-816, 2020.

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*, [s. l.], v. 141, n. 2/3, p. 166-172, 2011.

PISMEL, V. A. M.; MARTORANO, L. G.; MONTEIRO, D. C. A.; LISBOA, L. S. S. PRODUTO MODIS ASSOCIADO À CONDIÇÃO HÍDRICA NO SOLO PARA DIFERENCIAR PADRÕES NA VEGETAÇÃO NO MUNICÍPIO DE DOM ELISEU, PARÁ. *Revista Brasileira de Climatologia*. v 19, 178-190, 2016.

POELKING, E. L.; LAUERMANN, A.; DALMOLIN, R. Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinâmica da vegetação em período de estresse hídrico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 4145-4150.

ROCHA, F. I.; JESUS, E. C.; TEIXEIRA, W. G.; LUMBRERAS, J. F.; CLEMENTE, E. P.; MOTTA, P. E. F.; BORSANELLI, A. C.; DUTRA, I. S.; OLIVEIRA, A. P. Soil type determines the Magnitude of soil fertility changes by forest-to-pasture conversion in western Amazonia. *Science of the Total Environment*, v.856, p.1-9, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158955>

- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *ETRS SYMPOSIUM*, 3., 1973, Washington, D. C. Proceedings... Washington, D. C.: NASA, 1973. SP- 351, p. 309-317.
- RUEDA, B. L.; MCROBERTS, K. C.; BLAKE, R. W.; NICHOLSON, C. F.; VALENTIM, J. F.; FERNANDES, E. C. M. Nutrient status of cattle grazing systems in the western Brazilian Amazon. *Cogent Food & Agriculture*, v.6, p.1-19, 2020. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1722350>
- SILVA, E. C.; GAMA, J. R. V.; RODE, R.; COELHO, L. M. Tree species growth in a silvipastoral system in Amazon. *African Journal of Agricultural Research*, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 95-103, 2018.
- SILVA, J.C.N.; SILVA, A.R.; VELOSO, C.A.C.; DANTAS, E.F.; DO SACRAMENTO, J.A.A.S. Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon. *Rev. Bras. Eng. Agric. E Ambient.* 2018, 22, 837–842.
- SILVA, A. A.; SILVA-JÚNIOR, C. A.; BOECHAT, C. L.; DELLA-SILVA, J. L.; TEODORO, P. E.; ROSSI, F. S.; TEODORO, L. P. R.; PELISSARI, T. D.; BAIO, F. H. R.; LIMA, M. Effect of land uses and land cover on soil attributes in the southern Brazilian Amazon. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.194, p.1-21, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10342-y>
- SOUZA, C.M., JR.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M.R.; PARENTE, L.L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B.F.T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; G. FERREIRA, L.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sens.* 2020, 12, 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955. 10 p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).
- VICENTE-SERRANO, S; M; GOUVEIA, C; CAMARERO, J. J; BEGUERÍA, S.;TRIGO, R.; MORENO-LOPEZ, I. J.; MOLINE-AZORIN C.;PASHO, E.; LACRUZ LORENZO, J.;REVUELTO, J.;MORAN-TEJEDA, E.;LORENZO-SANCHES, A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, vol. 110, no. 1, pp. 52 57.
- YAN, J.; ZHANG, G.; LING,H.; HAN, F. Comparison of time-integrated NDVI and annual maximum NDVI for assessing grassland dynamics, *Ecological Indicators*, Volume 136, 2022, 108611, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108611>.
- ZHAO, X.; WEI, H.; LIANG, S.; ZHOU, T.; HE, B.; TANG, B.; WU, D. Responses of Natural Vegetation to Different Stages of Extreme Drought during 2009 2010 in Southwestern China. *Remote Sens.* 2015, 7, 14039-14054.

CONCLUSÃO GERAL

Indicadores de sustentabilidade em sistemas de produção integrados como o silvipastoril avaliado nesta pesquisa são facilmente detectáveis e passíveis de aferição e validações com o apoio de monitoramento termográfico, uso de metodologias e equipamentos de medidas de fluxos de gases de efeito estufa, variáveis que expressam a capacidade de resiliência do solo pelo manejo adequado e uso de imagens de satélites para diagnosticar com o índice de vegetação por diferença normalizada que existe estratégia de recuperação de áreas em vias de degradação pela decisão do produtor em acreditar e apoiar ações de pesquisas em sua propriedade rural.

Na Amazônia é possível usar os mesmos indicadores de sustentabilidade apresentados neste trabalho para comparar os sistemas de produção que estão aderentes com as políticas públicas de redução do desmatamento, de recuperação de áreas degradadas e de restauração florestal na região. O produtor rural pode ter com esses indicadores, novas oportunidades de competir em mercados globais como de crédito de carbono, pagamento por serviços ambientais, valorização da proteína animal produzida na propriedade rural em alinhamento às diretrizes das marcas Carne Carbono Neutro e Carbono Nativo, pela inclusão do mogno africano, e do cumaru ou castanheira, respectivamente.

Indicadores como a regulação térmica apontada pelo componente arbóreo, em especial do mogno africano, reforça que entre os bens e serviços prestados pelo sistema silvipastoril, essa espécie por ser uma exótica com desenvolvimento expressivo, além do potencial madeireiro, fornece como ganho adicional a venda de sementes altamente procuradas nas ações de restauração e silvicultura em nível nacional.

A base de dados levantada pela equipe durante o trabalho de tese reforça o potencial de novas pesquisas, como por exemplo a quantificação do C nas arbóreas, ao longo da consolidação do sistema silvipastoril.

Os indicadores de sustentabilidade servem de referência para futuras implantações de sistemas integrados e projetos de financiamento às agências de fomento para produção sustentável na Amazônia brasileira. A partir desses, outros indicadores de sustentabilidade podem ser estudados com base nas características da região estudada no presente trabalho.

A integração das informações reforça que as pesquisas nessa temática necessitam de ações interdisciplinares e totalmente integradas entre o produtor rural, os pesquisadores e professores e, sobretudo para formação de novos profissionais na Amazônia com foco na produção sustentável na região.

Referências

Adegbeye MJ, Reddy PRK, Obaisi AI, Elghandour MMY, Oyebamiji KJ, Salem AZM, Morakinyo-Fasipe OT, Cipriano-Salazar M, Camacho-Díaz LM (2020) Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations – an overview. *J Clean Prod* 242:18319

Balehegn M, Kebreab E, Tolera A, Hunt S, Erickson P, Crane TA, Adesogan AT (2021) Livestock sustainability research in Africa with a focus on the environment. *Anim Front* 11:47–55

Beauchemin KA, Ungerfeld EM, Eckard RJ, Wang M (2020) Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal* 14(S1): S2–S16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>

Kluthcouski, J.; Cordeiro, L. A. M.; Vilela, L.; Marchão, R. L.; Salton, J. C.; Macedo, M. C. M.; Zimmer, A. H.; Balbino, L. C.; da Silva, V.P.; Müller, M. D. Conceitos e Modalidades da Estratégia de Integração Lavoura- -Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Ed.). *Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

Nair PKR, Kumar BM, Nair VD. 2022. *An introduction to agroforestry: four decades of scientific developments*. 2nd ed. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-75358-0.

Plieninger T, Flinzberger L, Hetman M, Horstmannshoff I, Reinhard-Kolempas M, Topp E, Moreno G, Huntsinger L. 2021. Dehesas as high nature value farming systems: a social-ecological synthesis of drivers, pressures, state, impacts, and responses. *Ecol Soc*. 26: art23. doi:10.5751/ES-12647-260323.

Zhu X, Liu W, Chen J, Bruijnzeel LA, Mao Z, Yang X, Cardinael R, Meng F-R, Sidle RC, Seitz S, et al. 2020. Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes. *Plant Soil*. 453:45–86. doi:10.1007/s11104-019-04377-3