



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA/ AGRICULTURA  
TROPICAL**

**ALCILANE ARNALDO SILVA**

**PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS E FORRAGEIRAS E PARÂMETROS  
DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NO SUDOESTE  
PIAUIENSE**

**TERESINA-PI  
2021**

**ALCILANE ARNALDO SILVA**

**PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS E FORRAGEIRAS E PARÂMETROS  
DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NO SUDOESTE  
PIAUIENSE**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura tropical, para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Orientador

Dr. Henrique Antunes de Souza

Coorientador

Dr. Ramilos Rodrigues de Brito

**TERESINA-PI  
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco  
Serviço de Processos Técnicos

S586p Silva, Alcilane Arnaldo.  
Produtividade de culturas anuais e forrageiras e parâmetros do solo em sistemas integrados de produção no sudoeste piauiense / Alcilane Arnaldo Silva. – 2021.  
110 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, Teresina, 2021.  
“Orientador: Dr. Henrique Antunes de Souza.”  
“Coorientador: Dr. Ramilos Rodrigues de Brito.”

1. Qualidade do solo. 2. ILPF. 3. Plantas de cobertura.  
4. *Eucalyptus* spp. 5. *Mimosa caesalpinifolia*. I. Título.

CDD 630

ALCILANE ARNALDO SILVA

**“PRODUTIVIDADE DE CULTURAS ANUAIS E FORRAGEIRAS E PARÂMETROS DO SOLO  
EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NO SUDOESTE PIAUIENSE.”**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

APROVADA em 23 de julho de 2021.

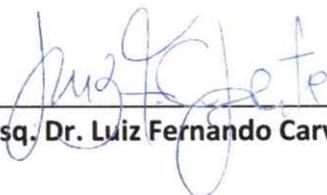
Comissão Julgadora:



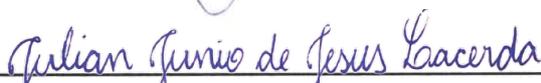
Prof. Dr. Ramilos Rodrigues de Brito – UFPI



Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke – UFMS



Pesq. Dr. Luiz Fernando Carvalho Leite – EMBRAPA Meio-Norte



Prof. Dr. Julian Junio de Jesus Lacerda – UFPI



Pesq. Dr. Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida – EMBRAPA Pesca e Aquicultura



Pesq. Dr. Henrique Antunes de Souza – EMBRAPA Meio-Norte  
(Orientador)

TERESINA-PI

2021

## **DEDICATÓRIA**

À minha mãe, Maria de Lourdes Pereira  
Arnaldo, pela dedicação e incentivo.

**OBRIGADA MÃE!**

Às minhas tias, Maria de Fátima Arnaldo e  
Raimunda Nonata Arnaldo, pelo incentivo e  
preocupação.

Aos meus irmãos, Alessandra, Anabel, Aldo,  
Aldelan e sobrinhos (Mateus, Lucas, Sara,  
João Vítor, Rute e Guilherme) pela  
admiração, amor e momentos de alegria.

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por me proporcionar saúde, força e determinação para concluir essa nova etapa;

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Agricultura Tropical, pela oportunidade de realização do curso;

A CAPES (Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior), pela concessão de bolsa de estudo;

À EMBRAPA MEIO-NORTE (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), pela logística e estrutura laboratorial;

À UFPI, Campus Professora Cinobelina Elvas, por ceder a estrutura laboratorial e transporte no período de condução da pesquisa.

Ao Dr. Henrique Antunes de Souza, pela oportunidade de ser sua orientanda, pela paciência, incentivo, apoio e amizade.

Ao Dr. Ramilos Rodrigues de Brito, pelo apoio durante a condução do experimento.

À Fazenda Vô Desidério, por ceder área para realização da pesquisa e ao Sr. Ronaldo Marafon, pela atenção e esclarecimentos.

Aos professores do PPGA-CCA, pelos ensinamentos, pelas experiências que compartilharam, pelo conhecimento científico adquirido e pela ajuda que me fizeram crescer pessoal e profissionalmente.

Aos Técnicos do Laboratório de solo e água da Embrapa Meio-Norte, José Moreira e José Afonso, pelos ensinamentos na condução das análises laboratoriais;

Aos colegas de jornada, pelas experiências, momentos de risadas e alegria, pelos conhecimentos trocados, em especial aos amigos Enayra, Ingrid, Mariane, José Monteiro (*In memoriam*), Ane e Gabriela.

Agradeço imensamente a Angélica, Kaleb, Rubens, Gabriel, Karolyne, Thaís e Renato pela ajuda durante as coletas do experimento e a Suzane, Rodrigo, Jenefer, Karol, Amanda e Ane durante as análises laboratoriais.

A toda minha família e amigos que contribuíram direta ou indiretamente.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, pelas valiosas contribuições.

## RESUMO

Sistemas silviagrícolas integram atividades agrícolas, pecuária e florestal, melhorando a qualidade do solo, ciclagem de nutrientes e produtividades das culturas agrícolas. Dessa forma, objetivou-se avaliar desempenho da consorciação e sucessão de culturas anuais e forrageiras e os componentes do sistema silviagrícola na qualidade do solo no sudoeste piauiense. O estudo foi desenvolvido em Bom Jesus, PI. Foram realizados três ensaios: (i) consorciação de forrageiras com o milho em rotação com a soja em atributos químicos e biológicos do solo e produtividade das culturas; (ii) módulos de sistema silviagrícola: renques de eucalipto e sabiá, entre renque de soja e de milho e Cerrado nativo na qualidade do solo; e (iii) fracionamento de P inorgânico do solo em módulos do sistema silviagrícola. No primeiro ensaio, coletas de amostras de solo para avaliação dos atributos químicos foram realizadas nas camadas, 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m e biológicos na camada de 0-0,1 m do solo e produtividade do milho e soja, ao final de cada safra (2017/2018 e 2018/2019). No segundo ensaio, nas mesmas camadas mencionadas foram mensurados os atributos químicos e estoque de carbono. No terceiro, foram consideradas somente as camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m para o fracionamento do fósforo. Os dados foram submetidos à análise de variância, usando o teste de agrupamento para o ensaio (i), teste de médias e análise multivariada para os ensaios (ii) e (iii). No primeiro ensaio, o consórcio de milho com as forrageiras do gênero *Urochloa* proporcionou melhoria das variáveis relacionadas ao carbono do solo e o consórcio com as forrageiras do gênero *Megathyrsus* proporcionou melhoria na fertilidade e variáveis biológicas do solo, nas safras sucessivas de soja. No segundo ensaio, o renque de eucalipto e o renque de sabiá proporcionaram maior concentração de carbono. O entre renque de milho contribuiu para a estratificação de carbono do solo refletindo em qualidade do solo. Dessa forma, o sistema silviagrícola melhora a concentração dos atributos químicos do solo, principalmente em relação ao carbono do solo. No terceiro ensaio, os componentes florestais foram semelhantes para o fósforo ligado ao alumínio e ao ferro, porém, houve maior destaque para o renque de eucalipto e entre renque de soja para o fósforo ligado ao cálcio. Com isso, concluímos que o sistema silviagrícola apresenta a seguinte magnitude das formas de fósforo inorgânico: P-Al>P-Fe>P-Ca.

**Palavras-chave:** Qualidade do Solo; ILPF; Plantas de cobertura, *Eucalyptus* spp., *Mimosa caesalpinifolia*.

## ABSTRACT

Forestry systems integrate agricultural, livestock and forestry activities, improving soil quality, nutrient cycling and crop yields. Thus, the objective was to evaluate the performance of the consortium and succession of annual and forage crops and the components of the forestry system in the quality of the soil in the southwest of Piauí. The study was developed in Bom Jesus, PI. Three trials were carried out: (i) forage consorting with corn in rotation with soybean in soil chemical and biological attributes and crop productivity; (ii) forestry system modules: eucalyptus rows and sabiá, between row of soybean and corn and native Cerrado in soil quality; and (iii) fractionation of inorganic P of soil in modules of the silviagricultural system. In the first trial, soil samples for evaluation of chemical attributes were collected in the layers, 0-0.1; 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m and biological in the 0-0.1 m soil layer and corn and soybean productivity at the end of each harvest (2017/2018 and 2018/2019). In the second trial, the chemical attributes and carbon stock were measured in the same mentioned layers. In the third, only the 0-0.1 and 0.1-0.2 m layers were considered for phosphorus fractionation. The data were subjected to analysis of variance, using the cluster test for the assay (i), mean test and multivariate analysis for the assays (ii) and (iii). In the first trial, the consortium of maize with forage of the genus *Urochloa* provided improvement of the soil carbon variables and the consortium with forage of the genus *Megathyrsus* provided improvement in fertility and soil biological variables, in successive soybean harvests. In the second essay, the eucalyptus row and the sabiá row provided higher carbon concentration. The corn row contributes to the carbon stratification of the soil reflecting in soil quality. In this way, the forestry system improves the concentration of soil chemical attributes, mainly in relation to soil carbon. In the third trial, the forest components were similar for phosphorus bound to aluminum and iron, but there was greater emphasis on the Eucalyptus row and among soybean row for phosphorus bound to calcium. With this, we conclude that the forestry system system presents the following magnitude of inorganic phosphorus forms: P-Al>P-Fe>P-Ca.

**keywords:** Soil Quality; ICLF; Cover plants, *Eucalyptus* spp., *Mimosa caesalpiniiifolia*.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo I

- Figura 1-** Valores médios da precipitação pluvial das safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019. 33

### Capítulo II

- Figura 1-** Valores médios da precipitação pluvial da safra 2018/2019. 63

- Figura 2-** Entre renque com plantio de soja (A). Entre renque com plantio de milho (B). 63

- Figura 3-** Estoque de carbono acumulado do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola na camada de 0-0,5 m, Bom Jesus, PI, 2019. 70

- Figura 4** Relação de estratificação do carbono total (COT) e Lábil (COP) sob influência dos componentes do sistema silviagrícola na camada de 0-0,1; 0,1-0,5 m, Bom Jesus, PI, 2019. 70

- Figura 5-** Biplot entre a relação de para atributos químicos do solo, carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D). 74

- Figura 6-** Dendrograma de dissimilaridade entre atributos químicos do solo em carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola na camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D). Bom Jesus, PI, 2019. 75

### Capítulo III

- Figura 1-** Valores médios da precipitação pluvial da safra 2018/2019. 95

- Figura 2-** Entre renque com plantio de soja (A). Entre renque com plantio de milho (B). 96

- Figura 3-** pH em água (pH H<sub>2</sub>O) e Matéria orgânica (MO) sob influência do sistema silviagrícola e Cerrado nativo nas camadas 0-0,1 (Figuras A e C) e 0,1-0,2m (Figuras B e D), Bom Jesus, PI, 2019. 99

- Figura 4-** Fósforo disponível (P) e fracionamento do fósforo do solo (P-Al, P-Fe e P-Ca) sob influência do sistema silviagrícola e Cerrado nativo nas camadas 0-0,1 (Figuras A, C, E e G) e 0,1-0,2 (Figuras B, D, F, H); m, Bom Jesus, PI, 2019. 100

- Figura 5-** Biplot entre a relação do fracionamento do fósforo inorgânico, pH e matéria orgânica sob influência dos componentes do sistema silviagrícola para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A) e 0,1-0,2 m (B). 102

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo I

<b>Tabela 1-</b>	Atributos químicos e granulometria do solo antes da implantação do experimento, Bom Jesus, PI, 2016.	32
<b>Tabela 2-</b>	Atributos químicos do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2017/2018, nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, em Bom Jesus, PI.	38
<b>Tabela 3-</b>	Atributos químicos do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2018/2019, nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, em Bom Jesus, PI.	39
<b>Tabela 4-</b>	Atributos biológicos do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2017/2018 e 2018/2019, Bom Jesus, PI.	40
<b>Tabela 5-</b>	Carbono orgânico total e carbono das substâncias húmicas em diferentes camadas do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Bom Jesus, PI.	42
<b>Tabela 6-</b>	Diagnose foliar em plantas de soja cultivadas em sucessão ao milho solteiro e consorciado com forragens, nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Bom Jesus, PI.	44
<b>Tabela 7-</b>	Produtividade sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2017/2018 e 2018/2019, Bom Jesus, PI.	47

### Capítulo II

<b>Tabela 1-</b>	Atributos químicos e granulometria do solo antes da implantação do ensaio, Bom Jesus, PI, 2016.	62
<b>Tabela 2-</b>	Atributos químicos do solo sob influência do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m, Bom Jesus, PI, 2019.	66
<b>Tabela 3-</b>	Carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, Densidade do solo, Estoque de carbono e Índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Bom Jesus, PI, 2019.	68
<b>Tabela 4-</b>	Labilidade, índice de compartimento do carbono, índice de labilidade e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Bom Jesus, PI, 2019.	71
<b>Tabela 5-</b>	Coefficientes de pesos (auto vetores), autovalores e variância explicada por cada componente principal (CP1 e CP2) para atributos químicos do solo, carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono, labilidade, índice de compartimento do carbono, labilidade e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Bom Jesus, PI, 2019.	73

### Capítulo III

<b>Tabela 1-</b>	Atributos químicos e granulometria do solo antes da implantação do ensaio, Bom Jesus, PI, 2016.	94
<b>Tabela 2-</b>	Análise de variância para pH H <sub>2</sub> O, matéria orgânica, P disponível e frações do fósforo (P-Al, P-Fe e P-Ca) sob influência dos componentes do sistema silviagrícola, Bom Jesus, PI, 2019.	98
<b>Tabela 3-</b>	Coefficientes de pesos (auto vetores), autovalores e variância explicada por cada componente principal (CP1 e CP2) para pH e matéria orgânica, fósforo disponível, fracionamento do fósforo solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1 e 0,1-0,2m. Bom Jesus, PI, 2019.	101
<b>Tabela 4-</b>	Coefficientes de correlação linear simples entre os valores de pH, MO, fósforo disponível e fósforo inorgânico sob sistema silviagrícola Bom Jesus, PI, 2019.	102

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2.	REVISÃO DELITERATURA.....	14
2.1	Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) .....	14
2.2	Componentes do ILF e suas contribuições para o sistema.....	15
2.3	Tecnologia consórcio milho-capim para adoção de sistemas integrados.....	17
2.4	Qualidade do solo em sistemas integrados.....	18
3.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
	CAPÍTULO I.....	28
	CHAPTER I.....	29
1.	INTRODUÇÃO.....	30
2.	MATERIAL E MÉTODOS .....	32
2.1	Local e informações da área experimental.....	32
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
3.1	Resultados.....	37
3.1.1	Atributos químicos do solo.....	37
3.1.2	A tributos biológicos do solo.....	40
3.1.3	Substâncias húmicas.....	41
3.1.4	Diagnose foliar.....	43
3.1.5	Produtividade.....	44
3.2	Discussão.....	45
4.	CONCLUSÕES.....	52
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
	CAPÍTULO II.....	58
	CHAPTER II.....	59
1.	INTRODUÇÃO.....	60
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	62
2.1	Local e informações da área experimental.....	62
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
3.1	Resultados.....	66
3.2	Discussão.....	76
4.	CONCLUSÕES.....	83
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
	CAPÍTULO III.....	90
	CHAPTER III.....	91
1.	INTRODUÇÃO.....	92
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	94
2.1	Local e informações da área experimental.....	94
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
3.1	Resultados.....	98
3.2	Discussão.....	103
4.	CONCLUSÕES.....	107
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A demanda crescente por produzir alimentos, fibras, energia, produtos madeireiros e não madeireiros de forma compatível com a disponibilidade de recursos naturais, em especial solo e água em contraposição à necessidade de redução do desmatamento e mitigação da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), requer soluções que permitam incentivar o desenvolvimento socioeconômico, sem comprometer a sustentabilidade dos recursos naturais (CORDEIRO et al. 2015).

Com base nessa necessidade, sistemas integrados de produção oferecem alternativas reais não somente para superação das imposições citadas, mas para a redução dos riscos climáticos e mercadológicos, aumentando a sustentabilidade da produção agropecuária (KICHEL et al., 2014).

Então, ao longo do tempo, houve a renovação do interesse e crescimento da adoção de sistemas de produção que visam integrar as atividades agrícolas, pecuária e florestal, objetivando proporcionar muitos benefícios técnicos, econômicos, ambientais e sociais. (SKORUPA; MANZATTO, 2019; BALBINO et al., 2011).

Esse sistema de produção apresenta várias possibilidades de combinação espaço-temporal entre os componentes agrícola, pecuária e florestal, em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e no mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos, o que resulta em diferentes sistemas como: silviagrícola, silvipastoril, agropastoril e agrossilvipastoril (BALBINO et al. 2014).

A introdução do componente florestal nesses sistemas de integração agropecuária gerou o conceito mais amplo de ILPF. Além disso, o uso de árvores junto às culturas, além de melhorar a fertilidade do solo beneficiam culturas e pastagens por meio de sua capacidade de enraizamento em profundidade, fixação de nitrogênio em alguns casos (com uso de leguminosas) e retenção do solo (BREMAN; KESSLER, 1997; KLUTHCOUSKI et al. 2015). Com o uso dos sistemas integrados há melhoria na fertilidade, pela ciclagem dos nutrientes e eficiência no uso de fertilizantes, em função das diferentes necessidades das culturas em rotação (MACEDO, 2009; TORRES; ASSIS; LOSS, 2018)

A ILPF, aliada a práticas conservacionistas é uma alternativa econômica e sustentável (MAPA, 2011). Então, no manejo, com uso do plantio direto, torna-se fundamental para a sustentação da qualidade do solo, pois são capazes de elevar em médio e longo prazo os teores de matéria orgânica (BAYER; BATJES;

BINDRABAN, 2010; LOSS et al., 2011; SILVA et al., 2016; SOUZA et al., 2019), através da manutenção e reciclagem de resíduos orgânicos fornecidos por árvores, culturas e pecuária (KICHEL et al., 2014; BUNGENSTAB et al., 2019).

Com isso, apesar de vários estudos mostrarem os benefícios da ILPF (LANA et al. 2018; LEVINSKI-HUF; KLEIN, 2018; STIEVEN et al. 2014; ASSIS et al. 2015), no Cerrado piauiense até o momento, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) possui poucos trabalhos realizados nessas áreas (GUALBERTO 2018; ARAÚJO et al., 2015; CAMPOS et al., 2013; CAMPOS et al., 2011), envolvendo sua dinâmica, seu impacto na qualidade do solo e produtividade em geral.

Diante do exposto, o desenvolvimento desse trabalho parte da hipótese que o sistema silviagrícola é capaz de promover a qualidade do solo diante do incremento nos atributos químicos, biológicos e de produtividade de culturas agrícolas, após três anos de implantação. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar desempenho da consorciação e sucessão de culturas anuais e forrageiras e os componentes do sistema silviagrícola na qualidade do solo no sudoeste piauiense.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)

A ILPF é uma estratégia de produção sustentável, que integra atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado, e busca efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica (BALBINO et al., 2012). Os sistemas de integração classifica-se em quatro modalidades de acordo com Balbino et al., (2012), sendo elas:

-Integração Lavoura-Pecuária (ILP) ou Sistema Agropastoril: nesse sistema integram-se os componentes lavoura e pecuária, em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área, em um mesmo ano agrícola ou por múltiplos anos;

-Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril: sistema que integra os componentes pecuária (pastagem e animal) e floresta em consórcio;

-Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Silviagrícola: sistema que integra os componentes floresta e lavoura, pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais ou perenes) e;

-Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Sistema Agrossilvipastoril: sistema que integra os componentes lavoura, pecuária e floresta, em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área. A componente “lavoura” pode restringir-se (ou não) à fase inicial de implantação do componente florestal.

Na implantação desses sistemas, são identificadas algumas situações distintas: aquela em que a agricultura é introduzida nas áreas de pastagem, as que a pastagem é colocada nas áreas de lavouras de grãos e as que o componente florestal, as árvores, é introduzido na área de pastagem ou de lavoura, seguindo-se com o uso da área para pastagens (BALBINO et al., 2014).

A ILPF pode ser vista como uma solução estratégica para o produtor rural por diversos fatores, como: economia de escopo, diversificação de renda e redução de riscos, aumento da produtividade de forma estável no horizonte temporal e mitigação da vulnerabilidade da produção às mudanças ambientais e volatilidade de preços (TEIXEIRA et al. 2012). Essa estratégia de produção propicia ganhos econômicos, estabilidade da renda do produtor em contrapartida permite maior oferta de emprego e produção o ano todo (grãos, carne, leite, energia, produtos madeireiros e não madeireiros oriundos das árvores). Todos esses fatores indicam que a adoção de

ILPF promove uma maneira inovadora de produção de alimentos, fibras e energia, o que representa diversificação e aumento da renda ao produtor rural (GRISE; BARBOSA; ALCÂNTARA, 2019).

Um dos principais benefícios gerados pelo sistema ILPF é a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo (BALBINO et al., 2012). Além disso, contribuem na reciclagem de nutrientes e na fixação de nitrogênio quando se trabalha com espécies florestais leguminosas, melhora a estrutura do solo por aumentar o teor de carbono, melhora a infiltração da água e a disponibilidade dos nutrientes e incremento na diversidade dos micros e mesorganismos do solo, além do provimento de serviços ecossistêmicos (ALMEIDA et al., 2014; PARRON et al., 2019). Adicionalmente o sistema ILF proporciona menores perdas de água e solo, de forma consistente, e tem elevado potencial em minimizar a erosão hídrica do solo (ZOLIN et al., 2016).

## **2.2 Componentes da ILF e suas contribuições para o sistema**

O uso de sistemas silviagrícolas ou de integração Lavoura-Floresta (ILF) integra várias culturas na mesma área denominadas componentes, que possibilitam a obtenção de produção mais sustentável. Nesse sistema, o foco é a produção de madeira e grãos numa única área, na qual, a espécie arbórea a ser escolhida para ser utilizada deve adaptar-se ao solo e ao clima da região, assim como possuir rápido crescimento (MACEDO et al., 2015; SILVA et al., 2010).

Sistemas de integração proporcionam sinergia entre atividades agrícola, pecuária e florestal, proporcionando a formação de serrapilheira pelas espécies florestais possibilitando valores de respiração basal do solo (RBS) muito próximos entre esses ambientes (OLIVEIRA et al., 2015). A integração entre o componente florestal e o agrícola, também, pode ser denominado de consórcio, contribuindo com a intensificação sustentável dos sistemas de produção (WERNER et al., 2017).

O componente florestal favorece a melhoria do microclima (redução de temperatura de 6-8° C), cobertura e proteção do solo, maior estabilidade da temperatura e umidade relativa do ar (incremento de 3,9%), além da regularização hídrica e a diminuição da intensidade dos ventos na área (PRIMAVESI, 2007; KARVATTE JUNIOR et al., 2016; BALBINO et al., 2011). As árvores apresentam maior capacidade de acúmulo de carbono na sua biomassa vegetal, podendo diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e aumentar os estoques de carbono (CORDEIRO; BALBINO, 2019).

O eucalipto (*Eucalyptus* sp.) é uma espécie arbórea a qual tem sido amplamente utilizada em sistemas integrados de produção com forrageiras, e espécies agrícolas. Esta espécie se adapta nas mais variadas condições climáticas, apresenta rápido crescimento, com boa produção de madeira, disponibilidade de mudas, conhecimentos silvicultural e existência de material genético melhorado (OLIVEIRA NETO; PAIVA, 2010). As vantagens do uso desta espécie vão desde a melhoria dos atributos físicos do solo, assim como o acúmulo de carbono orgânico, principalmente em profundidade (SILVA; SALES; VELOSO, 2016).

O sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth) é outra espécie florestal que pode ser utilizado nos sistemas integrados. Trata-se de uma leguminosa com grande produção de biomassa, fonte de nutrientes e matéria orgânica importantes para o solo, melhorando sua estrutura (MENDES, 2010). Quando inserido em áreas já cultivadas, sua utilização aumenta a concentração de ácidos húmicos, assim como, melhora a composição química do solo ao longo do tempo, aumenta a taxa de infiltração de água no solo e a concentração da fração leve da matéria orgânica do solo (MOS) (SILVA et al., 2014; LIMA et al., 2018).

Os módulos compostos pelas culturas agrícolas se beneficiam da presença de árvores por aproveitar nutrientes que são extraídos pelas árvores de camadas mais profundas do solo através de seu sistema radicular. Assim, nutrientes de camadas profundas do solo são disponibilizados na forma de biomassa através de folhas, flores e frutos (CASTRO et al., 1996; SÁNCHEZ et al., 2003).

Quando culturas, como o milho, são cultivadas nos entre renques de eucalipto, apresentam desenvolvimento superior quando comparado ao sistema convencional (SILVA et al., 2016). O rendimento do milho, por exemplo, no sistema silviagrícola é maior do que o milho em sistema solteiro (PORFIRIO-DA-SILVA et al., 2015).

A inclusão da lavoura dentro da área promove melhoria do solo, e em sua maioria, cultura de grãos como a soja, pela sua alta capacidade de fixação de nitrogênio, gera incrementos na fertilidade da área, o que contribui para boa qualidade do solo através da adubação da lavoura (SERRA et al., 2014). A lavoura é a componente referência para correção, adubação e dimensionamento dos sistemas integrados, ou seja, as áreas dos sistemas ILPF são corrigidas e adubadas de acordo com as demandas da lavoura, em contrapartida, fornece adubos residuais aos demais componentes (WRUCK; BEHLING; LANGE, 2019).

### 2.3 Tecnologia consórcio milho-capim para adoção de sistemas integrados

O consórcio é uma tecnologia milenar com potencial de aumentar os rendimentos das lavouras. O seu uso pode proporcionar aumento de 16-19% de grãos por hectare e gera redução de 19-36% no uso de fertilizantes (LI et al., 2020). Essa tecnologia em conjunto com as culturas em sucessão nos sistemas integrados, permite estabelecer a exploração agropecuária alternando períodos de produção agrícola na mesma área, favorecendo a entrada contínua de matéria orgânica e maior ciclagem de nutrientes (SOARES et al., 2019).

O uso do consórcio do milho com capins, não causa estresse na cultura, de forma que não afeta as concentrações de P, Ca, Mg e S e com o uso da *Urochloa brizantha*, por exemplo, pode fornecer 17-35 g kg<sup>-1</sup> de K, ideal para o crescimento do milho (MATEUS et al., 2020).

No primeiro ano, o sistema integrado não reduz a produção do milho, principalmente quando para produção de silagem em locais como o Sudeste brasileiro, e quando ocorre é devido a destinação de área para cultivo de outras espécies. Além disso, o desenvolvimento de árvores no primeiro ano de consórcio não é afetado pela consorciação (SANTOS et al., 2020).

O uso de plantas de cobertura usadas no consórcio pode promover aumento na concentração de nutrientes do solo pela quantidade de fitomassa acumulada na superfície do solo (ARANTES; CREMON; LUIZ, 2012). Paula et al. (2016), trabalhando com milho solteiro e consorciado com capim tanzânia, obtiveram maior porcentagem de palha com o uso da consorciação.

Dessa forma, o uso dos gêneros *Braquiária* (Syn. *Urochloa*) e *Panicum* (Syn. *Megathyrsus*), por exemplo, podem ser alternativa para a ciclagem de potássio e fósforo em sistema de plantio direto (VIVIAN et al., 2017). Essas gramíneas forrageiras também melhoram as concentrações de formas lábeis do carbono do solo, tanto em camadas superficiais como nas subsuperficiais, inclusive assemelhando-se as concentrações de área de mata (NANZER et al., 2019). Burin (2017) relata que o consórcio do milho com espécies do gênero *Urochloa* e *Megathyrsus* ou o ILPF a partir desses gêneros podem refletir em produtividade, além de melhorar os atributos do solo.

O aumento do estoque de carbono também ocorre quando maiores quantidade de resíduos são depositados na superfície do solo e isso pode ser

proporcionado pelo consórcio (FERREIRA et al., 2018). Adicionalmente, o uso de gramíneas forrageiras por apresentar sistema radicular profundo, pode aumentar a concentração de carbono em profundidade (NANZER et al., 2019; SILVA et al., 2020).

Além disso, o uso de plantas de cobertura também proporciona o equilíbrio biológico do solo favorecendo o desenvolvimento das culturas, além de permitir explorar todo seu potencial genético, refletindo em aumento de produtividade, qualidade e sustentabilidade da produção agrícola (REDIN et al., 2016).

#### **2.4 Qualidade do solo em sistemas integrados**

O conceito de qualidade do solo está relacionado a capacidade de sustentar a produtividade biológica, manter/melhorar a qualidade ambiental, além de contribuir para a saúde das plantas, dos animais e humana (BRADY; WEIL, 2002).

Com isso, a determinação dos indicadores de qualidade do solo é realizada por meio das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, que podem ser medidas para monitorar mudanças no solo, além de relacionar a qualidade do solo com a de outros recursos e determinar tendências na saúde dos solos (KHEYRODIN, 2014). Os teores de fósforo, matéria orgânica e saturação por bases, por exemplo, são bons indicadores da qualidade química do solo (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015).

Os atributos biológicos são indicadores que tem a capacidade de quantificar o nível de desequilíbrio ao qual um determinado ambiente está sujeito, determinando efeitos na qualidade do solo e a sustentabilidade das práticas agrícolas (GOMES et al., 2015). Os microrganismos, responsáveis pelo funcionamento do solo, atuam nos processos de gênese, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação da matéria orgânica e biorremediação de áreas contaminadas por poluentes e agrotóxicos justificando sua importância como indicadores biológicos nas avaliações de qualidade do solo (MENDES; SOUSA; REIS JÚNIOR, 2015). Dentre esses indicadores, a respiração basal e biomassa microbiana são os principais indicadores biológicos, com funções chaves reguladoras para a manutenção da qualidade do solo (SCHLOTTER et al., 2018). Com isso, além dos componentes físicos e químicos do solo, a manutenção da estabilidade do componente biológico é de extrema importância para a saúde do solo (CARDOSO et al., 2013).

Dessa forma, para a escolha dos indicadores selecionados devem cumprir os seguintes critérios: (i) abranger processos do ecossistema e relacionar-se às modelagens orientadas por processos; (ii) integrar processos e propriedades físicas, químicas e biológicas; (iii) serem acessíveis a diversos usuários e aplicáveis a condições de campo; (iv) serem sensíveis a variações de manejo e clima, mas resistentes a flutuações em curto prazo; (v) devem fazer parte de bases de dados de solo já existente e (vi) sua determinação deve ser simples, acurada e de baixo custo (DORAN; PARKIN, 1994).

Em resumo, a escolha desses indicadores vai influenciar a capacidade do solo para realizar a produção de culturas ou funções ambientais (FERNANDES, 2019). Adicionalmente, avaliar a qualidade do solo é fundamental, principalmente quando se trata da produtividade agrícola ou florestal, além dos serviços ambientais do solo (MAIA; PARRON, 2015; FREITAS et al., 2017).

A decomposição de resíduos vegetais oriundos do uso de sistemas integrados, aumenta as concentrações de Ca, Mg e P já nos dois anos após a implantação em comparação com o solo inicial (BONINI et al., 2016). Paes et al. (2020) também observaram aumento do P, K, Ca, Mg e N com sistemas agroflorestais e destacaram ainda que essa melhoria na qualidade do solo foi maior do que em outros sistemas. Ferreira et al. (2018) também relataram o aumento de P, K e CTC do solo no consórcio das culturas com gramíneas forrageiras no sistema silviagrícola.

Oliveira et al. (2015) associam os valores de carbono orgânico (CO) semelhantes entre diferentes áreas ao uso de sistemas integrados. Além disso, o sistema de plantio direto, contribui para uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de 20 Mg ha<sup>-1</sup> C (FERREIRA et al., 2016).

Adicionalmente, o uso do sistema silviagrícola pode proporcionar menor densidade, assemelhando-se a área de mata, a qual apresenta sistema não perturbado, com melhores condições físicas pela presença de folhas e ramos sobre o solo, aumentando o teor de matéria orgânica que ao se decompor, diminui a densidade nas camadas superficial e subsuperficial (NICODEMO; BORGES; SOUZA, 2018). Sales et al. (2018) obtiveram menores densidades do solo com o uso do sistema integrado em comparação com sistemas convencionais, comprovando ser um sistema mais conservacionista.

Os sistemas integrados com uso do consórcio/rotação nas culturas da soja e milho e forrageiras após oito anos podem assemelhar-se a áreas de mata nativa, contribuindo na melhoria e manutenção dos atributos microbiológicos do solo em região de Cerrado (SOUSA et al., 2020). O uso do consórcio de espécies florestais com forrageiras no sistema integrado aumenta as concentrações das substâncias húmicas, carbono ligado aos ácidos fúlvicos (C-FAF) e húmicos (C-FAH) pela deposição de resíduos com alta relação C/N (SILVA et al., 2020).

A qualidade do solo também pode ser avaliada pelo fracionamento físico da MOS que quantifica as alterações provocadas pelo uso ou manejo do solo e pode ser realizada através das alterações na proporção das frações lábeis como o carbono orgânico particulado (COP), assim como, frações que estejam associadas aos minerais (COM), fornecendo informações importantes sobre a sustentabilidade ambiental e sobre a qualidade do solo (MITTON et al., 2017).

Áreas de floresta apresentam valores de COP maior que áreas alteradas por ações antrópicas, de forma que os sistemas de uso em que ocorrem a deposição de resíduos na superfície, contribuem para a manutenção dos valores de COP, principalmente pela decomposição acentuada nessa camada (DORTZBACH et al. 2020; NANZER et al., 2019).

Silva et al. (2020), avaliaram diferentes áreas com um sistema silvipastoril e obtiveram maiores concentrações de COM na área de Cerrado, atribuindo a isso a heterogeneidade de espécies da área, que contribui para a manutenção do carbono das frações lábeis da MOS. Adicionalmente a variedade de espécies de planta da área de mata, com decomposição em velocidades diferentes contribuem para manter a frações lábeis da matéria orgânica, mas em profundidade sistemas integrados apresentam maiores concentrações.

Cheng et al. (2019) destacam que o consórcio de árvores com culturas agrícolas promove aumento nas frações de fósforo inorgânico (Pi) do solo, contribuindo para maior valor de fósforo ligado ao cálcio (P-Ca). O Pi ocorre em frações que incluem P-Al, P-Fe, P-Ca, consideradas formas ativas. O estudo dessas frações prevê respostas das culturas no manejo do solo, sendo utilizado na avaliação sobre o comportamento químico do P nos solos (ABDALA et al., 2015; SUDHAKARAN et al., 2018).

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, D. B.; SILVA, I. R.; VERGUTZ, L. SPARKS, D.L. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils. **Chemosphere**, v.119, p.504-514, 2015.
- ALMEIDA, R. G.; RANGEL, J. H. A.; RODRIGUES, A. C. C.; ALVES, F. V. Sistemas silvipastoris: produção animal com benefícios ambientais. In: CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, 9, 2014. Ilhéus. **Anais eletrônicos...** Ilhéus: disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121659/1/aac-Sistemas.pdf>>. Acesso em: 15 de junho de 2020.
- ARANTES, E. M.; CREMON, C.; LUIZ, M. A. C. Alterações dos atributos químicos do solo cultivado no sistema orgânico com plantio direto sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Agrarian**, v. 5, n. 15, p. 47–54, 2012.
- ARAÚJO, E.F.; AGUIAR, A.S.; BARBOSA, M.V.R; BRITO, W.C.; CORDEIRO, S.A. Rentabilidade de plantios de acácia-australiana e de sistema de Integração lavoura-pecuária-floresta no Sudoeste do Piauí. **Nativa**,v.3, n.4, p. 268–275, 2015.
- 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. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.4, p.309–316, 2015.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A. D.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 0-0, 2011.
- BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2014. p. 12-18.
- BALBINO, L.C.; CORDEIRO, L.A.M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J; GALERANI, P.R.; VILELA, L. Agricultura Sustentável por meio da Integração-Lavoura-Floresta (ILPF). **International Plant Nutrition Institute**, n.38, p.1-18, 2012.
- BAYER, L.B.; BATJES, N.H.; BINDRABAN, P.S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: a review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.137, p.47-58, 2010.
- BONINI, C. DOS S. B.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; HEINRICH, R.; ARANHA, A. S.; SANTANA, E. A. R. DE; MEIRELLES, G. C. Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1695–1698, 2016.
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 388–393, 2015.

- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The Nature and properties of soils**. 13. ed. New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River; 2002.
- BREMAN, H.; KESSLER, J. J. The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semiarid-regions. **European Journal of Agronomy**, v. 7, p. 25–33, 1997.
- BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. ; LAURA, V. A. ; BALBINO, L. C. ; FERREIRA, A. D. . **ILPF - inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. EBOOK. 1. ed. Brasília,DF: Embrapa, 2019. v. 1. 835p.
- BURIN, P. C. Principais forrageiras e taxa de semeadura em integração lavoura pecuária. **Revista Electronica de Veterinaria**, v. 18, n. 9, 2017.
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; BRASIL, E. L.; IWATA, B. de F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**,v.48, v.3, p.304–312, 2013.
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; IWATA, B. de F.; NÓBREGA, J. C. A. . Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**,v. 46, n. 12, p.1681–1689, 2011.
- CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A. dos; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M. de; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. de M.; NOGUEIRA, M. A.O. Soil health: looking for suitable indicators . What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, p. 274–289, 2013.
- CASTRO, C. R. T.; GARCIA, H.; COUTO, L. Sistemas Silvistoris no Brasil: potencialidades e entraves. **Revista Árvore**, Viçosa, v.20, n.4, p.575-582, 1996.
- CHENG, Z.; CHEN, Y.; GALE, W. J.; ZHANG, F. Inorganic Phosphorus Distribution in Soil Aggregates Under Different Cropping Patterns in Northwest China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 157–165, 2019.
- CORDEIRO, L. A. M.; BALBINO, L. C. Políticas de fomento à adoção de Sistemas de Integração Lavoura, Pecuária e Floresta no Brasil. In: **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. [s.l: s.n.]. 2019. Cap. 7, p. 99–115.
- CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 15-43, 2015.
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; CELEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-21.
- DORTZBACH, D.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; SANTOS, O. A. Q. Compartimentos da matéria orgânica do solo em vinhedos altomontanos de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 10677–10691, 2020.
- FERNANDES, F. S. **Indicadores de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo**. 2019. 37 f. - Dissertação (Mestrado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis). Universidade Federal de São Carlos.

FERREIRA, E. A. B.; BUSTAMANTE, M. M. DA C.; RESCK, D. V. S.; FIGUEIREDO, C. C. DE; PINTO, A. DE S.; MALAQUIAS, AND J. V. Carbon Stocks in Compartments of Soil Organic Matter 31 Years after Substitution of Native Cerrado Vegetation by Agroecosystems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–15, 2016.

FERREIRA, J. P.; ANDREOTTI, M.; PASCOALOTO, I. .; COSTA, N. R.; AUGUSTO, J. G. Atributos químicos e físicos de um latossolo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária 1. **Boletim de indústria animal**, v. 75, p. 1–17, 2018.

FREITAS, L. DE; OLIVEIRA, I. A. DE; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, v. 26, n. 1–2, p. 08–25, 2017.

GOMES, S. DA S.; GOMES, M. D. S.; GALLO, A. DE S.; MERCANTE, F. M.; BATISTOTE, M.; SILVA, F. DA. Bioindicadores de qualidade do solo cultivado com milho em sucessão a adubos verdes sob bases agroecológicas. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 114, n. 3, p. 30–37, 2015.

GRISE, M. M.; BARBOSA, C. F.; ALCÂNTARA, P. H. R. de. TT ILPF - construindo capacidades e inovando no setor produtivo do Tocantins e sul do Pará. In: FRANCISCO, P. R. M.; FURTADO, D. A.; FERREIRA, A. C. (Org.). **Ciência, desenvolvimento e inovação na engenharia e agronomia brasileira**. Campina Grande: Epgraf, 2019.

GUALBERTO, A. V. S. **Qualidade química e biológica do solo em sistemas de plantio direto, pastagem e eucalipto no cerrado**. 2018. Dissertação de Mestrado ( Pós-Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.

KARVATTE JUNIOR, N.; KLOSOWSKI, E. S.; ALMEIDA, R. G. DE; MESQUITA, E. E.; OLIVEIRA, C. C. DE; ALVES, F. V. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, n. 12, p. 1933–1941, 2016.

KHEYRODIN, H. Important of soil quality and soil agriculture indicators. *Academia Journal of Agricultural Research*, v.2, n.11 p.231- 238, 2014.

KICHEL, A. N.; COSTA, J.A.A.; ALMEIDA, R.G.; PAULINO, V.T. **Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) - experiências no Brasil**. Boletim da Indústria Animal, v.71, n.1, p.94-105, 2014.

KLUTHCOUSKI, J.; CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; BALBINO, L. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MÜLLER, M. 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. p. 21-33. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

LANA, Â. M. Q.; LANA, R. M. Q.; LEMES, E. M.; REIS, G. L.; MOREIRA, G. H. F. A. Influence of native or exotic trees on soil fertility in decades of silvopastoral system at the Brazilian savannah biome. **Agroforest Syst**, v. 92, 415–424, 2018.

- LEVINSKI-HUF, F.; KLEIN, V. A. Organic matter and physical properties of a red latosol under an integrated crop-livestock-forestry system. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 3, p. 316–322, 2018.
- LI, C.; ZHANG, P.; ZHANG, J.; ZHU, P.; WANG, L. Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 9, p. 1–16, 2020.
- LIMA, H. N. B.; DUBEUX, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; MELLO, A. C. L.; LIRA, M. A.; CUNHA, M. V. Soil attributes of a silvopastoral system in Pernambuco Forest Zone. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 6, n. 1, p. 15–25, 2018.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; GIACOMO, S.G.; PERIN, A. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.565-579, 2011.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **R. Bras. Zootec.**, v.38, p.133-146, 2009 (supl. especial).
- MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, N.; VENTURIN, R. P. Agrossilvicultura do eucalipto. In: SCHUMACHER, M. V. ; VIEIRA, M. (Org.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Santa Maria: U. F. S. M., 2015. p.187-215.
- MAIA, C. M., PARRON, L. M. Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E.B.; BROWN, G.G.; PRADO, R.B. (Eds). **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Embrapa, Brasília, 2015.
- MAPA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Marco referencial: Integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/923530/1/balbino01.pdf>. >Acesso em: 07 de out. 2019.
- MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; COSTA, N. R.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CANTARELLA, H. Corn intercropped with tropical perennial grasses as affected by sidedress nitrogen application rates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 2020.
- MENDES, I. DE C.; SOUSA, D. M. G. DE; REIS JUNIOR, F. B. DOS R. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 185–203, 2015.
- MENDES, M. M. C. **Crescimento de sabiá (Mimosa caesalpiniaefolia Benth.) em resposta à inoculação com rizóbio e fungos micorrízicos arbusculares**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal Rural do Pernambuco, Recife.
- MITTON, R. V.; GALEANO COBOS, J. Y.; BARBOSA, L. R.; HONORATO BORGIO, J. D. Fracionamento físico da matéria orgânica de um Latossolo vermelho distrófico típico pelo método de sonicação. **Scientia Agraria**, 2017.
- NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P. DE; SILVA, EFERSON R. M. DA; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico

total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.18, n. 1, p. 136-145, 2019.

NICODEMO, L. M. F.; BORGES, L. W. B.; SOUZA, M. I. DE. Atributos físicos do solo em quatro sistemas de uso da terra em São Carlos , SP Physical soil attributes in four land use systems at São Carlos County , São Paulo State , Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 2, p. 1–7, 2018.

OLIVEIRA NETO, S.N., PAIVA, H. N. Implantação e manejo do componente arbóreo em sistema agropastoril. In: OLIVEIRA NETO, S. N., VALE, A. B. NACIF, A. P. VILAR, M. B., ASSIS, J. B. (ED). **Sistema agropastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. Viçosa: sociedade de investigação florestais, 2010, p. 15-68.

OLIVEIRA, B. D. S.; CARVALHO, M. A. C. DE; LANGE, A.; WRUCK, F. J.; DALLACORT, R. Atributos biológicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, na Região Amazônica. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 23, n. 5, p. 448–456, 2015.

PAES, É. de C.; DIAS, F. P. M.; FERNANDES, I. O.; PEREIRA, E. G.; LIMA, J. M. de; ALCOFORADO, P. A. U. G.; NÓBREGA, R. S. A.; NÓBREGA, J. C. A. Different Soil Management Systems Promote Improvements in Nutrient Content and Litter Input. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, n. 03, p. 1–11, 2020.

PARRON, L.; GARCIA, J. R.; MOREIRA, J. M. M. Á. P.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. Avaliação de serviços ecossistêmicos em sistemas agrossilvipastoris. **Revista iberoamericana de economía ecológica**, v. 30, n. 1, p. 81–100, 2019.

PAULA, F. L. M. DE; MENEZES, L. F. G. DE; PARIS, W.; RONSANI, R.; HOPPEN, S. M.; CIESCA, J. Silage production and the chemical composition of corn and Grass-Tanzania intercropping. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 3, p. 1607–1616, 2016.

PORFIRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A. DE; MOLETTA, J. L.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J.; OLIVEIRA, E. B. DE. Produtividade do milho em um sistema silviagrícola nos Campos Gerais, PR. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 1, p. 27–32, 2015.

PRIMAVESI, O. A pecuária de corte brasileira e o aquecimento global. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 42 p. (Documentos, 72).

REDIN, M.; GIACOMINI, S.J.; FERREIRA, P.A.A.; ECKHARDT, D.P. Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio. In: Tiecher, T (org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil**: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre- UFRGS, 2016, p. 7-22.

SALES, A.; SILVA, A. R.; ALBERTO, C.; VELOSO, C.; JORGE, E.; CARVALHO, M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 1, p. 1–15, 2018.

SÁNCHEZ, S.; HERNÁNDEZ, M.; SIMÓN, L. Efecto del sistema silvopastoril em La fertilidad edáfica em unidades lecheras de la empresa Nazareno. **Pastosy Forrajes**, v.26, n.2, p.131-136, 2003.

SANTOS, M. V.; FONSECA, D. M. DA; SILVA, L. D. DA; SOUZA, W. F. DE; OLIVEIRA, T. S. DE; FERREIRA, L. R.; OLIVEIRA NETO, S. N. DE; PACIULLO, D. S. C. Integrated crop–forage–forestry for sustainable agricultural systems: productive performance. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 417–427, 2020.

SCHLOTTER, M. NANNIPIERI, P.; SORENSEN, S. J.; VAN ELSAS, J. D. Microbial indicator for soil quality. **Biology Fertility Soils**, v.54, n.1, p.1-10, 2018.

SERRA, A. P.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; FERREIRA, A. D. Fundamentos técnicos para a implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta com eucalipto. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2014. p. 50-72.

SILVA, A. R.; SALES, A.; CARVALHO, E. J. M.; VELOSO, C. A. C. Dinâmica de sistemas integrados de manejo de um solo no desenvolvimento da cultura do milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 4, p. 859–873, 2016.

SILVA, A. S.; SILVA, I. DE F. da; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. de O.; SILVA NETO, L. de F. DA. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 10, p. 1783–1789, 2014.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará. **Agropecuária Técnica**, v. 37, p. 96–104, 2016.

SILVA, J. R. M. DA; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; REZENDE, J. V. O.; BARRETA, P. G. V.; ZUFFO, A. M. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista brasileira de ciências agrárias**, v. 15, n. 2, p. 1–6, 2020.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURTI, N.; ALIVISI, A. M. T.. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.1584-1592, 2010.

SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 474.

SOARES, M. B.; FREDDI, O. DA S.; MATOS, E. DA S.; TAVANTI, R. F. R.; WRUCK, F. J.; LIMA, J. P. DE; MARCHIORO, V.; FRANCHINI, J. C. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. **Catena**, v. 185, p. 1–10, 2020.

SOUSA, H. M.; CORREA, A. R.; SILVA, B. D. E. M.; OLIVEIRA, S. S. DA; CAMPOS, D. T. DA S.; WRUCK, F. J. Dynamics of soil microbiological attributes in Integrated Crop - Livestock Systems in the Cerrado - Amazonônia Ecotone. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 1, p. 9–20, 2020.

- SOUZA, J. F. D.; PERUSSO, R. L. S.; BONINI, C. S. B.; SOUZA, C. T.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; PEDRO, F. G. P. Atributos físicos, matéria orgânica do solo e produção de capim marandu em sistema de Integração lavoura-pecuária-floresta. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 1, p. 51–64, 2019.
- STIEVEN, A. C.; OLIVEIRA, D. A.; SANTOS, J. O.; WRUCK, F. J.; CAMPOS, D. T. da S. Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.9, n.1, p.53-58, 2014.
- SUDHAKARAN S.; PATIL, S. R.; KONDEVILKAR, N. B.; NAIK, R. M.; PHARANDE, A.; KADLAG, A. Effect of 32 year long-term integrated nutrient management on soil p fractions and availability of phosphorus under sorghum-wheat cropping sequence in vertisol. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 4, p. 3410–3416, 2018.
- TEIXEIRA, L. P; MELO, R. A DE C. E; VILELA, L.; BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M. Viabilidade econômica da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF): estudo em Ipameri-GO. **Sociedade e Desenvolvimento Rural on line**, v.6, n. 2, 2012.
- TORRES, J. L. R.; ASSIS, R. L. DE; LOSS, A. **Evolução entre os sistemas de produção agropecuária no Cerrado: convencional, Barreirão, Santa Fé e Integração Lavoura-Pecuária**. Informe Agropecuário, 2018.
- VIVIAN, J. P.; MENEGAT, N.; KAUFMANN, M. R.; SORDI, A.; CERICATO, A. Potencial de Braquiárias e Panicum como plantas de cobertura em sistema de plantio direto. **Unoesc & ciência**, v. 8, n. 2, p. 129–136, 2017.
- WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; FERREIRA, A. S.; SILVA, M. A. DE A. E. Agronomic performance of soybean cultivars in an agroforestry system1. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 3, p. 279–285, 2017.
- WRUCK, F. J.; BEHLING, M.; LANGE, A. Produção da lavoura em sistemas de ILPF. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (Ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. Cap. 21, p. 319-345.
- ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; MATOS, E. DA S.; MAGALHÃES, C. A. DE S.; ALMEIDA, F. T. DE; SOUZA, A. P. DE; MINGOTI, R. Perda de solo e água sob integração lavoura-floresta e em sucessão soja-milho. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1223–1230, 2016.

## CAPÍTULO I

### ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SISTEMAS INTEGRADOS NO CERRADO PIAUIENSE

RESUMO - Sistemas integrados de produção agropecuária empregam tecnologias como a consorciação, sucessão, rotação e plantio direto, onde ocorre a manutenção de resíduos vegetais na superfície. Estes influenciam na eficiência de extração e utilização dos nutrientes, resultando em aumento das produtividades e na melhoria dos atributos do solo. Objetivou-se com a presente pesquisa avaliar a qualidade química e biológica do solo, nutrição e produtividade da soja em sucessão ao consórcio do milho com forrageiras, no cerrado do sudoeste piauiense. Na safra 2016/2017, o milho foi conduzido em cultivo solteiro e em consórcio com as forrageiras Zuri, Massai, Tanzânia, Tamani, Marandu e Ruzizensis. Nas safras 2017/2018 e 2018/2019 foi cultivada soja sobre as mesmas parcelas. Para avaliação dos atributos químicos, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m. Para os atributos biológicos, foi considerada apenas a camada de 0-0,1 m do solo. A avaliação nutricional da soja foi realizada com a coleta de folhas na fase R1 e a produtividade foi mensurada ao final de cada safra (2017/2018 e 2018/2019). Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias agrupadas pelo teste de Scott Knott. As maiores concentrações de potássio no solo foram obtidas na soja após consórcio de milho com Zuri e Massai na camada de 0-0,1 m, na safra de 2017/2018. As áreas com soja cultivada após M+Zuri, Tanzânia, Marandu e Ruzizensis proporcionaram maiores teores de Ca e menores concentrações de Al da camada 0,2-0,4 m. Na safra 2017/2018 as áreas cultivadas com soja após milho solteiro, M+Tamani e Marandu proporcionaram maior respiração basal do solo, ao passo que na safra 2018/2019, as áreas de soja após os consórcios M+Zuri, Tanzânia e Ruzizensis apresentaram os maiores valores. O consórcio do milho com o gênero *Urochloa* influenciam nas substâncias húmicas e carbono do solo, e o consórcio com o gênero *Megathirsus* melhora os atributos químicos e biológicos do solo. O consórcio do milho com forrageiras aumenta a produtividade da soja em 15% quando em sucessão por duas safras.

**Palavras-chave:** *Glycine max*, *Zea mays*, qualidade do solo, plantas de coberura.

## CHAPTER I

### SOIL CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATTRIBUTES AND SOYBEAN PRODUCTIVITY IN INTEGRATED SYSTEMS IN CERRADO PIAUI

ABSTRACT - Integrated agricultural production systems use technologies such as intercropping, succession, rotation and no-till, where plant residues are maintained on the surface. These influence the efficiency of extraction and use of nutrients, resulting in increased productivity and improved soil attributes. The objective of this research was to evaluate the chemical and biological quality of the soil, nutrition and soybean productivity in succession to the corn consortium with forages, in the cerrado of southwest Piauí. In the 2016/2017 harvest, maize was conducted in single cultivation and in consortium with the forage Zuri, Massai, Tanzania, Tamani, Marandu and Ruziziensis. In the 2017/2018 and 2018/2019 crops, soybeans were grown on the same plots. To evaluate the chemical attributes, soil samples were collected in the 0.0-0.1 layers; 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m. For biological attributes, only the 0.0-0.1 m layer of soil was considered. Nutritional assessment of soybeans was carried out with leaf collection in the R1 phase and yield was measured at the end of each harvest (2017/2018 and 2018/2019). The data were submitted to analysis of variance and the means grouped by the Scott Knott test. The highest concentrations of potassium in the soil were obtained in soybeans after corn consortium with Zuri and Massai in the 0-0.1 m layer, in the 2017/2018 harvest. Areas with soybeans grown after M + Zuri, Tanzania, Marandu and Ruziziensis provided higher levels of Ca and lower concentrations of Al in the 0.2-0.4 m layer. In the 2017/2018 harvest, the areas cultivated with soybeans after single corn, M+Tamani and Marandu provided greater basal respiration of the soil, while in the 2018/2019 harvest, the soybean areas after the consortia M+Zuri, Tanzania and Ruziziensis presented the highest values. The consortium of corn with the genus *Urochloa* influences the humic substances and carbon of the soil, and the consortium with the genus *Megathirsus* improves the chemical and biological attributes of the soil. The consortium of corn with forage increases soybean productivity in succession for two harvests.

**Keywords:** *Glycine max*, *Zea mays*, soil quality, cover plants..

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas integrados empregam tecnologias como a consorciação, rotação e plantio direto, em que ocorre a manutenção de resíduos vegetais na superfície, pela palhada acumulada oriunda das plantas de cobertura ou das pastagens e dos restos culturais de lavouras comerciais, somada à ausência de revolvimento do solo. O sistema também proporciona redução da emissão de CO<sub>2</sub> e aumento do estoque de carbono no solo (LOSS et al., 2011; GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2012; MENDONÇA et al., 2013), promove o desenvolvimento da biota e favorece a recuperação ou manutenção das características químicas e físicas do solo em curto, médio e longo prazo (RODRIGUES et al., 2017).

Diversas espécies de plantas de cobertura de solo, principalmente as Poaceae (gramíneas), podem ser utilizadas em sistemas de consórcios com culturas comerciais. As gramíneas, por exemplo, apresentam maior relação C/N e a decomposição dos resíduos sobre o solo é mais lenta. Assim, se por um lado a liberação de nutrientes será mais lenta, por outro, a permanência dos resíduos na superfície do solo por mais tempo aumenta a sua proteção (CASALI et al., 2016). Esses fatores podem contribuir para que os nutrientes possam ser aproveitados pelas culturas subsequentes em diferentes quantidades, dependendo do tempo de decomposição, temperatura ambiente, umidade do solo, manejo e fertilidade do solo (SAKREZENSKI et al., 2018).

Ribeiro; Souza; Ceccon (2020) verificaram que o consórcio do milho com *Urochloa ruziziensis* usado em rotação com a soja, proporcionou aumento dos atributos químicos do solo (CTC, V%, K, Ca, Mg), devido à maior quantidade de cobertura e, conseqüentemente, a maior disponibilidade de nutrientes. Ferreira et al. (2018), também verificaram aumento nas concentrações de P, K, MO e na CTC do solo cultivado com milho consorciado com capim-tanzânia.

Os sistemas integrados de produção agropecuária, com o uso de soja/milho precedidos por dois anos de pastagem contribuem com incrementos de mais de 50% do carbono da biomassa microbiana (CBM) em comparação com as práticas de cultivo convencionais, além de proporcionarem elevada respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico ( $qCO_2$ ) (SOUSA et al., 2020).

A melhoria da qualidade do solo por meio de práticas adequadas de manejo, como o consórcio, permite que esse recurso possa exercer várias funções dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema. Dessa forma, os resíduos culturais

deixados por plantas de cobertura no solo, somados aos resíduos das culturas comerciais promovem a recuperação, manutenção e/ou melhoria das propriedades químicas e biológicas do solo (DORAN; PARKIN, 1994; LUIZÃO, 2007; CASALI et al., 2016) e da produtividade das culturas em sucessão (TORRES; PEREIRA, 2014).

No Cerrado do Piauí, há poucos trabalhos estudando a dinâmica do uso do consórcio e sucessão de culturas e seus impactos na qualidade do solo e rendimento das culturas (SATO et al., 2012; PACHECO et al., 2013; PACHECO et al., 2016; SOUSA et al., 2017;). Assim, espera-se que possa determinar quais consórcios e/ou forrageiras melhor atendam às necessidades do sistema solo-planta e, conseqüentemente, do produtor, para garantir o sucesso do sistema, considerando as diversidades edafoclimáticas da região.

Com isso, o objetivo desse estudo foi avaliar a influência dos resíduos da cultura do milho consorciado com gramíneas forrageiras sobre os atributos químicos e biológicos do solo, o estado nutricional e a produtividade da soja cultivada em sucessão no Cerrado piauiense.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

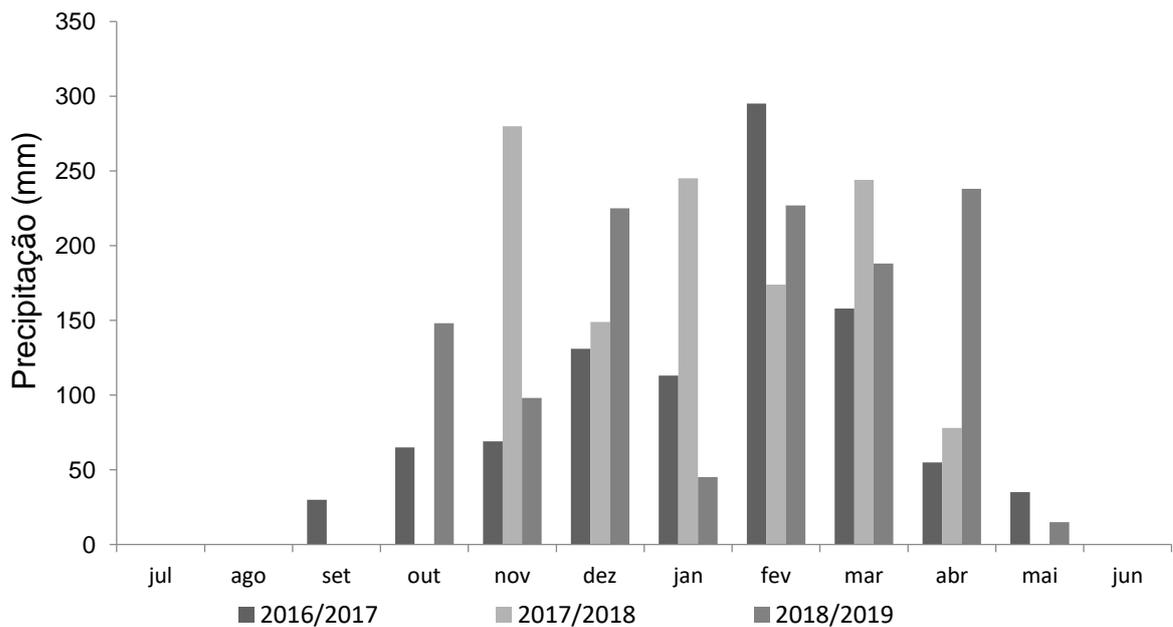
### 2.1 Local e informações da área experimental

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Vô Desidério, situada na Serra do Quilombo, em Bom Jesus, Piauí (9°16'20"S; 44°44'56"O; 628 m de altitude), em área com declividade de 0,2%. De acordo com Pragana et al. (2016), o solo da região é classificado como LATOSSOLOS AMARELOS Distróficos. Antes da instalação do experimento foram coletadas amostras de solo na área, e posteriormente enviados para análise em laboratório utilizando a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) (Tabela 1). O clima da área é do tipo Aw (tropical, com inverno seco) de acordo com Köppen; Geiger (1928), a temperatura média é de 26,7°C e a pluviosidade média de 1.002 mm (INMET, 2018). Na Figura 1, estão ilustrados os dados de precipitação pluvial durante o período de condução do experimento, com total de 951, 1.170 e 1.184 mm nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente.

**Tabela 1.** Atributos químicos e granulometria do solo antes da implantação do experimento, Bom Jesus, 2016.

Camadas	pH (H <sub>2</sub> O)	V	H+Al	Al	Ca	Mg	SB	CTC
m		%	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					
0-0,2	5,5	36	5,7	0,1	2,0	0,8	3,2	9,0
0,2-0,4	5,2	29	4,2	0,2	1,0	0,3	1,7	5,8
	P	K	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	m	M.O.	Argila	Silte	Areia
m	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	%	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
0-0,2	56,5	0,45	16,5	3	20	223	5	772
0,2-0,4	19,4	0,31	17,1	10	12	234	20	746

A fazenda realiza o cultivo sob sistema de plantio direto há quinze anos cultivando soja e milho, na qual realiza incorporação de calcário a cada seis anos. Na safra 2016/2017 foram implantados três renques de espécies florestais com dois entre renques (área de cultivo agrícola) numa área já cultivada anteriormente. Em um dos entre renques, foi implantado o experimento com cultivo de milho consorciado com forrageiras no primeiro ano e cultivo de soja em dois anos consecutivos.



**Figura 1.** Valores médios da precipitação pluvial das safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019.

Fonte: Fazenda Colorado, Bom Jesus, PI.

Na safra 2016/2017, o experimento com o milho consorciado foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, num total de sete tratamentos e quatro repetições: milho + *Megathyrus maximus* (M+Massai); milho + *Megathyrus maximus* (M+Tamani); milho + *Megathyrus maximus* (M+Zuri); milho + *Megathyrus maximus* (M+Tanzania); milho + *Urochloa brizantha* (M+Marandu); milho + *Urochloa ruziziensis* (M+Ruziziensis) e milho solteiro (M). O híbrido simples Pioneer 30F35<sup>®</sup> foi cultivado em espaçamento de 0,5 m entre fileiras e população de 66.000 plantas ha<sup>-1</sup>. A adubação utilizada na semeadura foi de 500 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 08-24-12 e 280 kg de uréia em cobertura. A adubação utilizada é padrão da Fazenda, baseada nas recomendações de Sousa e Lobato (2004).

A área das parcelas experimentais foi de 8,5 x 10 m, e a taxa de semeadura adotada para as forrageiras do gênero *Megathyrus* (Massai, Tamani, Tanzânia e Zuri) foi de 3 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis, enquanto que para as forrageiras da espécie *Urochoa brizantha* cv. Marandú e *Urochoa ruziziensis*, foram de 6 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis. As taxas de semeadura utilizadas foram determinadas pela relação do ponto de valor cultural ha<sup>-1</sup> com o valor cultural do lote de cada forrageira, conforme Dias-Filho (2012), as quais foram realizadas a lanço imediatamente anterior ao plantio da cultura do milho.

Na safra 2017/2018, nas mesmas parcelas em que foram cultivados o milho consorciado e solteiro, foi cultivado soja, empregando-se o espaçamento de 0,5 m entre fileiras, com população de 200.000 plantas ha<sup>-1</sup>. A cultivar empregada foi a M8808IPRO. Na semeadura, as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*. A adubação utilizada na semeadura foi de 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 10-30-10, 150 kg ha<sup>-1</sup> de KCl aplicados em cobertura 30 dias após o plantio. A adubação utilizada é padrão da Fazenda, baseada nas recomendações de Sousa e Lobato (2004).

Para essa safra, os tratamentos em sucessão com a soja ficaram identificados da seguinte forma: M/S1.; M+Massai/S1; M+Tamani/S1; M+Zuri/S1; M+Tanzânia/S1; M+Marandu/S1 e M+Ruzizensis/S1.

Para o controle fitossanitário foram realizadas duas aplicações do fungicida Propiconazol + Difenconazol (Score Flexi<sup>®</sup> / 150 ml ha<sup>-1</sup>), sendo uma aos 30 dias após a emergência (DAE) e outra no intervalo de 20 dias após a primeira aplicação. Aos 70 DAE, foi aplicado fungicida Azoxistrobina + Ciproconazol (Priori Xtra<sup>®</sup>/ 300 ml ha<sup>-1</sup>) e Mancozebe (Unizeb God), com uma segunda aplicação de ambos 20 dias após.

Para a safra 2018/2019, também foi cultivada a soja (cultivar M8644IPRO) nas mesmas parcelas. Contudo, antecipadamente ao plantio, foram aplicadas três toneladas de calcário (85% PRNT, >12% MgO) na área. O espaçamento, a população de plantas e a inoculação das sementes de soja com *Bradyrhizobium japonicum* foram semelhantes ao ano anterior. A adubação utilizada na semeadura foi de 400 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 170 kg ha<sup>-1</sup> de KCl em cobertura, seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). Os tratamentos em sucessão com a soja ficaram identificados da seguinte forma: M/S2; M+Massai/S2; M+Tamani/S2; M+Zuri/S2; M+Tanzânia/S2; M+Marandu/S2 e M+Ruzizensis/S2.

Para o controle fitossanitário realizou-se o tratamento de sementes com o inseticida Cruiser<sup>®</sup> e o fungicida Maxim XL<sup>®</sup>. Foi realizada uma aplicação do fungicida Propiconazol+Difenconazol (Score Flexi<sup>®</sup> / 150 ml ha<sup>-1</sup>) e uma segunda aplicação 20 dias após, com o fungicida Elatus<sup>®</sup> (200g) e 300 ml de Cypress 400 EC<sup>®</sup>. Foi realizada uma terceira aplicação utilizando 200g do fungicida Elatus<sup>®</sup> com 1 L de Bravonil<sup>®</sup> e uma quarta aplicação, com 300 ml de Cypress 400 EC<sup>®</sup> e 1 L de Bravonil<sup>®</sup>, com intervalo de 15 dias entre cada aplicação.

Em cada parcela, foram coletadas amostras de solo para avaliação dos atributos químicos e biológicos do solo. A amostragem do solo, em cada área estudada, foi realizada com a coleta de quatro amostras simples para formar uma composta, sempre após a colheita da soja, nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Para análise das variáveis químicas, as amostras foram coletadas nas camadas: 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m. Após coletado, o solo foi seco ao ar e peneirado em peneira de malha de 2 mm para a realização das análises posteriores. Os atributos químicos do solo mensurados foram: pH, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e carbono orgânico total (COT) (TEIXEIRA et al., 2017), além de substâncias húmicas: carbono na fração ácido fúlvico (C-FAF), carbono na fração ácido húmico (C-FAH), carbono na fração humina (C-HUM) e relação na fração ácido húmico ácido fúlvico (AH/AF) (BENITES et al., 2017).

Para os atributos biológicos do solo, a coleta foi realizada somente na camada de 0-0,1 m. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob refrigeração por 15 dias, antes da realização das análises, mensurando-se o carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana, conforme método de irradiação-extração (FERREIRA; CAMARGO; VIDOR, 1999); respiração basal do solo (RBS), por meio da quantificação de CO<sub>2</sub> liberado após incubação em condições aeróbias (ALEF, 1995); quociente metabólico ( $qCO_2$ ), calculado pela relação entre a respiração basal do solo (em mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), o C da biomassa microbiana (em mg C g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) (SILVA et al., 2007); e quociente microbiano ( $qMic$ ), a partir da relação  $Cmic/COT$  (SPARLING, 1992).

Para avaliar o estado nutricional da soja, foram coletadas folhas recém-expandidas com pecíolo, correspondentes ao 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> trifólio a partir da haste principal, no período entre o início da floração (R1) e o pleno florescimento (R2) (TECNOLOGIAS..., 2013). As produtividades do milho (safra 2016/2017) e da soja (safras 2017/2018 e 2018/2019) foram mensuradas nas parcelas coletando-se manualmente duas linhas centrais de dois metros, com posterior conversão para kg ha<sup>-1</sup>. Para a definição da produtividade das forrageiras, após a dessecação, anteriormente ao plantio da soja, coletou-se a parte aérea com o auxílio de uma moldura de 0,25 m<sup>2</sup>, com posterior secagem em estufa de circulação de ar forçada a 60° C por 72h, pesagem e conversão para kg ha<sup>-1</sup>.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com auxílio do software SISVAR versão 5.7 (FERREIRA, 2019). As médias foram agrupadas pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Resultados**

##### **3.1.1 Atributos químicos do solo**

Após a primeira safra de soja (2017/2018) foram observadas, na camada superficial (0-0,1 m), maiores concentrações de K para os tratamentos com soja cultivada sob o consórcio de M+Massai/S1 e M+Zuri/S1. O consórcio M+Zuri/S1 também resultou em maior valor de K na camada de 0,2-0,4 m. Os tratamentos M+Massai/S1, M+Tamani/S1, M+ Zuri/S1 e M+Ruziensiensis/S1 resultaram em maiores concentrações de Mg e maiores valores de V, na camada de 0-0,1 m (Tabela 2).

O tratamento M+Tamani/S1 proporcionou menor concentração de H+Al na camada de 0,1-0,20 m. Para a camada 0,2-0,4 m, os tratamentos M/S1, M+Tamani/S1, M+Zuri/S1, M+Marandu/S1 e M+Ruziensiensis/S1 com a soja em sucessão apresentaram maiores valores de SB. O mesmo comportamento foi observado para o V, cujo valor foi estatisticamente igual ao milho + Tanzânia (Tabela 2). Para estas camadas subsuperficiais, o valor encontrado no tratamento de milho solteiro não diferiu dos demais.

Na safra 2018/2019 (S2), não houve diferença nas concentrações de P nas camadas 0-0,1 e 0,2-0,4 m entre os tratamentos. Para a camada 0,1-0,2 m, os tratamentos M/S2, M+Tamani/S2, M+Zuri/S2, M+Marandu/S2 e M+Ruziensiensis/S2 apresentaram as maiores concentrações de P (Tabela 3). Na camada 0-0,1 m, as maiores concentrações K no solo foram observadas nos tratamentos M+Ruziensiensis/S2, M+Marandu/S2, o M+Zuri/S2, M+Massai/S2 e M/S2. Na camada 0,1-0,2 m, os tratamentos M/S2, M+Tamani/S2, M+Marandu/S2 e M+Ruziensiensis/S2 apresentaram as maiores concentrações de K (Tabela 3).

**Tabela 2.** Atributos químicos do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2017/2018, nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, em Bom Jesus, PI.

Tratamento	pH <sub>CaCl2</sub>	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	C.T.C.	V
	mg dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>							%	
Safra 2017/2018										
0-0,1 m										
M/S1	4,54	63,43	0,29 b <sup>1</sup>	2,82	0,64 b	0,12	4,29	3,75	8,18	46 b
M+Massai/S1	4,64	64,42	0,37 a	3,28	0,89 a	0,10	4,09	4,55	8,56	57 a
M+Tamani/S1	4,56	56,39	0,30 b	3,22	0,82 a	0,10	3,33	4,34	7,70	56 a
M+Zuri/S1	4,72	70,22	0,39 a	3,14	0,78 a	0,13	4,10	4,31	8,42	52 a
M+Tanzânia/S1	4,36	68,01	0,26 b	2,68	0,57 b	0,21	4,43	3,72	7,75	48 b
M+Marandu/S1	4,54	65,54	0,29 b	3,09	0,72 b	0,11	4,33	4,11	8,44	49 b
M+Ruziziensis/S1	4,82	71,15	0,26 b	3,66	0,84 a	0,06	3,31	4,66	8,38	56 a
Teste F	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	*
CV (%)	6,0	19,4	14,0	18,0	15,7	55,1	16,8	14,0	9,6	10,6
0,1-0,2 m										
M/S1	4,15	68,70	0,24	2,09	0,50	0,47	4,20 a	2,83	7,05	40
M+Massai/S1	4,15	65,24	0,29	2,44	0,55	0,47	4,12 a	3,28	7,41	44
M+Tamani/S1	4,36	64,16	0,30	2,54	0,63	0,31	3,45 b	3,47	6,77	52
M+Zuri/S1	4,18	64,21	0,40	2,84	0,58	0,44	4,14 a	3,82	7,96	47
M+Tanzânia/S1	4,01	68,71	0,26	2,09	0,48	0,56	4,18 a	2,81	7,00	40
M+Marandu/S1	4,16	60,06	0,31	2,36	0,53	0,42	4,15 a	3,30	7,24	46
M+Ruziziensis/S1	4,21	83,84	0,26	2,45	0,60	0,46	4,34 a	3,31	7,45	44
Teste F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
CV (%)	3,9	23,0	23,0	24,1	13,4	47,1	8,6	19,1	8,3	12,3
0,2-0,4 m										
M/S1	3,86	14,59	0,17 b	1,26	0,38	0,61	3,70	1,75 a	5,49	33 a
M+Massai/S1	3,80	16,61	0,15 c	1,46	0,42	0,58	3,81	1,45 c	5,82	26 b
M+Tamani/S1	3,86	15,48	0,14 c	1,28	0,44	0,52	3,51	1,78 a	5,47	33 a
M+Zuri/S1	3,81	7,68	0,21 a	1,37	0,42	0,61	3,43	1,87 a	5,42	34 a
M+Tanzânia/S1	3,82	21,43	0,12 d	1,12	0,39	0,58	3,71	1,64 b	5,47	30 a
M+Marandu/S1	3,88	18,13	0,17 b	1,29	0,43	0,51	3,36	1,89 a	5,48	34 a
M+Ruziziensis/S1	3,92	18,73	0,16 b	1,29	0,45	0,53	3,76	1,74 a	5,68	31 a
Teste F	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
CV (%)	1,3	62,9	9,8	36,6	7,6	25,3	10,9	6,8	12,8	9,3

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupamento, de acordo com o teste Scott-knott a 5% de probabilidade.

Os valores de Ca diferiram entre os tratamentos somente na camada 0,2-0,4 m, com maiores concentrações nos tratamentos M+Zuri/S2, M+Tanzânia/S2, M+Marandu/S2 e M+Ruziziensis/S2. Estes tratamentos também responderam pelas menores concentrações de Al. Já para a camada 0,1-0,2 m, a concentração de Al foi maior no tratamento M+Massai/S2 (Tabela 3).

**Tabela 3.** Atributos químicos do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2018/2019, nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, em Bom Jesus, PI.

Tratamento	pH <sub>CaCl2</sub>	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	C. T. C.	V
		mg dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>							%
<b>Safra 2018/2019</b>										
<b>0-0,1 m</b>										
M/S2	5,06	54,25	0,39 a <sup>1</sup>	3,58	0,80	0,04	2,62	4,77	7,39	66
M+Massai/S2	4,94	57,50	0,45 a	3,43	0,95	0,11	3,11	4,83	7,51	64
M+Tamani/S2	5,21	54,69	0,26 b	3,47	1,16	0,07	2,24	5,33	7,14	76
M+Zuri/S2	4,67	57,50	0,38 a	3,09	0,90	0,02	2,35	4,35	6,70	65
M+Tanzânia/S2	4,99	51,80	0,20 b	3,25	0,92	0,04	3,31	4,63	7,69	61
M+Marandu/S2	5,14	55,85	0,38 a	3,20	0,99	0,03	3,28	4,57	7,85	59
M+Ruzizensis/S2	5,28	72,15	0,44 a	3,34	1,08	0,02	2,59	4,59	7,46	62
Teste F	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	6,3	20,6	20,8	18,0	25,9	111,9	28,2	11,4	13,9	14,8
<b>0,1-0,2 m</b>										
M/S2	4,17	41,41 a	0,17 a	1,55	0,37	0,66 b	3,65	2,10 a	5,75	36 a
M+Massai/S2	4,29	21,14 b	0,16 b	0,96	0,29	0,98 a	3,48	1,42 b	5,21	27 b
M+Tamani/S2	4,29	36,23 a	0,19 a	1,38	0,37	0,49 b	3,49	1,78 a	5,45	34 a
M+Zuri/S2	4,26	39,92 a	0,12 b	1,35	0,35	0,49 b	3,31	1,60 b	5,52	27 b
M+Tanzânia/S2	4,21	16,86 b	0,12 b	1,12	0,32	0,52 b	3,35	1,40 b	4,61	30 b
M+Marandu/S2	4,27	36,43 a	0,21 a	1,47	0,32	0,30 b	4,26	2,00 a	6,26	34 a
M+Ruzizensis/S2	4,26	54,56 a	0,21 a	1,20	0,31	0,41 b	3,82	1,59 b	5,54	29 b
Teste F	ns	*	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*
CV (%)	5,6	19,6	26,8	24,0	20,2	29,6	16,2	14,6	9,1	11,3
<b>0,2-0,4 m</b>										
M/S2	4,24	6,31	0,19	0,74 b	0,39	0,61 a	2,47	1,46 a	3,80	36 a
M+Massai/S2	4,08	8,39	0,12	0,68 b	0,27	0,85 a	2,56	1,12 b	3,64	29 b
M+Tamani/S2	4,12	5,86	0,13	0,66 b	0,22	0,61 a	2,39	1,02 b	3,21	32 b
M+Zuri/S2	4,17	7,25	0,09	0,86 a	0,26	0,49 b	2,16	1,21 b	3,37	34 a
M+Tanzânia/S2	4,17	7,41	0,11	0,80 a	0,30	0,47 b	2,57	1,33 a	3,30	38 a
M+Marandu/S2	4,25	8,75	0,14	0,96 a	0,26	0,34 b	2,93	1,36 a	4,30	32 b
M+Ruzizensis/S2	4,22	15,42	0,15	0,88 a	0,23	0,37 b	2,61	1,26 a	3,88	33 b
Teste F	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	*	ns	*
CV (%)	3,8	52,6	40,5	15,4	41,5	31,8	18,4	12,9	14,5	5,9

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupamento, de acordo com o teste Scott-knott a 5% de probabilidade.

Na camada 0,1-0,2 m, os tratamentos M/S2, M+Tamani/S2 e M+Marandu/S2 resultaram em maiores valores de SB e V. Na camada 0,2-0,4 m as maiores concentrações de SB foram observadas nos tratamentos M/S2, M+Tanzânia/S2, M+Marandu/S2 e M+Ruzizensis/S2 (Tabela 3). Com exceção do M+Tanzânia, esses resultados repetiram o mesmo comportamento de SB observado na camada 0,2-0,4 m, na safra 2017/2018 (Tabela 2).

Os maiores valores de V foram constatados nos tratamentos M/S2, M+Zuri/S2 e M+Tanzânia/S, na camada de 0,2-0,4 m (Tabela 3). Resultados semelhantes foram observados na safra 2017/2018 (Tabela 2).

### 3.1.2 Atributos biológicos do solo

O uso de diferentes forrageiras em consórcio com o milho e em sucessão com a soja na safra 2017/2018 não alterou as concentrações de N e C da biomassa microbiana. Na safra 2018/2019, por sua vez, houve aumento na concentração de N da biomassa microbiana no tratamento M+Zuri/S2 (3,58 mg g<sup>-1</sup>), quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 4).

**Tabela 4.** Atributos biológicos do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2017/2018 e 2018/2019, Bom Jesus, PI.

Tratamento	NBM	CBM	RBS	qCO <sub>2</sub>	qMic
	---- mg g <sup>-1</sup> ----	-----mg CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> -----	-----mg CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> -----	-----mg CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> -----	%
<b>2017/2018</b>					
M/S1	2,95	261,63	18,69 a <sup>1</sup>	0,07 a	1,56 b
M+Massai/S1	3,59	246,74	9,96 b	0,04 b	1,65 b
M+Tamani/S1	3,02	251,34	15,20 a	0,06 a	1,69 b
M+Zuri/S1	3,05	306,26	11,79 b	0,04 b	2,11 a
M+Tanzânia/S1	2,51	250,73	8,86 b	0,04 b	1,98 a
M+Marandu/S1	2,83	244,71	18,89 a	0,08 a	1,27 b
M+Ruziziensis/S1	3,84	300,50	12,01 b	0,04 b	1,88 a
Teste F	ns	ns	*	*	*
CV (%)	24,6	20,6	23,3	29,2	17,1
<b>2018/2019</b>					
M/S2	2,00 b	135,27	15,72 c	0,12 b	0,78 a
M+Massai/S2	1,17 c	138,67	16,33 c	0,12 b	0,83 a
M+Tamani/S2	1,46 c	137,67	22,12 b	0,16 b	0,90 a
M+Zuri/S2	3,58 a	153,38	25,65 a	0,18 b	1,06 a
M+Tanzânia/S2	1,70 b	75,85	26,02 a	0,42 a	0,46 b
M+Marandu/S2	1,98 b	105,71	23,88 b	0,42 a	0,49 b
M+Ruziziensis/S2	2,20 b	106,02	26,63 a	0,25 b	0,60 b
Teste F	*	ns	*	*	*
CV (%)	15,9	30,2	8,9	61,1	31,1

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, de acordo com o teste Scott-knott a 5% de probabilidade.

Na safra 2017/2018, a respiração basal do solo (RBS) foi maior nos tratamentos M/S1, M+Tamani/S1 e M+Marandu/S1, os quais formaram um grupo distinto dos demais tratamentos. Esses tratamentos também proporcionaram maiores valores de qCO<sub>2</sub>. De maneira geral, a RBS apresentou maiores valores na safra 2018/2019 em todos os tratamentos, com exceção do M/S2. Já na safra

2018/2019, os tratamentos M+Zuri/S2, M+Tanzânia/S2 e M+Ruziziensis/S2 apresentaram maiores valores de RBS, enquanto que para o  $qCO_2$ , os tratamentos M+Tanzânia/S2 e M+Marandu/S2 se destacaram dos demais.

Com relação ao quociente microbiano ( $qMic$ ), na safra 2017/2018 houve a formação de dois grupos distintos, sendo que o M+Tanzânia/S1, M+Zuri/S1 e M+Ruziziensis/S1 foram superiores aos demais tratamentos. Na safra 2018/2019, os tratamentos M+Zuri/S2, o M+Massai/S2 e M+Tamani/S2, além do M/S2, apresentaram maior quociente microbiano.

### **3.1.3 Substâncias húmicas**

As concentrações de carbono orgânico total (COT) não foram influenciadas pelos tratamentos na safra 2017/2018 nas camadas avaliadas (Tabela 5). Já na safra 2018/2019, o COT foi superior com o emprego dos tratamentos M+Marandu/S2 na camada de 0-0,1 m. Na camada 0,1-0,2 m, além do tratamento M+Marandu/S2, os tratamentos M+Tanzânia/S2 e M+Ruziziensis/S2 proporcionaram maiores concentrações de COT. Na camada 0,2-0,4 m não houve diferença entre os tratamentos.

O C-FAF e a relação AH/FAF não sofreram influência dos tratamentos avaliados, em nenhuma das camadas do solo das safras 2017/2018 e 2018/2019. Na safra 2017/2018, a maior concentração de C-FAH ( $0,38 \text{ dag kg}^{-1}$ ) na camada 0-0,1 m foi observada no tratamento M+Marandu/S1. Na safra 2018/2019, as maiores concentrações de C-FAH na camada 0-0,1 m ocorreram nos tratamentos M/S2, M+Massai/S2, M+Tanzânia/S2 e M+Ruziziensis/S2. Não houve diferença estatística nos teores de C-FAH entre os tratamentos nas demais camadas.

**Tabela 5.** Carbono orgânico total e carbono das substâncias húmicas em diferentes camadas do solo sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Bom Jesus, PI.

Tratamento	-----dag kg <sup>-1</sup> -----					-----dag kg <sup>-1</sup> -----					-----dag kg <sup>-1</sup> -----				
	COT	C-FAF	C-FAH	C-HUM	AH/AF	COT	C-FAF	C-FAH	C-HUM	AH/AF	COT	C-FAF	C-FAH	C-HUM	AH/AF
<b>2017/2018</b>															
	----- 0-0,1 m -----					----- 0,1-0,2 m -----					----- 0,2-0,4 m -----				
M/S1	1,68	0,49	0,30 b <sup>1</sup>	0,90	0,60	1,46	0,42	0,21	0,83	0,50	1,00	0,33	0,12	0,56	0,36
M+Massai/S1	1,54	0,44	0,30 b	0,80	0,69	1,42	0,38	0,21	0,83	0,54	1,00	0,30	0,11	0,59	0,34
M+Tamani/S1	1,49	0,45	0,24 b	0,80	0,54	1,32	0,39	0,16	0,76	0,43	0,99	0,31	0,09	0,59	0,30
M+Zuri/S1	1,45	0,48	0,29 b	0,67	0,60	1,43	0,44	0,19	0,80	0,46	0,99	0,30	0,09	0,60	0,29
M+Tanzânia/S1	1,55	0,44	0,28 b	0,83	0,65	1,44	0,41	0,13	0,90	0,31	0,99	0,30	0,11	0,59	0,36
M+Marandu/S1	1,65	0,53	0,38 a	0,74	0,71	1,48	0,40	0,21	0,88	0,54	1,00	0,28	0,10	0,48	0,56
M+Ruziziensis/S1	1,59	0,46	0,29 b	0,83	0,62	1,37	0,37	0,17	0,83	0,50	1,00	0,32	0,10	0,57	0,33
Teste F	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	6,4	12,6	11,5	16,4	13,2	11,8	14,4	25,1	14,3	31,3	10,6	12,8	36,2	12,8	56,3
<b>2018/2019</b>															
M/S2	1,75 b	0,34	0,47 a	0,95 b	1,41	1,11 b	0,24	0,27	0,59 b	1,22	0,78	0,25	0,10	0,43 b	0,40
M+Massai/S2	1,69 b	0,32	0,45 a	0,92 b	1,45	1,02 b	0,26	0,18	0,57 b	0,69	0,83	0,26	0,08	0,49 b	0,31
M+Tamani/S2	1,53 c	0,33	0,34 b	0,86 b	1,08	0,99 b	0,25	0,20	0,53 b	0,82	0,73	0,21	0,11	0,41 b	0,51
M+Zuri/S2	1,46 c	0,29	0,37 b	0,79 b	1,29	1,04 b	0,22	0,23	0,60 b	1,04	0,77	0,21	0,10	0,46 b	0,46
M+Tanzânia/S2	1,64 b	0,35	0,43 a	0,76 b	1,21	1,20 a	0,30	0,19	0,71 a	0,68	0,81	0,20	0,14	0,47 b	0,89
M+Marandu/S2	2,17 a	0,49	0,31 b	1,36 a	0,77	1,43 a	0,29	0,27	0,87 a	0,93	0,93	0,23	0,15	0,55 a	0,63
M+Ruziziensis/S2	1,76 b	0,37	0,41 a	0,97 b	1,11	1,22 a	0,21	0,22	0,79 a	1,18	0,93	0,23	0,12	0,58 a	0,52
Teste F	*	ns	*	*	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV (%)	8,0	33,5	17,5	16,9	24,0	14,0	20,6	24,0	19,4	46,6	12,5	18,0	32,8	14,9	59,8

COT=carbono orgânico total; FAF=carbono na fração ácido fúlvico; FAH=carbono na fração ácido húmico; HUM= carbono na fração húmica; AH/AF=relação na fração ácido húmico ácido fúlvico.

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupamento, de acordo com o teste Scott-knott a 5% de probabilidade.

Para o C-HUM, houve diferenças entre os tratamentos na safra de soja 2018/2019. A maior concentração ( $1,36 \text{ dag kg}^{-1}$ ) foi obtida no tratamento M+Marandu/S2, na camada 0-0,1 m. Na camada de 0,1-0,2 m, além do tratamento M+Marandu/S2, os tratamentos M+Tanzânia/S2 e M+Ruziensesis/S2 apresentaram maiores valores. Para a camada 0,2-0,4 m, as maiores concentrações de C-HUM foram verificadas nos tratamentos M+Marandu/S2 ( $0,55 \text{ dag kg}^{-1}$ ) e M+Ruziensesis/S2 ( $0,58 \text{ dag kg}^{-1}$ ).

#### **3.1.4 Diagnose foliar**

Na safra 2017/2018 os teores de N na folha diagnóstica da soja variaram de 36,3 a 43,2  $\text{g kg}^{-1}$ . Os maiores valores foram verificados no tratamento M/S1, M+Massai/S1, M+Zuri/S1 e M+Ruziensesis/S1. Na safra 2018/2019 não houve diferença significativa nos teores de N entre os tratamentos (Tabela 6).

Na safra 2017/2018, os teores de P variaram de 3,7 a 4,3  $\text{g kg}^{-1}$ , enquanto os teores de K variaram de 27,3 a 33,3  $\text{g kg}^{-1}$ . Para estes dois nutrientes, os maiores valores foram obtidos com o tratamento M+Tanzânia/S1. Entretanto, na safra 2018/2019, não houve efeito significativo dos tratamentos para estas variáveis (Tabela 6). Quanto ao Ca e Mg não foram verificadas diferenças entre os tratamentos, na safra 2017/2018. Já para a safra 2018/2019, os teores de Ca foram maiores nos tratamentos M+Massai/S2 ( $8,1 \text{ g kg}^{-1}$ ), M+Tanzânia/S2 ( $8,3 \text{ g kg}^{-1}$ ) e M+Marandu/S2 ( $8,2 \text{ g kg}^{-1}$ ). Os teores de S foram superiores na safra 2017/2018 nos tratamentos M+Tanzânia/S1 ( $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ ) e M+Marandu/S1 ( $2,5 \text{ g kg}^{-1}$ ). Na safra 2018/2019, não houve diferença entre os tratamentos para este macronutriente (Tabela 6).

Os micronutrientes B, Cu, Fe e Mn na folha diagnóstica não foram influenciados pelos tratamentos nas duas safras avaliadas. O Zn, por sua vez, apresentou maiores valores na safra 2018/2019, nos tratamentos M+Massai/S2 e M+Tanzânia/S2 (93 e 97  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente) (Tabela 6).

**Tabela 6.** Diagnóstico foliar em plantas de soja cultivadas em sucessão ao milho solteiro e consorciado com forrageiras, nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Bom Jesus, PI.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g kg <sup>-1</sup> -----						-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
<b>2017/2018</b>											
M/S1	43,2 a	3,7 b	27,3 c <sup>1</sup>	8,5	3,0	1,5 b	39	12	93	53	104
M+Massai/S1	40,8 a	3,7 b	28,7 c	7,6	3,5	1,6 b	36	13	96	57	131
M+Tamani/S1	37,2 b	3,9 b	28,5 c	8,3	3,7	1,7 b	44	13	94	48	117
M+Zuri/S1	39,2 a	3,9 b	28,2 c	7,7	3,4	1,5 b	39	13	96	42	117
M+Tanzânia/S1	36,3 b	4,3 a	33,3 a	8,8	3,5	2,3 a	45	15	102	68	160
M+Marandu/S1	36,7 b	3,9 b	28,1 c	9,6	3,5	2,5 a	47	13	101	55	124
M+Ruziziensis/S1	40,1 a	3,7 b	31,4 b	8,1	3,4	1,4 b	41	13	91	45	82
Teste F	*	*	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	5,4	5,8	4,2	11,5	16,6	14,5	13,3	8,4	7,3	23,1	24,4
<b>2018/2019</b>											
M/S2	33,2	3,2	24,3	6,6 b	2,45	1,4	37	10	104	43	78 b
M+Massai/S2	34,3	3,5	24,1	8,1 a	2,46	1,8	31	9	112	42	93 a
M+Tamani/S2	32,8	3,3	27,0	6,9 b	2,62	1,0	35	11	115	33	72 b
M+Zuri/S2	33,2	3,4	26,1	7,3 b	2,87	1,1	35	10	117	32	74 b
M+Tanzânia/S2	33,6	3,4	25,6	8,3 a	3,13	1,5	34	10	125	32	97 a
M+Marandu/S2	32,8	3,4	26,4	8,2 a	2,91	1,6	34	10	101	39	76 b
M+Ruziziensis/S2	31,5	3,1	28,0	7,5 b	2,55	1,1	35	9	112	33	77 b
Teste F	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
CV (%)	8,4	6,2	6,4	8,9	17,5	34,1	6,8	10,5	8,7	23,9	14,3

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupamento, de acordo com o teste Scott Knott a 5% de probabilidade.

### 3.1.5 Produtividade

As maiores produtividades de grãos de milho na safra 2016/2017, foram observadas nos tratamentos de milho consorciado com Massai, Zuri e Marandu (Tabela 7). Para a produção de massa seca das forrageiras, foram formados dois grupos, sendo um composto pelos capins do gênero *Megathyrus* (Tanzânia 7.944 kg ha<sup>-1</sup>, Zuri 7.109 kg ha<sup>-1</sup> e Tamani 5.894 kg ha<sup>-1</sup>) com maiores produtividades, exceto pelo Massai (4.098 kg ha<sup>-1</sup>) e pelos capins *Urochloa* (Marandu 4.526 kg ha<sup>-1</sup> e Ruziziensis 3.940 kg ha<sup>-1</sup>), os quais formaram outro grupo.

Para a soja, na safra 2017/2018, houve a formação de um grupo de tratamentos com as maiores produtividades, composto pela soja cultivada após consórcios entre milho e as forrageiras, em comparação à soja cultivada após o milho solteiro (Tabela 7). Na safra 2018/2019, por sua vez, a produtividade de soja foi maior quando cultivada em sucessão aos consórcios M+Tamani (3.937 kg ha<sup>-1</sup>) e M+Ruziziensis (3.739 kg ha<sup>-1</sup>). Quando se analisa a produtividade acumulada de soja (soma das duas safras), mais uma vez ficou evidente a superioridade dos

tratamentos onde houve cultivo consorciado do milho com as forrageiras, em comparação ao cultivo solteiro de milho (Tabela 7).

**Tabela 7.** Produtividade sob influência do consórcio do milho com forragens, sobre a cultura da soja para a safra 2017/2018 e 2018/2019, Bom Jesus, PI.

Tratamento	Produtividade				
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----				
	Milho	Forrageira (Massa seca)	-----Soja-----		
	----- 2016/2017 -----		2017/2018	2018/2019	Acumulado (2018+2019)
M	10.635 b <sup>1</sup>	-	2.468 b	3.307 b	5.751 b
M+Massai	12.638 a	4.098 b	2.711 a	3.579 b	6.662 a
M+Tamani	10.579 b	5.894 a	2.956 a	3.937 a	6.866 a
M+Zuri	14.524 a	7.109 a	3.230 a	3.293 b	6.503 a
M+Tanzânia	10.250 b	7.944 a	2.832 a	3.493 b	6.539 a
M+Marandu	13.270 a	4.526 b	2.888 a	3.575 b	6.549 a
M+Ruziziensis	10.635 b	3.940 b	2.806 a	3.739 a	6.798 a
Teste F	*	*	*	*	*
CV (%)	11,9	29,5	8,3	5,6	4,7

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupamento, de acordo com o teste Scott Knott a 5% de probabilidade.

### 3.2 Discussão

As diferenças observadas na safra 2017-2018 para Mg, V e para o K do solo, são justificadas pela presença das forrageiras no cultivo com o milho, cuja palhada em decomposição atuou como fonte de nutrientes, influenciando seus teores e os valores de V no solo. Destaque merece ser dado para o consórcio milho-Zuri, que também proporcionou maior rendimento de massa seca da forrageira e que pode ter impactado significativamente na liberação deste nutriente tanto em superfície (0-0,1 m) quanto em subsuperfície (0,2-0,4 m). Alguns trabalhos mencionam que em consórcios de milho com gramíneas, o K é o nutriente que apresenta maior acúmulo na parte aérea das forrageiras (até 150 kg ha<sup>-1</sup>), com 100% de liberação deste nutriente até 90 dias nos cultivos em sucessão (MENDONÇA et al., 2015). Tal fato pode ser explicado pelo K não possuir função estrutural no citoplasma das células vegetais, formando ligações com complexos orgânicos de fácil reversibilidade, permitindo sua total e rápida liberação a partir dos restos vegetais (MENDONÇA et al., 2015; WERNER et al., 2020).

Os maiores teores de K verificados no solo na primeira safra de soja em sucessão ao consórcio milho+Zuri não se traduziu em melhoria do estado nutricional

da planta para este nutriente. Contudo, as plantas de soja que apresentaram maiores concentrações de K nas folhas diagnósticas foram aquelas cultivadas em sucessão ao consórcio milho+Tanzânia, tratamento que resultou na segunda maior produção de massa seca de forrageira e que também proporcionou maiores concentrações de P e S nas plantas de soja. Costa et al., (2020) estudando o cultivo de soja em palhada de *Megathyrsus* (capim Mombaça) evidenciaram alteração no estado nutricional das plantas, com incrementos de P e S na folha diagnóstica.

A ausência de correspondência entre o resultado verificado no solo e na planta, quanto aos teores de K pode ser justificada pelo rendimento da forrageira, sua capacidade de explorar o solo, a relação C/N e teor de lignina, o que interfere na velocidade de liberação de nutrientes. Outra possibilidade está associada ao fato que a o capim Tanzania tenha absorvido maior quantidade de K em profundidade e isso também proporcionou produtividade de massa seca possibilitando maior ciclagem desse nutriente, algo que refletiu em maior teor na planta. Isso pode ser corroborado em Mendonça et al. (2015), onde o K ao ser extraído pelas raízes é disponibilizado posteriormente a dessecação.

A elevada relação C/N das forrageiras favorece o processo de imobilização de nutrientes do solo. Com isso, após a dessecação até o ciclo final do desenvolvimento da soja, essa relação se mantém maior que 30 para as gramíneas forrageiras do gênero *Megathyrsus* e *Urochloa*, conseqüentemente promovendo a imobilização de nutrientes no primeiro ano de cultivo da soja em sucessão (DIAS, 2020). A disponibilidade de nutrientes do solo é influenciada pela produção e decomposição da biomassa vegetal (N'DRI et al., 2018). Se essa biomassa apresentar relação C/N alta, indica uma menor taxa de mineralização da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, conservação do C (RIBEIRO et al., 2019).

A *Urochloa brizantha* cv. Marandu, por exemplo, apresenta relação C/N de 35, enquanto o *Megathyrsus maximus* (Tanzânia), possui relação C/N de 31. Já o consórcio do milho com essas duas forrageiras apresenta relação C/N de 38 (COSTA, et al., 2020), enquanto a relação C/N da palhada de milho é de 46 (CALONEGO et al., 2012). Estes dados podem indicar que a palhada do milho solteiro, por apresentar elevada relação C/N, proporcionou menor mineralização no primeiro ano da soja em sucessão, influenciando o teor de nutrientes no solo.

A taxa de decomposição da palhada é determinada pela relação C/N dos resíduos vegetais (TANAKA et al., 2019), que associada ao maior ou menor teor de

lignina e relação lignina/N, tonam-se importantes do ponto de vista de persistência do resíduo vegetal como cobertura do solo, principalmente quando a região apresenta elevadas temperaturas, acelerando a decomposição (COSTA et al., 2014). Assim, as diferenças na composição químico-bromatológica da palhada das forrageiras pode ter promovido diferenças nos teores de ácidos húmicos na camada de 0-0,1 m, com maiores concentrações na área de soja cultivada sob consórcio milho-Marandu, na safra 2017-2018. A lenta decomposição da palhada das gramíneas forrageiras, condicionada pela elevada relação C/N, permitiu o incremento da fração C-FAH, que somado à ausência de perturbação no solo (plantio direto), propiciou maior polimerização de compostos, justificando os incrementos nos teores desta fração (LOSS et al., 2010; 2013). Os maiores valores de RBS nos tratamentos M/S1, M+Marandu/S1 e M+Tamani/S1 na safra 2017/2018, possivelmente contribuíram, também, para os incrementos nos teores de C-FAH, observado no M+Marandu/S1.

O cultivo após a dessecação da palhada não contribuiu com o incremento da biomassa microbiana, o que é justificado pela relação C/N do material, podendo limitar o crescimento dos microorganismos decompositores (MAZZUCHELLI et al., 2020). Essa informação é corroborada pelos baixos valores de  $q_{Mic}$  observados no tratamento M+Marandu/S1, M/S1 e M+Massai/S1, sugerindo que a palhada das gramíneas, incluindo o milho, não foi totalmente decomposta.

Alguns trabalhos citam que as forrageiras do gênero *Megathyrsus* apresentam maior potencial de produção de biomassa que plantas do gênero *Urochloa*, o que possibilita o acúmulo e exportação de nutrientes da área, além de serem mais competitivas e demandarem elevadas taxas de N (COSTA et al., 2020). Com a maior demanda por N, essas forrageiras tendem a apresentar menores valores da relação C/N, conseqüentemente, acelerando a decomposição e a ciclagem de nutrientes (COSTA et al., 2020; MENDONÇA et al., 2015). Portanto, os impactos no solo, na planta e na produtividade não estão associados somente à maior produção de massa da gramínea forrageira, mas também, à qualidade do material vegetal, permitindo que os atributos químicos e biológicos e a fração química do C diferissem no presente estudo.

Na safra 2018/2019 houve a aplicação de calcário à lanço na área experimental, o que possivelmente resultou em melhoria dos atributos do solo em subsuperfície, quando comparados à safra 2017/2018. Tal comportamento foi

observado tanto para a fertilidade do solo, quanto para o fracionamento químico do carbono, além dos atributos biológicos do solo na camada superficial. A aplicação de calcário, possivelmente interferiu nas taxas de mineralização e decomposição da matéria orgânica, o que explica um maior efeito residual dos consórcios na segunda safra, comportamento este contrário ao inicialmente esperado. Diniz et al. (2019) observaram que a aplicação de calcário diminuiu o tempo de meia-vida da palhada de forrageiras aumentando a taxa de decomposição, o que acelera o processo de liberação de nutrientes.

A ausência de efeito significativo dos tratamentos para os atributos químicos do solo nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, nos tratamentos com consórcio em comparação ao tratamento com milho solteiro na safra 2018/2019, pode ser justificada pela calagem realizada. Isto se deve à melhoria, em todos os tratamentos, dos atributos químicos, tais como cátions básicos e fósforo, além da diminuição de Al, uma vez que os efeitos da calagem superficial são mais pronunciados nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m (FIDALSKI; TORMENA, 2005; BRIEDIS et al., 2012).

Na camada de 0,2-0,4 m, por sua vez, as alterações na fertilidade observadas podem ser justificadas pela decomposição e liberação de nutrientes e pela lixiviação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Estas moléculas possivelmente contribuíram para incrementar os teores de matéria orgânica do solo, da CTC e de Ca e Mg trocáveis em camadas mais profundas do solo, com correção dos teores de Al trocável (COSTA et al., 2015). Este mecanismo justifica os resultados verificados no solo cultivado com soja em sucessão aos consórcios M+ Zuri, M+Tanzânia, M+Marandu e M+Ruziziensis, que incrementaram os teores de Ca e diminuíram o de Al, em relação aos demais tratamentos (milho solteiro, M+Massai e M+Tamani). As maiores concentrações de Ca na soja cultivada em sucessão ao M+Marandu e M+Tanzânia, além do M+Massai na safra 2018/2019, corroboram em parte os resultados observados no solo.

O cultivo consorciado de M+Marandu, M+Tanzânia e M+Ruziziensis aumentaram os teores de C no solo no segundo ciclo de cultivo de soja (safra 2018/2019). A maior relação C/N das forrageiras do gênero *Urochloa* (Marandu e Ruziziensis), possivelmente contribuíram para uma decomposição mais lenta da palhada (COSTA et al., 2020; MENDONÇA et al., 2015), resultando em maior conservação do COT no solo. Adicionalmente, a calagem efetuada na safra

2018/2019 contribuiu com o aumento do carbono do solo, sobretudo nas camadas superficiais, devido à melhoria da qualidade do solo, com consequente aumento do aporte de resíduos vegetais, associado à menor perturbação do solo (BRIEDS et al., 2012; COSTA et al., 2015).

Os teores das substâncias húmicas C-FAH (0-0,10 m) e HUM em todas as profundidades apresentaram comportamento similar ao COT, possivelmente, tendo sido influenciados pelos mesmos fatores que este último. A calagem realizada em superfície possa ter influenciado as frações de C mais lábeis, leves e particuladas e com curto tempo de meia-vida, favorecendo a migração destas para frações mais estáveis, com a formação de complexo organo-minerais detectados pelo aumento de ácidos húmicos e/ou humina. A associação de um manejo conservacionista (plantio direto), com o fornecimento de Ca via calagem, criou um ambiente favorável para que ocorresse ligações entre as cargas negativas da matéria orgânica e os colóides (BRIEDS et al., 2012), o que explica a migração do C mais lábil para frações mais estáveis.

Devido à sua maior estabilidade, a humina é a fração de carbono que se encontra em maiores quantidades no solo (70% do COT), quando comparadas com as frações ácidos húmicos e fúlvicos. Essas frações podem ser influenciadas pelo uso e manejo do solo e pela concentração de matéria orgânica, melhorando a retenção de cátions e agregação do solo (ROSSET et al., 2016). Os maiores teores de ácidos húmicos no solo sob influência do tratamento M+Marandu na safra 2017/2018, além dos maiores teores de humina em todas as profundidades na safra 2018/2019, evidencia o potencial do consórcio de milho com esta espécie para o incremento de formas mais estáveis de C no solo.

Os efeitos no solo dos diferentes consórcios na safra 2018/2019, possivelmente, foram influenciados pela aplicação de calcário. Mudanças em atributos biológicos do solo em solos submetidos à correção da acidez são esperados, sobretudo em sistemas integrados de produção com a presença de forrageiras. O uso dessas práticas em conjunto proporciona aumentos no aporte de carbono, que serve de substrato para atividade microbiana. A correção do pH contribui para maior crescimento das plantas e atividade dos microorganismos, ao passo que o abundante sistema radicular das gramíneas forrageiras atua como fonte de energia (C) para a biomassa microbiana (BETTIO et al., 2020).

No presente estudo, de modo geral, a respiração basal do solo foi maior na safra 2018/2019, comparado à safra anterior, sobretudo associado aos consórcios M+Zuri, M+Tanzânia e M+Ruzizensis, responsáveis por grandes quantidades de resíduos aportados no solo. Assim, é possível que as condições favoráveis criadas pela calagem, associada ao aporte de material vegetal com baixa relação C/N oriunda da soja na safra 2018/2019 tenham propiciado menor resistência à decomposição da matéria orgânica e aumento da respiração basal (BETTIO et al., 2020). Esta justificativa é corroborada pelos menores valores da RBS nos tratamentos com milho solteiro e M+Massai, os quais resultaram nos menores aportes de resíduos durante o cultivo no milho (safra 2016/2017).

Os maiores valores de RBS na safra 2018/2019 não se traduziram em incrementos no CBM. Além disso, os menores valores de  $q_{Mic}$  observados nos consórcios M+Marandu, M+Ruzizens e M+Tanzânia na safra 2018/2019, sugerem que porção considerável do C foi perdido na forma de  $CO_2$ , no processo de decomposição da matéria orgânica (BETTIO et al., 2020). Aumentos no  $q_{Mic}$ , por outro lado, seriam indicativos de maior eficiência microbiana para converter MOS em CBM (MAZZUCHELLI et al., 2020). De modo geral, valores de  $q_{Mic}$  inferiores a 1% ocorrem quando há algum fator limitante à atividade da biomassa microbiana (JAKELAITIS et al., 2008). Na safra 2017/2018, os valores de  $q_{Mic}$  estavam acima de 1%, o que demonstra que mesmo apresentando elevada RBS e  $q_{CO_2}$  em alguns tratamentos, o manejo do sistema não se encontrava em condições estressantes. Já os baixos valores de  $q_{Mic}$  observados na safra 2018/2019, indicam situação oposta, possivelmente motivada pela redução qualidade da MO remanescente (ARAÚJO et al., 2020).

Na safra 2017/2018, os tratamentos oriundos do consórcio do milho com forrageiras promoveram a produtividades da soja, em média, 18% superior àquela observada no tratamento oriundo do cultivo milho solteiro, independente da qualidade e quantidade do material vegetal adicionado ao solo.

Para a safra 2018/2019 as produtividades de grãos de soja foram superiores à média do estado do Piauí ( $3.063 \text{ kg ha}^{-1}$ ; ACOMPANHAMENTO..., 2019) e acima da média do município de Bom Jesus ( $3.157 \text{ kg ha}^{-1}$ ; IBGE, 2019), comprovando a influência positiva do cultivo de soja em sucessão aos consórcios de milho com forrageiras, com reflexos no aumento de produtividade. Nota-se ainda, que as médias de produtividade na segunda safra de soja após os consórcios foram

maiores que na primeira em todos os tratamentos, possivelmente influenciada pela boa distribuição da precipitação no período e pela calagem realizada.

Os benefícios obtidos com o cultivo de gramíneas forrageiras perenes na produtividade das culturas podem perdurar por vários anos (CRUSCIOL et al., 2015), fato este comprovado pela diferença de produtividade da soja entre os tratamentos na safra 2018/2019 e pela maior produtividade acumulada nos tratamentos onde houve o cultivo consorciado de milho com as gramíneas (15% em média). É importante ressaltar que a calagem realizada na segunda safra 2018/2019 pode ter contribuído com uma maior mineralização da matéria orgânica, melhoria da fertilidade e de atributos biológicos do solo, uma vez que aumentos de produtividade também foram observados no tratamento com milho solteiro.

#### 4. CONCLUSÕES

O consórcio do milho com gramíneas, sobretudo do gênero *Urochloa*, promove incremento nos teores de substâncias húmicas e carbono do solo.

O cultivo de milho consorciado com gramíneas, sobretudo do gênero *Megathirsus*, melhora as concentrações de K, Mg e V, respiração basal e quociente microbiano do solo.

Os efeitos dos consórcios de milho com forrageiras na produtividade da soja perduram por duas safras, com incremento médio de 15%.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] GRÃOS: safra 2018/19: décimo segundo levantamento, v.6, n.12, set. 2019.

ALEF, K. Estimation of soil respiration. In: ALEF, K.; Nannipieri, P. **Métodos in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. London: Academic Press, 1995. 576p.

ARAÚJO, N. C. A.; FRAZÃO, L. A.; FREITAS, I. C. DE; FERREIRA, E. A.; FREITAS, D. A.; SANTOS, M. V.; SANGIARD, D. A.; FERNANDES, L. A. Soil chemical and microbiological attributes under integrated production system in Oxisol of degraded pasture. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 11, p. 1772–1778, 2020.

BENITES, V. de M.; MACHADO, P. L. O. de A.; MADARI, B. E.; FONTANA, A. Fracionamento químico da matéria orgânica. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2017. Cap. 6, pg. 401-414.

BETTIO, D. P.; ARAUJO, A. S. F.; BONIFACIO, A.; ARAUJO, F. F. de. Soil microbial biomass, organic C, and soybean physiology in integrated crop–livestock systems with different inputs. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 2020. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1864341>

BRIEDIS, C.; SA, J.C.D.M.; CAIRES, E.F.; NAVARRO, J.D.F.; INAGAKI, T.M., BOER, A.; NETO, C.Q.; FERREIRA, A.D.O.; CANALLI, L.B.; SANTOS, J.B.D. Soil organic matter pools and carbon protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v.170, p.80-88, 2012.

CALONEGO, J. C.; GIL, F. C.; ROCCO, V. F.; SANTOS, E. A. DOS. Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho , braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 5, p. 770–781, 2012.

CASALI, C. A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. dos; CALEGARI, A.; PICCIN, R. Benefícios do uso de plantas de cobertura de solo na ciclagem de fósforo. In: TIECHER, T. (Ed.) **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2016. p. 23–33.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; CASTILHOS, A. M. DE; NASCIMENTO, C. A. C. DO; LIMA, C. G. DA R.; BONINI, C. DOS S. B.; KURAMAE, E. E. Can Palisade and Guinea Grass Sowing Time in Intercropping Systems Affect Soybean Yield and Soil Chemical Properties ? **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 1–10, 2020.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; FERNANDES, J. C.; CAVASANO, F. A.; ULIAN, N. D. A.; PARIZ, C. M.; SANTOS, F. G. Acúmulo de nutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em função do manejo de corte e produção do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 2, p. 166–173, 2014.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S.M.; YOKOBATAKE, L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. DOS S. B.; LONGHINI, V.Z. Atributos do solo e

acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 852–863, 2015.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2271-2280, 2015.

DIAS, M. B. de C. **Forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum maximum* na integração lavoura-pecuária**. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia). Instituto Federl de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2020, 87p.

DIAS-FILHO, M.B. 2012. **Formação e manejo de pastagens**. Embrapa Amazônia Oriental. 8p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico, 235).

DINIZ, J. F.; OLIVEIRA, J. T.; BORGES, M. C. Z.; NOGUEIRA, K. B.; ROQUE, C. G. Decomposição Da Palhada De *Urochloa Ruziziensis* Em Diferentes Sistemas De Semeadura E Correção Do Solo. **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, v. 27, n. 4, p. 370–380, 2019.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. & COEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F & STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-21. (SSSA Special Publication, 35).

FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 991-996, 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dez. 2019.

FERREIRA, J. P.; ANDREOTTI, M.; PASCOALOTO, I. .; COSTA, N. R.; AUGUSTO, J. G. Atributos químicos e físicos de um latossolo em diferentes sistemas integrados de produção agropecuária. **Boletim de Indústria Animal**, v. 75, p. 1–17, 2018.

FIDALSKI, J. & TORMENA, C.A. Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 235-247, 2005.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 1-10, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes 2019**.

<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=766>. Acesso em: 20 de set. de 2020.

INMET. **Normal climatológica** Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> Acesso em: dezembro de 2017.

- JAKELAITIS, A.; SILVA, A.A.; SANTOS, J.B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa agropecuária tropical**, vol. 38, p. 118-127, 2008.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, n.p. 1928.
- 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. **Span J. Agric. Res.**v.11, n. 1, p. 217-231, 2013.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C. dos; SILVA, E. M. R. da. Quantificação do carbono das substâncias húmicas em diferentes sistemas de uso do solo e épocas de avaliação. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p.913-922, 2010.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; GIACOMO, S.G.; PERIN, A. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.565-579, 2011.
- LUIZÃO, F.J. Ciclo de nutrientes na Amazônia: respostas as mudanças ambientais e climáticas. **Ciência e Cultura**, v.59, p.31- 36, 2007.
- MAZZUCHELLI, R. DE C. L.; ARAUJO, A. S. F. DE; MORO, E.; ARAUJO, F. F. DE. Changes in Soil Properties and Crop Yield as a Function of Early Desiccation of Pastures. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 840–848, 2020.
- MENDONÇA, V. Z. DE; MALCOLM, L.; MELLO, M. DE; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; HIROYOSHI, É.; CEZAR, F.; LAGES, B. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 183–193, 2015.
- MENDONÇA, V.Z., MELLO, L.M.M., ANDREOTTI, M., PEREIRA, F.C.B.L., LIMA, R.C., VALÉRIO FILHO, W.V., YANO, E.H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V. 37, pag.251-9. 2013.
- N'DRI, J. K.; GUÉI, A. M.; EDOUKOU, E. F.; YÉO, J. G.; N'GUESSAN, K. K.; LAGERLÖF, J. Can litter production and litter decomposition improve soil properties in the rubber plantations of different ages in Côte d'Ivoire? **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 111, p. 203–215, 2018.
- PACHECO, L.P.; MONTEIRO, M. M. de S.; SILVA, R. F. DA; SOARES, L. DOS S.; FONSECA, W. L.; NÓBREGA, J.C.A.; PETTER, F. A.; ALCÂNTARA NETO, F. de; OSAJIMA, J. A. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura no cerrado piauiense. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p.237-246, 2013.
- PACHECO, L.P.; PETTER, F. A.; SOARES, L. dos S.; SILVA, R. F. da; OLIVEIRA, J.B. Da S. Sistemas de produção no controle de plantas daninhas em culturas anuais no Cerrado Piauiense. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 500-508, 2016.
- PRAGANA, R. B.; SOUZA JUNIOR, V. S. de; MOURA, R. dos S.; SOARES, J. M. Characterization of yellow latosols (oxisols) of serra do quilombo, in piauí state

savanna woodlands – brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 832 – 840, 2016.

RIBEIRO, J. M.; FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 920–930, 2019.

RIBEIRO, L. M.; SOUZA, W. D. de; CECCON, G. Atributos químicos do solo e produtividade da soja após milho, braquiária e feijão-caupi em latossolo na região do cerrado. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n.2, p. 16-28, 2020.

RODRIGUES, M. N.; SANTOS, L. D. T.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Soil chemical properties in an integrated crop-livestock-forestry system. **Engenharia na Agricultura**, v.25, n.1, p.63-73, 2017.

ROSSET, J. S.; LANA, M. DO C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; MARCOS VINÍCIUS MANSANO SARTO. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1529-1538, 2016.

SAKREZENSKI, E.; BORDIGNON, E.; ALLEBRANDT, N.; SORDI, A.; HICKNMAN, C.; CERICATO, A. Rendimento e efeito residual da palhada de trigo (*triticum aestivum* L.) na cultura da soja (*glycine max* (L.) Merrill) cultivada em sucessão. **Unoesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, v. 9, n. 1, p. 67-76, 2018.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C. de; LEÃO, T. P.; RAMOS, M. L. G.; KATO, E. Matéria orgânica e infiltração da água em solo sob consórcio milho e forrageiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. Ambiente, vol. 16, n. 2, Campina Grande, 2012.

SILVA, E.E. da; AZEVEDO, P.H.S de; DE-POLLI, H. 2007. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica, Embrapa Agrobiologia. 6p. (Comunicado Técnico 98).

SOUSA, D. C. DE; MEDEIROS, J. C.; ROSA, J. D.; LACERDA, J. J. DE J.; MAFRA, Á. L.; MENDES, W. DE S. Chemical attributes of agricultural soil after the cultivation of cover crops. **Australian Journal of Crop Science** (ONLINE), v. 11, p. 1497-1503, 2017.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E., eds. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. p.147-168.

SOUSA, H. M.; CORREA, A. R.; SILVA, B. de M.; OLIVEIRA, S. da S.; CAMPOS, D. T. da S.; WRUCK, F. J. Dynamics of soil microbiological attributes in integrated crop-livestock systems in the cerrado-amazonônia ecotone. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 1, p. 09 – 20, 2020.

SPARLING, G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**. 30:195–207, 1992.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CALONEGO, J. C.

Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, p. 267–281, 2019.

TECNOLOGIAS de produção de soja - Região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 16).

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2017.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Produção e decomposição de resíduos culturais antecedendo milho e soja num Latossolo no Cerrado mineiro. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.5, n.4, p.419-426, 2014.

WERNER, F.; FERREIRA, A. S.; BALBINOT, A. A.; OLIVEIRA, A. DE; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; AGUIAR E SILVA, M. A. DE. Nitrogen, phosphorus, and potassium released by decomposition of palisade grass to soybean in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. 1–10, 2020.

## CAPÍTULO II

### INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA SILVIAGRÍCOLA NO CERRADO PIAUIENSE

RESUMO - O sistema silviagrícola integra os componentes floresta e lavoura, pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas anuais ou perenes. Objetivou-se com este trabalho determinar o impacto dos componentes do sistema silviagrícola na qualidade do solo de Cerrado no Sul do Piauí. Foram coletadas amostras de solo com quatro repetições nos componentes renque de sabiá (RS), renque de eucalipto (RE), entre renque de soja (ERS) e entre renque de milho (ERM) e Cerrado nativo (CN), para avaliar os atributos químicos do solo, fracionamento químico e físico da matéria orgânica, relação de estratificação, estoque do carbono e índice de manejo do carbono nas camadas: 0-0,1; 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparados por teste de médias, além da análise multivariada. Os cátions básicos e soma de bases apresentaram menores concentrações atreladas ao CN. Foram verificados maiores valores da concentração de carbono na camada 0,1-0,2 m no RE; na camada 0,2-0,3 m o RS apresentou maiores valores e na camada 0,3-0,5 m a maior concentração foi verificada no CN. Na camada de 0,1-0,2 m os maiores valores para o carbono ligado aos ácidos fúlvicos foram observados no RE; para o carbono ligado a humina, com exceção da camada superficial, o componente CN se destacou em todas as profundidades. O ERM apresentou maior relação de estratificação do carbono, contribuindo em qualidade da camada superficial. Os maiores valores para labilidade, índice de labilidade e índice de manejo do carbono foram observados no RS. O RE e o CN proporcionaram os maiores estoques de C acumulado (0-0,5 m). A área de CN apresentou maior dissimilaridade do sistema silviagrícola na análise de agrupamento. Os componentes de sistema silviagrícola podem influenciar os atributos do solo de forma que os componentes RE e RS contribuem para incremento de substâncias húmicas, estoque de carbono e carbono orgânico particulado; o componente ERM proporciona maior estratificação do carbono lábil e sequestro de carbono do solo, esse em conjunto com ERS garantem maior estabilidade da matéria orgânica.

**Palavras-chave:** Matéria orgânica, *Eucalyptus* spp., *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., manejo do solo.

## CHAPTER II

### SOIL QUALITY INDICATORS IN THE FOREST SYSTEM IN THE CERRADO PIAUIENSE

**ABSTRACT** - The silviagricultural system integrates the forest and farming components, through the intercropping of tree species with annual or perennial agricultural crops. The objective of this work was to determine the impact of the components of the silviagricultural system on the soil quality of Cerrado in southern Piauí. Soil samples were collected with four replications in the components of sabia tree row (STR), eucalyptus tree row (ETR), among soybean plant row (SPR) and among corn plant row (CPR) and native Cerrado (NC) components. Soil chemical, chemical and physical fractionation of organic matter, stratification ratio, carbon stock and carbon management index in layers: 0-0.1; 0.1-0.2, 0.2-0.3 and 0.3-0.5 m. Data were submitted to analysis of variance and compared by means test, in addition to multivariate analysis. The basic cations and sum of bases showed lower concentrations linked to NC. Higher carbon concentration values were verified in the 0.1-0.2 m layer in the SBR; in the 0.2-0.3 m layer the RS showed higher values and in the 0.3-0.5 m layer the highest concentration was verified in the NC. In the 0.1-0.2 m layer, the highest values for carbon bound to fulvic acids were observed in the ETR; for carbon bound to humin, with the exception of the surface layer, the NC component stood out at all depths. The CPR showed the highest carbon stratification ratio. Higher values for lability, lability index and carbon management index were obtained with STR. As for the accumulated C stock, ETR and NC had higher values (0-0.5 m). The NC area showed greater dissimilarity of the silviagricultural system in the cluster analysis. The results indicate that the silviagricultural system components can influence the soil attributes in a way that the ETR and STR components contribute to the carbon of humic substances, carbon stock and particulate organic carbon and the CPR component provides greater labile carbon stratification and sequestration of soil carbon, this together with SPR ensures greater stability of organic matter. The use of multivariate techniques proved to be efficient in distinguishing forestry components.

**Keywords:** organic matter, *Eucalyptus* spp., *Mimosa caesalpinifolia* Benth., soil management.

## 1. INTRODUÇÃO

O potencial de produção das áreas antropizadas do Cerrado desempenha papel preponderante na desaceleração do processo de expansão da fronteira agrícola sobre novas áreas, e reforça a política de conservação dos recursos naturais. Com isso, a estratégia de ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta) nas suas diferentes modalidades está sendo adotada em diferentes níveis de intensidade nos biomas brasileiros (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011).

Essa estratégia contempla a modalidade de sistema Integração Lavoura-Floresta (Silviagrícola), pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais ou perenes). O componente lavoura pode ser utilizado na fase inicial de implantação do componente florestal ou em ciclos durante o desenvolvimento do sistema (BALBINO et al., 2011; BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Espécies florestais como o eucalipto e o sabiá são utilizadas em sistemas integrados consorciadas com as culturas da soja e milho, visando a melhoria da qualidade do solo e estoque de carbono (COSTA et al., 2020; SOUZA et al., 2019).

Com a introdução desse modelo de exploração, além da intensificação e maior eficiência do uso da terra são gerados outros benefícios ao ambiente com a interação entre os componentes do sistema, como: maior sequestro de carbono, aumento da matéria orgânica do solo e melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Além disso, há redução de riscos econômicos gerados pela diversificação do sistema de produção (BALBINO et al., 2012; VILELA et al., 2011; DIEHL et al., 2014).

Dessa forma, é possível realizar a avaliação da qualidade do solo por meio do monitoramento de seus atributos físicos, químicos e biológicos (MENDES et al., 2009). Os indicadores químicos retratam parâmetros que são responsáveis pelos processos naturais do funcionamento do solo, como pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), os teores de macro e micronutrientes e os estoques de matéria orgânica estão entre os atributos químicos comumente utilizados como indicadores da qualidade do solo (FREITAS et al., 2017). Além desses, outros indicadores também podem ser usados, como densidade do solo, as frações granulométricas (carbono orgânico particulado e associado aos minerais), IMC (Índice de manejo do

carbono) (SILVA, J. et al., 2020; ARAÚJO et al., 2019) e a relação de estratificação do carbono como indicador de sequestro de carbono (FERREIRA et al., 2012).

Os trabalhos de pesquisa relacionados ao sistema ILPF são bastante diversificados, e compreendem estudos sobre os efeitos de diferentes espaçamentos e arranjos de plantio, sobre a partição de recursos naturais entre os componentes dos sistemas e a sua produtividade, diferentes espécies, efeitos do sistema na conservação do solo e da água, estudos de viabilidade econômica, sistemas de manejo, indicadores biológicos e de qualidade do solo (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Os benefícios sobre a qualidade do solo têm sido mostrados em vários estudos (SILVA, J. et al., 2020; COSTA et al., 2020; ASSIS et al., 2019). Além disso, o componente florestal quando inserido no sistema melhora os atributos químicos, aumenta os estoques de carbono do solo (CORDEIRO et al., 2015) e tem potencial para sequestrar carbono (CAMPANHA; COSTA; GONTIJO NETO, 2017).

A região do MATOPIBA possui cerca de 792.552 ha com ILPF e destes 74.119 ha estão no Piauí (ILPF em números..., 2017), com o Cerrado piauiense apresentando áreas de referência nas quais estudos sobre os impactos dos componentes do ILPF na qualidade do solo ainda são incipientes. Diante disso, tendo como hipótese que os componentes do sistema lavoura-floresta podem gerar impactos aos atributos do solo, objetivou-se com este trabalho avaliar a influência dos componentes do sistema silviagrícola na qualidade do solo de Cerrado no Sul do Piauí.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

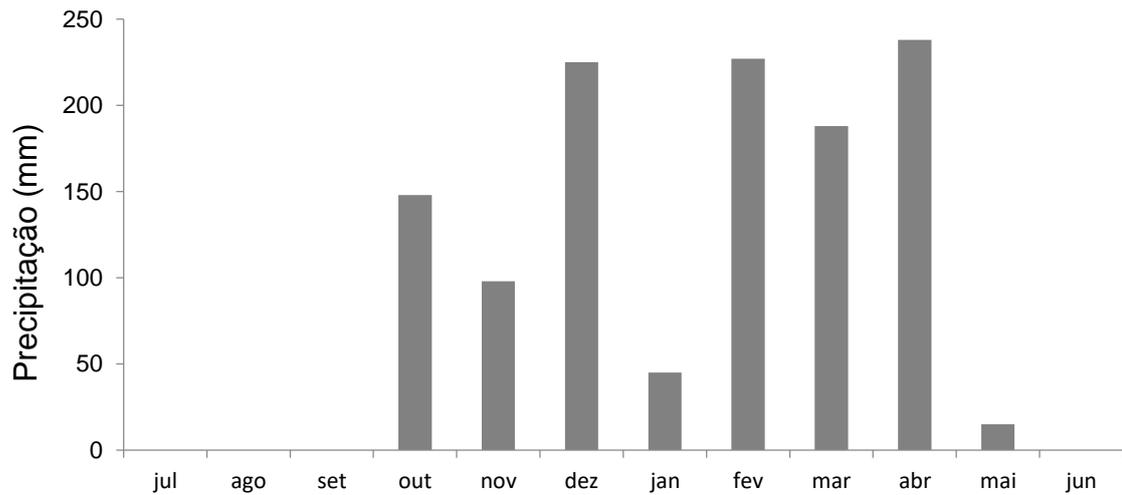
### 2.1 Local e informações da área experimental

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Vô Desidério, situada na Serra do Quilombo, em Bom Jesus, Piauí (9°16'20"S; 44°44'56"O; 628 m de altitude), em área com declividade de 0,2%. De acordo com Pragana et al. (2016), o solo da região é classificado como LATOSSOLOS AMARELOS Distróficos. Antes da instalação do experimento foram coletadas amostras de solo na área, e posteriormente enviados para análise em laboratório utilizando a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) (Tabela 1). O clima da área é do tipo Aw (tropical, com inverno seco) de acordo com Köpen; Geiger (1928), a temperatura média é de 26,7°C e a pluviosidade média de 1.002 mm (INMET, 2018). Na figura 1 estão ilustrados os dados de precipitação pluvial durante o período de condução do experimento.

**Tabela 1.** Atributos químicos e granulometria do solo antes da implantação do ensaio, Bom Jesus, 2016.

Camadas	pH <sub>H2O</sub>	V	H+Al	Al	Ca	Mg	SB	CTC
m		%	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					
0-0,2	5,5	36	5,7	0,1	2,0	0,8	3,2	9,0
0,2-0,4	5,2	29	4,2	0,2	1,0	0,3	1,7	5,8
	P	K	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	m	M.O.	Argila	Silte	Areia
m	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	%	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
0-0,2	56,5	0,45	16,5	3	20	223	5	772
0,2-0,4	19,4	0,31	17,1	10	12	234	20	746

A área experimental foi implantada na safra 2016/2017 e contempla 3 renques de espécies florestais, sendo um renque com oito linhas no espaçamento 4 x 3 m, e outros dois renques com três linhas no mesmo espaçamento mencionado, com dois entre renques (área de cultivo agrícola) de 34 m. O comprimento total dos três renques foi de 230 m, sendo 140 m ocupados com eucalipto e 90 m com sabiá. Nos entre renques foram cultivados milho e soja. Para as avaliações também foi utilizada uma área de Cerrado nativo, próxima à área experimental.



**Figura 1.** Valores médios da precipitação pluvial da safra 2018/2019.

Fonte: Fazenda Colorado, Bom Jesus, PI.

No primeiro ano (safra 2016/2017), um dos entre renques (entre renque A) foi cultivado com milho. O outro entre renque (entre renque B), na safra 2016/2017, foi cultivado com soja e na safra seguinte (2017/2018), houve a inversão de cultivos. Na safra 2018/2019, manteve a mesma cultura cultivada da safra anterior (soja no entre renque A e milho no entre renque B).

Após três anos de implantação, para realização desta avaliação foram considerados os seguintes componentes do sistema silviagrícola: renque de eucalipto (RE), renque de sabiá (RS), entre renque com soja (ERS) (Figura 2A), entre renque com milho (ERM) (Figura 2B), e área de Cerrado nativo (CN), com coleta das amostras de solo no fim do período chuvoso da safra 2018/2019.



**Figura 2.** Entre renque com plantio de soja (A). Entre renque com plantio de milho (B). Fonte: Silva (2019).

Na safra 2016/2017 a adubação utilizada para o milho foi de 500 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 08-24-12 e 280 kg de ureia em cobertura. Na safra 2017/2018 na cultura da soja, a adubação utilizada na semeadura foi de 300 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 10-30-10, 150 kg ha<sup>-1</sup> de KCl aplicados em cobertura 30 dias após o plantio. Na safra 2018/2019 antecipadamente ao plantio, foram aplicadas três toneladas de calcário (85% PRNT, >12% MgO) na área no segundo ano com a soja em sucessão, a adubação foi de 400 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 170 kg ha<sup>-1</sup> de KCl em cobertura.

Nos componentes foram realizadas coletas de amostras de solo deformadas e indeformadas. As amostras deformadas foram coletadas em transectos com distância de 15 m, totalizando quatro repetições em cada componente. Nesses transectos foram coletadas 5 amostras simples para formar uma composta, e para as amostras indeformadas foram coletadas uma amostra por repetição. As camadas avaliadas foram: 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m.

Após coletado, o solo foi seco ao ar e peneirado em peneira de malha de 2 mm para a realização das análises posteriores. Os atributos químicos do solo mensurados foram: pH, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e carbono orgânico total (COT) (TEIXEIRA et al., 2017), além do fracionamento químico: carbono na fração ácido fúlvico (C-FAF), carbono na fração ácido húmico (C-FAH), carbono na fração humina (C-HUM) e relação na fração ácido húmico ácido fúlvico (AH/AF) (BENITES et al., 2017) e físico da matéria orgânica do solo: carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COM) (CAMPOS; MACHADO, 2017); densidade do solo (DS) (TEIXEIRA et al., 2017); estoque de carbono (EC) (de posse dos dados de concentração de C e densidade do solo foram realizados cálculos de estoques de C) procedendo-se a correção de massa do solo (FERNANDES; FERNANDES, 2013); índice de manejo do carbono (IMC) e seus componentes labilidade, índice de compartimento do carbono e índice de labilidade (L, ICC e IL) (BLAIR et al., 1995), considerando como referência uma área de Cerrado nativo; e relação de estratificação do carbono: COT e COP calculada conforme proposto por Franzluebbbers (2002), sendo o conteúdo de carbono da camada superficial do solo (0-0,1 m) dividido pelo valor daqueles da camada subsuperficial (0,1-0,5 m).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo software SISVAR versão 5.7 (FERREIRA, 2019), utilizando-se o teste F e as médias foram

comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Realizou-se também a análise multivariada, com análise de componentes principais (ACP) e análise de agrupamento pela distância euclidiana por meio do software R (R CORE TEAM, 2017).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Resultados

Os maiores valores do potencial hidrogeniônico (pH) estiveram atrelados aos manejos agrícolas e florestais nas camadas superficiais (0-0,1 e 0,1-0,2 m) em relação ao CN (Tabela 2).

**Tabela 2.** Atributos químicos do solo sob influência do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m, Bom Jesus, PI, 2019.

Componentes	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
	CaCl <sub>2</sub>	mg dm <sup>-3</sup>	cmolc dm <sup>-3</sup>						%
<b>Camada 0-0,1 m</b>									
CN	3,68 b <sup>1</sup>	1,65 c	0,03 c	0,39 c	0,16 b	4,91 a	0,59 c	5,50 c	11 b
RS	4,85 a	39,70 b	0,17 b	2,78 ab	0,92 a	2,83 b	3,88 ab	6,70 bc	57 a
ERS	4,82 a	53,33 ab	0,31 a	2,51 b	0,68 a	3,97 ab	3,70 ab	7,48 ab	50 a
ERM	4,70 a	70,62 a	0,37 a	3,55 a	0,92 a	3,55 ab	4,85 a	8,40 a	58 a
RE	4,48 a	55,14 ab	0,28 ab	2,54 b	0,76 a	3,58 ab	3,59 b	7,17 abc	50 a
Teste F	*	*	*	*	*	*	*	*	*
CV (%)	7,1	25,2	21,4	17,6	26,4	16,5	16,4	10,6	12,7
<b>Camada 0,1-0,2 m</b>									
CN	3,69 b	1,28 b	0,03 c	0,34 d	0,15 c	4,51	0,53 d	4,74 b	11 c
RS	4,33 a	49,64 a	0,16 b	1,71 bc	0,59 a	3,8	2,46 b	6,26 a	40 ab
ERS	4,20 a	54,26 a	0,24 a	1,50 c	0,41 b	4,27	2,15 c	6,43 a	34 b
ERM	4,38 a	56,10 a	0,22 a	2,33 a	0,58 ab	3,99	3,22 a	7,15 a	45 a
RE	4,27 a	42,51 a	0,24 a	1,79 b	0,55 ab	4,02	2,57 b	6,60 a	39 ab
Teste F	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
CV (%)	3,2	38,8	14,8	7,0	16,2	14,8	5,7	9,0	10,4
<b>Camada 0,2-0,3m</b>									
CN	3,82 b	1,26 b	0,02 c	0,31 d	0,14 d	3,44	0,48 d	3,92 b	12 c
RS	4,16 a	28,75 a	0,11 b	1,24 ab	0,38 ab	3,16	1,74 ab	4,90 ab	36 a
ERS	4,16 a	17,55 ab	0,17 a	1,05 bc	0,31 bc	3,25	1,53 bc	4,71 ab	34 a
ERM	4,14 a	18,59 ab	0,14 ab	1,47 a	0,41 a	3,30	2,02 a	5,33 a	38 a
RE	3,93 b	14,04 ab	0,14 ab	0,83 c	0,25 c	3,21	1,22 c	4,43 ab	26 b
Teste F	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
CV (%)	2,0	54,8	19,6	12,0	12,1	12,2	11,6	9,5	8,5
<b>Camada 0,3-0,5m</b>									
CN	3,87 b	1,13 b	0,02 c	0,30 b	0,14 d	2,80	0,47 b	3,27 b	14 b
RS	4,05 a	4,74 a	0,09 ab	0,94 a	0,30 a	2,43	1,32 a	3,75 ab	35 a
ERS	3,98 ab	2,88 ab	0,12 a	0,76 ab	0,25 bc	2,62	1,18 a	3,75 ab	32 a
ERM	4,03 a	2,47 ab	0,07 bc	0,93 a	0,28 ab	2,50	1,28 a	3,71 ab	35 a
RE	3,88 b	2,69 ab	0,12 a	1,07 a	0,21 c	2,78	1,41 a	4,19 a	33 a
Teste F	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
CV (%)	1,4	37,9	25,7	31,1	9,6	7,7	21,6	7,0	14,9

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na tabela 2, nas camadas de 0,2-0,3 e de 0,3-0,5 m a área de CN juntamente com o RE apresentaram menores valores de pH, sendo que na camada de 0,3-0,5 m estas áreas não diferiram da área de soja.

A concentração de P na camada 0-0,1 m foi superior para o ERM em relação ao CN e RS, não diferindo do ERS e RE; contudo na camada de 0,1-0,2 m o sistema silviagrícola, independente do renque e entre renque apresentaram valores superiores à área de referência. Para as camadas subsuperficiais (0,2-0,3 e 0,3-0,5 m) o RS foi superior ao CN.

Com relação aos cátions básicos e soma de bases, as concentrações apresentaram as mesmas tendências para K, Ca, Mg, SB e, também, CTC. As menores concentrações estiveram atreladas a área de referência (CN) em relação aos manejos agrícolas e florestais para todas as camadas (Tabela 2).

A saturação por bases apresentou resultado análogo ao de pH, com superioridade dos componentes agrícolas e florestais em todas as camadas em relação a área de CN, entretanto a acidez potencial apresentou resultado inversos.

Os teores de COT nos componentes não diferiram significativamente na camada de 0-0,1 m (Tabela 3), no entanto na camada 0,1-0,2 m os valores verificados no RE ( $1,93 \text{ dag kg}^{-1}$ ), não diferiu do CN ( $1,60 \text{ dag kg}^{-1}$ ) apresentando os maiores valores. Na camada 0,2-0,3 m o RS apresentou maiores valores ( $1,15 \text{ dag kg}^{-1}$ ) em relação a área de ERS. Quanto à camada 0,3-0,5 m o maior teor foi verificado no CN ( $0,9 \text{ dag kg}^{-1}$ ), porém não diferiu do ERM ( $0,76 \text{ dag kg}^{-1}$ ).

Ao analisar as substâncias húmicas observa-se que as maiores concentrações de C-FAF foram encontradas nas áreas de CN e RE nas camadas 0-0,1 m e 0,3-0,5 m, contudo na camada superficial (0-0,1 m) estas duas áreas não diferiram do RS e na camada de 0,3-0,5 m elas não diferiram do ERS. Ainda, na camada de 0,1-0,2 m os maiores valores para ácidos fúlvicos foram observados no RE em relação aos demais manejos e na camada de 0,2-0,3 m maiores concentrações foram observadas nas áreas de CN e RS em relação ao ERM.

Com relação ao C-FAH verifica-se que houve diferença somente entre os manejos na camada 0,1-0,2 m com destaque para o componente RE ( $0,47 \text{ dag kg}^{-1}$ ).

**Tabela 3.** Carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Bom Jesus, PI, 2019.

Componentes	COT	C-FAF	C-FAH	C-HUM	AH/AF	COP	COM	Ds	EC
	-----dag kg <sup>-1</sup> -----							g cm <sup>-3</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>
	2018/2019								
<b>Camada 0-0,1 m</b>									
CN	1,55	0,45 a <sup>1</sup>	0,34	0,75	0,76 b	0,20 b	1,35	1,24 b	19,38
RS	1,98	0,41 ab	0,39	1,17	0,93 ab	0,53 a	1,44	1,43 ab	24,60
ERS	1,51	0,35 bc	0,43	0,69	1,23 a	0,23 b	1,24	1,43 ab	18,80
ERM	1,53	0,28 c	0,37	0,88	1,31 a	0,15 b	1,37	1,43 ab	19,09
RE	1,62	0,49 a	0,45	1,10	0,95 ab	0,47 a	1,33	1,48 a	19,97
Teste F	ns	*	ns	ns	*	*	ns	*	ns
CV (%)	16,0	10,2	23,5	28,8	18,4	22,3	18,3	8,5	16,3
<b>Camada 0,1-0,2 m</b>									
CN	1,60 ab	0,38 b	0,29 b	0,92 a	0,76	0,15 b	1,45 ab	1,35 b	21,74 ab
RS	1,23 b	0,27 c	0,21 b	0,74 ab	0,77	0,42 a	0,80 c	1,61 ab	16,70 b
ERS	1,27 b	0,33 bc	0,32 b	0,61 b	0,99	0,21 ab	1,06 bc	1,64 a	17,29 b
ERM	1,34 b	0,28 c	0,24 b	0,81 ab	0,87	0,11 b	1,23 ab	1,67 a	18,31 b
RE	1,93 a	0,50 a	0,47 a	0,95 a	0,96	0,39 a	1,54 a	1,68 a	26,29 a
Teste F	*	*	*	*	ns	*	*	*	*
CV (%)	11,4	11,3	18,9	13,7	16,0	39,0	15,0	7,0	11,4
<b>Camada 0,2-0,3 m</b>									
CN	1,08 ab	0,29 a	0,15	0,63 a	0,49	0,47 a	0,61	1,35 b	14,76 ab
RS	1,15 a	0,29 a	0,21	0,65 a	0,71	0,45 a	0,69	1,63 a	15,64 a
ERS	0,80 c	0,28 ab	0,14	0,37 b	0,50	0,27 ab	0,53	1,60 a	10,96 b
ERM	1,00 ab	0,21 b	0,14	0,64 a	0,67	0,15 b	0,85	1,63 a	13,68 ab
RE	0,85 ab	0,28 ab	0,21	0,40 b	0,57	0,36 a	0,48	1,57 a	11,61 ab
Teste F	*	*	ns	*	ns	*	ns	*	*
CV (%)	14,2	12,0	27,19	14,7	18,3	26,4	30	4,5	14,1
<b>Camada 0,3-0,5 m</b>									
CN	0,90 a	0,25 a	0,08	0,57 a	0,33	0,30 ab	0,61 a	1,32 c	24,02 a
RS	0,65 b	0,19 b	0,07	0,38 b	0,36	0,44 a	0,21 b	1,57 b	17,27 b
ERS	0,48 c	0,22 ab	0,07	0,18 c	0,33	0,30 ab	0,18 b	1,66 a	12,94 c
ERM	0,76 ab	0,19 b	0,07	0,48 ab	0,38	0,10 b	0,65 a	1,55 b	208 ab
RE	0,75 b	0,25 a	0,10	0,39 b	0,39	0,44 a	0,31 b	1,55 b	19,08 b
Teste F	*	*	ns	*	ns	*	*	*	*
CV (%)	9,6	10,6	16,1	12,4	15,5	29,1	32,6	1,1	9,6

COT=carbono orgânico total; C-FAF=carbono na fração ácido fúlvico; C-FAH=carbono na fração ácido húmico; C-HUM=carbono na fração humina; AH/AF=relação na fração ácido húmico ácido fúlvico; COP=carbono orgânico particulado; COM=carbono orgânico associado aos minerais; Ds=densidade do solo; EC=estoque de carbono; IMC=índice de manejo do carbono. \* significativo a 5%; ns: não significativo. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Ao analisar o C-HUM, com exceção da camada 0-0,1 m, o componente CN se destaca em todas as demais profundidades; na camada de 0,1-0,2 m o CN e o RE apresentaram maiores concentrações, contudo não diferiram da área de RS e ERM; na camada de 0,2-0,3 m o CN, RS e o ERM apresentaram maiores valores e na camada de 0,3-0,5 m o CN apresentou superioridade em relação as demais áreas, porém não diferiu do ERM. As menores concentrações de C-HUM estavam atreladas ao componente ERS (Tabela 3).

O grau de humificação, representado pela relação AH/AF, observa-se que na área dos componentes ERS e ERM apresentaram maiores valores ( $> 1$ ) na camada superficial (0-0,1 m) em relação ao CN, porém não diferindo dos RS e RE, já para as demais camadas não houve diferença significativa.

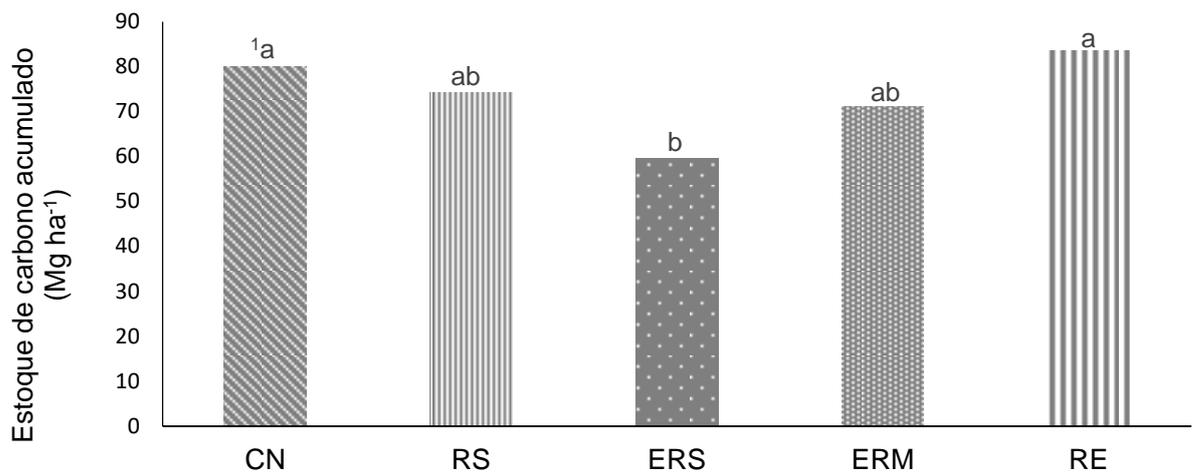
Para o carbono orgânico particulado (COP), os menores valores estiveram associados aos componentes com culturas agrícolas. Na camada superficial (0-0,1 m) as maiores concentrações foram associadas aos manejos RS e RE; na camada de 0,1-0,2 m observa-se o mesmo comportamento da camada anterior, contudo estes manejos não diferiram do ERS; na camada de 0,2-0,3 m as menores concentrações estiveram associadas ao ERM, o qual não diferiu do ERS e na camada de 0,3-0,5 m as maiores concentrações de COP foram verificadas nos RS e RE, porém não diferiram do ERS (Tabela 3).

Para COM o RE apresentou as maiores concentrações em relação ao RS e ERS na camada de 0,1-0,2 m; contudo na camada de 0,3-0,5 m o ERM e CN, apresentaram os maiores valores em relação as demais áreas.

Já para a Ds, dentre as cinco áreas avaliadas verificou-se que o componente CN apresentou menor valor em todas as camadas, contudo, na camada superficial (0-0,1 m) a área de mata não diferiu do RS, ERS e ERM, e na camada de 0,1-0,2 m não diferiu do RS.

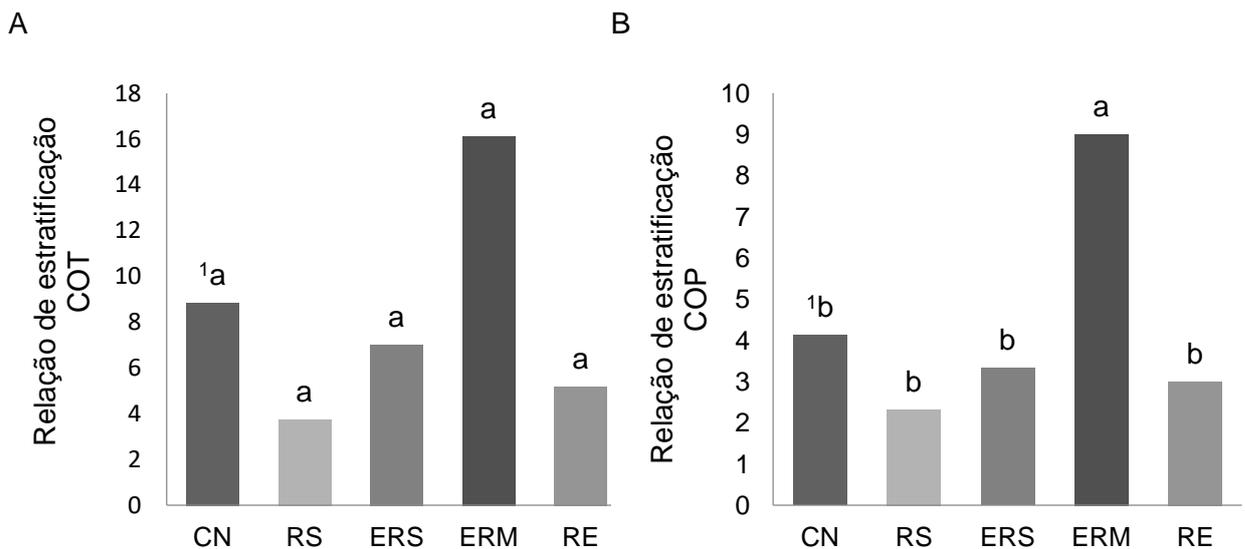
O resultado de estoque carbono (EC) foi similar a COT, na camada de 0-0,1 m não houve diferença entre os manejos, entretanto, para a camada de 0,1-0,2 m os maiores estoques foram verificados no RE que não diferiu do CN. Na camada de 0,2-0,3 m o RS apresentou maior estoque que o ERS, e na camada de 0,3-0,5 m a área de CN apresentou maior estoque, o qual não diferiu da área de ERM.

Quando se analisa o estoque de C acumulado na camada 0-0,5m (Figura 3) observa-se superioridade do RE e CN em relação ao ERS.



**Figura 3.** Estoque de carbono acumulado do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola na camada de 0-0,5 m, Bom Jesus, PI, 2019. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na figura 5 estão os resultados para a relação de estratificação do carbono para COT (4A) e COP (4B), observa-se que para estratificação do COT não houve diferença estatística entre os componentes do sistema silviagrícola (Figura 4A). No que diz respeito à relação de estratificação do COP (Figura 4B), o ERM apresentou maior relação.



**Figura 4.** Relação de estratificação do carbono total (COT; Figura A) e Lábil (COP; Figura B) sob influência dos componentes do sistema silviagrícola na camada de 0-0,1; 0,1-0,5 m, Bom Jesus, PI, 2019. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Em todas as camadas a labilidade (L), o IL e o IMC apresentaram maiores valores no RS, porém, para a L na camada de 0,2-0,3 m foi estatisticamente igual ao CN, ademais, para o IL foi estatisticamente igual ao ERS e RE na camada de 0,3-0,5 m e para o IMC na camada 0,1-0,2 m foi estatisticamente igual ao RE (Tabela 4).

**Tabela 4.** Labilidade, índice de compartimento do carbono, índice de labilidade e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Bom Jesus, PI, 2019.

Componentes	L	ICC	IL	IMC
<b>Camada 0-0,1 m</b>				
CN	0,18 b	1,00 a	1,00 b	100 b
RS	0,41 a	1,27 a	3,13 a	387 a
ERS	0,20 b	0,95 a	1,06 b	83 b
ERM	0,12 b	0,90 a	0,80 b	78 b
RE	0,28 ab	1,16 a	1,63 b	186 b
Teste F	*	*	*	*
CV (%)	31,8	13,4	28,2	30,5
<b>Camada 0,1-0,2 m</b>				
CN	06 cd	1,00 ab	1,00 c	100 c
RS	0,46 a	0,76 b	4,11 a	310 a
ERS	0,29ab	0,79 b	2,10 b	147 b
ERM	0,04 d	0,84 b	0,61 c	56 c
RE	0,23 bc	1,20 a	2,30 b	278 a
Teste F	*	*	*	*
CV (%)	36,1	11,5	17,3	11,2
<b>Camada 0,2-0,3 m</b>				
CN	0,63 a	1,00 ab	1,00 ab	100 ab
RS	0,84 a	1,06 a	1,18 a	125 a
ERS	0,59 ab	0,74 b	0,98 ab	75 bc
ERM	0,18 b	0,92 ab	0,24 c	23 d
RE	0,59 ab	0,78 ab	0,73 b	58 c
Teste F	*	*	*	*
CV (%)	32,7	14,1	16,3	17,7
<b>Camada 0,3-0,5 m</b>				
CN	0,53 bc	1,00 a	1,00 b	100 d
RS	1,74 a	0,74 b	3,52 a	293 a
ERS	1,20 ab	0,55 c	2,44 a	149 c
ERM	0,12 c	0,83 ab	0,24 b	21 e
RE	1,06 ab	0,83 b	2,56 a	221 b
Teste F	*	*	*	*
CV (%)	37,7	9,5	32,8	11,3

\* significativo a 5%; ns: não significativo. <sup>1</sup>Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Para o ICC não houve diferença significativa na primeira camada. Na camada 0,1-0,2 m os maiores valores foram encontrados no RE, na camada 0,2-0,3 m no RS e na camada 0,3-0,5 m no CN. Esses mesmos componentes com exceção da camada 0,2-0,3 m para o RE apresentaram valores de IMC acima de 100. Contrário a isso, o ERM apresentou os menores valores de IMC em todas as camadas, com valores sempre abaixo em relação a área de referência (Tabela 4).

A análise de componentes principais mostrou que os dois componentes selecionados explicaram 88,09; 76,57; 77,05 e 73,96% da variância total dos dados para as camadas de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m, respectivamente (Tabela 5).

Para a camada superficial (0-0,1 m) verifica-se a distinção entre os manejos para a análise de componentes principais, a variável acidez potencial que apresentou escore negativo para o componente principal 1 esteve atrelada a área de Cerrado. Contudo, as variáveis com escores negativos para o CP2 e positivo para o CP1 como COT, EC, L, ICC, IL e IMC estiveram associados aos renques de eucalipto e sabiá (Figura 5A).

Com relação à camada de 0,1-0,2 m as variáveis COT, AH, AF, COM, EC e ICC apresentaram escores positivos para CP2, e estiveram associados ao RE. O CN esteve associado acidez potencial. O RS, ERM e ERS estiveram atrelados a escores positivos do CP1, como pH, P, Ca, Mg, SB, CTC e V (Figura 5B).

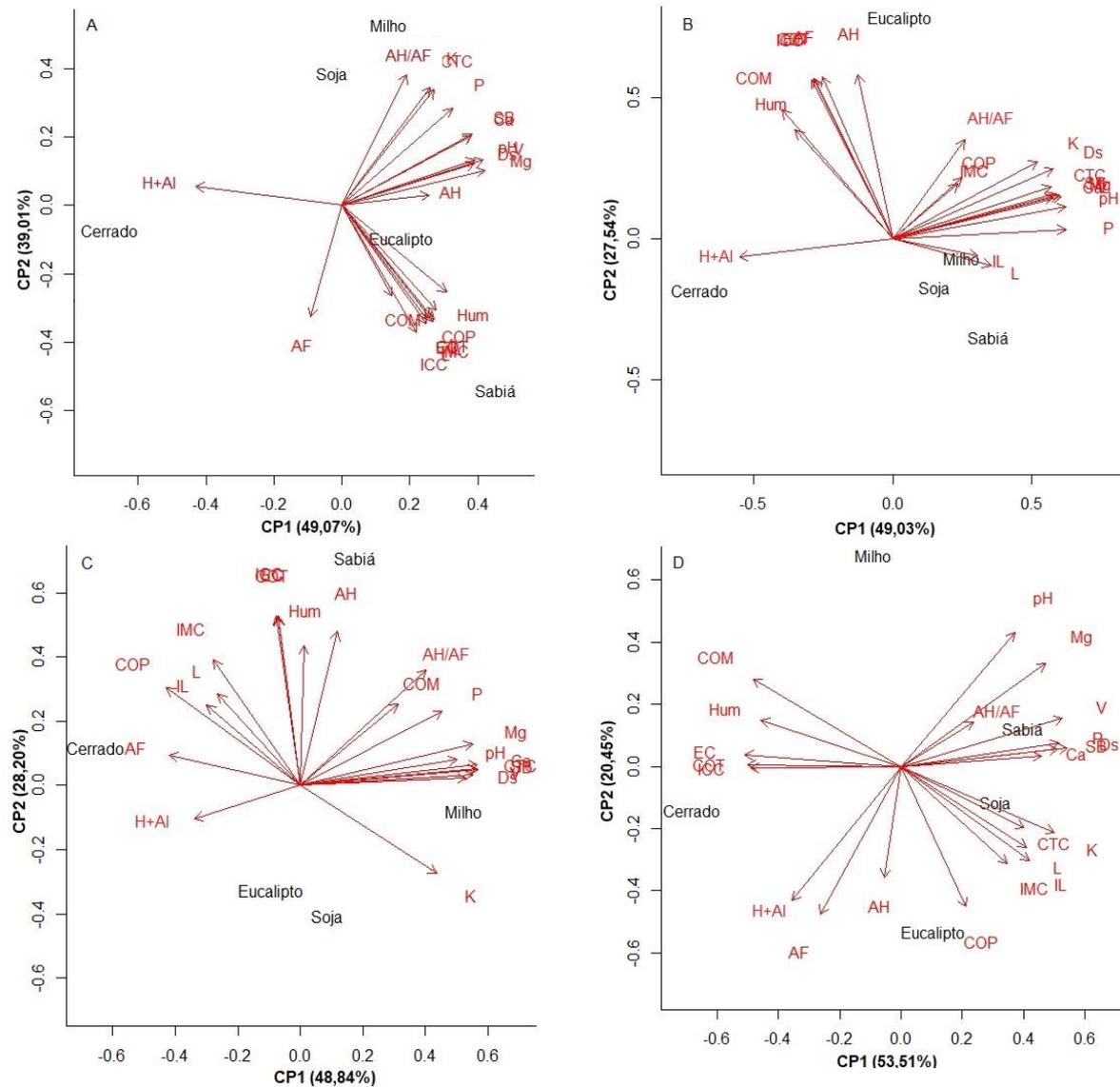
Na camada de 0,2-0,3 m o RS esteve associado as variáveis que apresentaram escores positivos para o CP2 como COT, AH, HUM, EC e ICC (Figura 5C). Para o ERM na mesma camada, as variáveis que apresentaram escores positivos para o CP1 como Ca, Mg, CTC, SB e V estiveram associadas a este manejo (Figura 5C).

Na camada de 0,3-0,5 m o RE esteve associado as variáveis que apresentaram escores negativos para o CP2, como H+Al, AH, AF e COP (Figura 5D). Ainda, o CN esteve atrelado ao COT e EC (escores negativos para CP1) e o ERM e RS ao pH (escores negativos para CP2).

**Tabela 5.** Coeficientes de pesos (auto vetores), autovalores e variância explicada por cada componente principal (CP1 e CP2) para atributos químicos do solo, carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono, labilidade, índice de compartimento do carbono, labilidade e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m. Bom Jesus, PI, 2019.

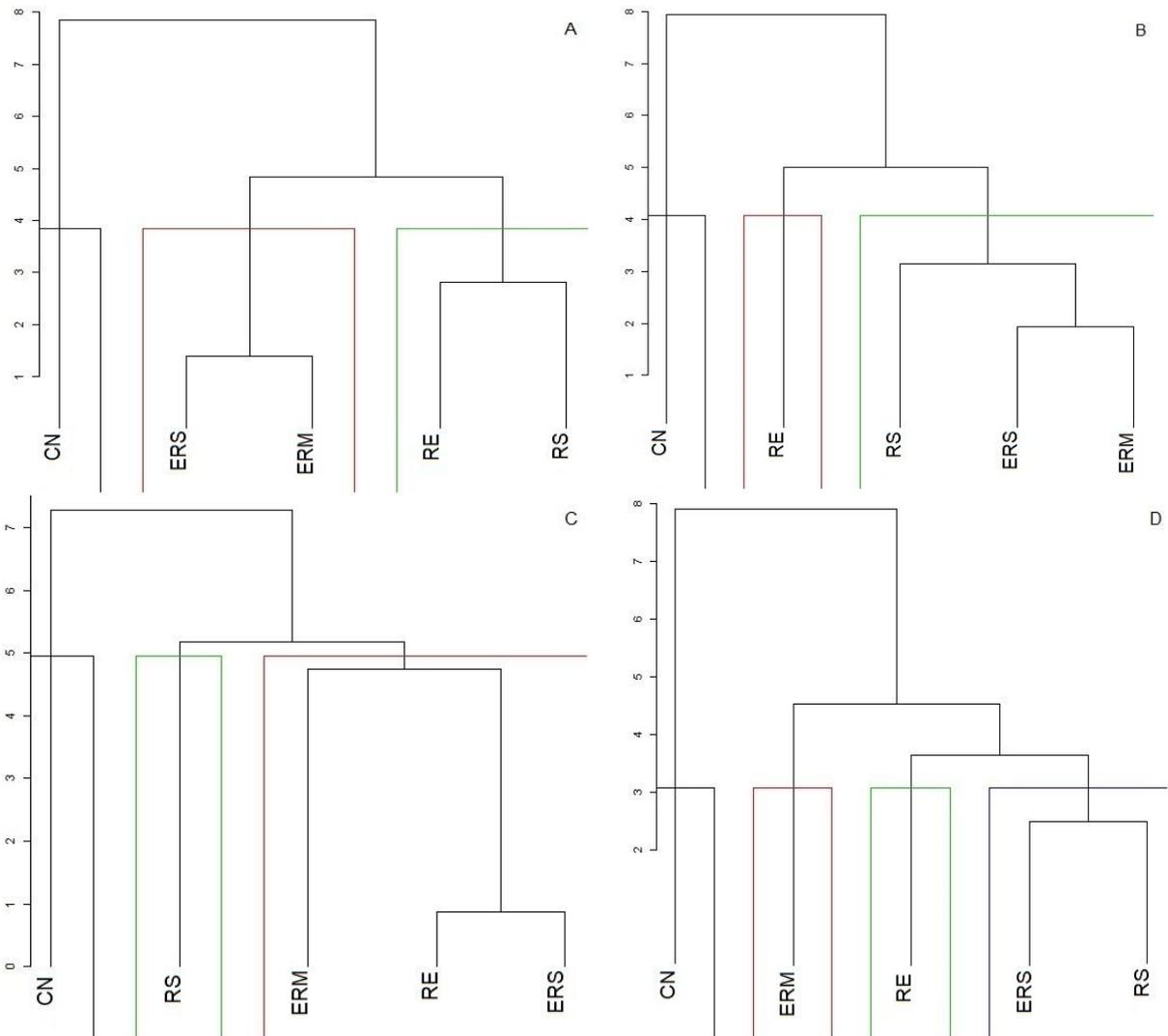
Atributos	0-0,1 m		0,1-0,2 m		0,2-0,3 m		0,3-0,5 m	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
pH	0,27	0,11	0,30	0,07	0,27	0,06	0,19	0,35
P	0,23	0,22	0,30	0,02	0,24	0,16	0,26	0,06
K	0,18	0,27	0,25	0,17	0,23	-0,19	0,25	-0,17
Ca	0,27	0,16	0,27	0,09	0,30	0,05	0,23	0,03
Mg	0,29	0,08	0,29	0,10	0,29	0,09	0,24	0,27
H+Al	-0,30	0,04	-0,26	-0,04	-0,18	-0,07	-0,18	-0,35
CTC	0,19	0,26	0,27	0,12	0,30	0,04	0,20	-0,16
SB	0,27	0,16	0,28	0,10	0,30	0,03	0,25	0,04
V	0,29	0,10	0,29	0,10	0,30	0,02	0,26	0,12
COT	0,18	-0,26	-0,13	0,36	-0,04	0,37	-0,25	0,00
AF	-0,06	-0,25	-0,12	0,36	-0,22	0,07	-0,13	-0,38
AH	0,18	0,02	-0,06	0,37	0,06	0,34	-0,03	-0,29
Hum	0,21	-0,20	-0,17	0,24	0,01	0,31	-0,23	0,12
AH/AF	0,13	0,30	0,12	0,22	0,22	0,25	0,12	0,12
COP	0,19	-0,24	0,12	0,14	-0,23	0,21	0,10	-0,36
COM	0,10	-0,21	-0,19	0,29	0,17	0,18	-0,24	0,23
Ds	0,27	0,09	0,28	0,16	0,28	0,02	0,27	0,05
EC	0,17	-0,26	-0,13	0,36	-0,04	0,37	-0,25	0,03
L	0,17	-0,27	0,17	-0,06	-0,14	0,20	0,20	-0,21
ICC	0,15	-0,29	-0,14	0,36	-0,04	0,37	-0,24	0,00
IL	0,19	-0,26	0,15	-0,04	-0,16	0,18	0,21	-0,24
IMC	0,19	-0,26	0,11	0,12	-0,15	0,28	0,17	0,25
Autovalores	10,79	8,58	10,78	6,06	10,74	6,20	11,77	4,49
Variância total (%)	49,07	39,01	49,03	27,54	48,84	28,20	53,51	20,45
Variância acumulada (%)	49,07	88,09	49,03	76,57	48,84	77,05	53,51	73,96

pH=potencial hidrogeniônico; P=fósforo; K=potássio; Ca=cálcio; Mg=magnésio; H+Al=acidez potencial; CTC=capacidade de troca de cátions; SB=soma de bases; V=saturação por bases; COT=carbono orgânico total; C-FAF=carbono na fração ácido fúlvico; C-FAH=carbono na fração ácido húmico; C-HUM= carbono na fração humina; AH/AF=relação na fração ácido húmico ácido fúlvico; COP=carbono orgânico particulado; COM=carbono orgânico associado aos minerais; Ds=densidade do solo; EC=estoque de carbono; L=labilidade; ICC=índice de compartimento do carbono; IL=índice de labilidade; IMC= índice de manejo do carbono.



**Figura 5.** Biplot entre a relação de atributos químicos do solo, carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D). P=fósforo; K=potássio; Ca=cálcio; Mg=magnésio; H+Al=acidez potencial; CTC=capacidade de troca de cátions; SB=soma de bases; V=saturação por bases; COT=carbono orgânico total; C-FAF=carbono na fração ácido fúlvico; C-FAH=carbono na fração ácido húmico; C-HUM= carbono na fração humina; AH/AF=relação na fração ácido húmico ácido fúlvico; COP=carbono orgânico particulado; COM=carbono orgânico associado aos minerais; Ds=densidade do solo; EC=estoque de carbono; L=labilidade; ICC=índice de compartimento do carbono; IL=índice de labilidade;IMC= índice de manejo do carbono.

A análise de agrupamento evidencia a dissimilaridade entre os diferentes componentes do sistema silviagrícola e CN a partir da análise conjunta das variáveis de solo (Figura 6). Analisando-se o dendrograma para a camada de 0-0,1 m houve a formação de três grupos, sendo um formado pelo RS e RE e o outro grupo foi formado pelos ERS e ERM (Figura 6A).



**Figura 6.** Dendrograma de dissimilaridade entre atributos químicos do solo em carbono orgânico total, fracionamento químico, fracionamento físico, densidade do solo, estoque de carbono e índice de manejo do carbono do solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola na camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D). Bom Jesus, PI, 2019. P=fósforo; K=potássio; Ca=cálcio; Mg=magnésio; H+Al=acidez potencial; CTC=capacidade de troca de cátions; SB=soma de bases; V=saturação por bases; COT=carbono orgânico total; C-FAF=carbono na fração ácido fúlvico; C-FAH=carbono na fração ácido húmico; C-HUM= carbono na fração humina; AH/AF=relação na fração ácido húmico ácido fúlvico; COP=carbono orgânico particulado; COM=carbono orgânico associado aos minerais; Ds=densidade do solo; EC=estoque de carbono; L=labilidade; ICC=índice de compartimento do carbono; IL=índice de labilidade;IMC= índice de manejo do carbono.

Para a camada 0,1-0,2 m formaram-se três grupos, sendo um grupo maior com os componentes ERS, ERM e o RS, outro grupo pelo RE e outro pelo CN (Figura 6B). Na camada de 0,2-0,3 m ocorreu o mesmo, com a formação de três grupos, sendo um formado pelo ERS, RE e ERM, outro pelo RS e outro grupo pelo CN (Figura 6C). Já na camada de 0,3-0,5 m houve a formação de quatro grupos, sendo um pelo RS e ERS, outro pelo RE, outro pelo ERM e outro pela área de CN (Figura 6D).

### 3.2 Discussão

Variações dos atributos químicos do solo são consequências de complexas interações dos processos de sua formação e de práticas de manejo do solo e da cultura, provocadas pelas adubações e calagens sucessivas e irregulares com impacto principalmente nas camadas superficiais do solo (CARNEIRO et al., 2016). Essas práticas que não ocorrem em um ambiente natural, no caso da área de mata, contribuíram para os resultados de pH mais baixo, mas em profundidade é possível observar que o pH do componente RE também diminuiu, diferindo do outro componente florestal (RS), o que pode ser justificado pelo maior incremento de altura e consequente de biomassa entre o eucalipto e o sabiá, ou seja, as raízes exsudam ácidos orgânicos, os quais contribuem com acidificação do meio. Dessa forma, o renque de eucalipto acidificou o ambiente em maior proporção que o renque de sabiá.

Os resíduos vegetais causam mudança do pH pelos ácidos orgânicos, os quais, contribuem no tamponamento da acidez e variação do pH em solos ácidos (COSTA et al., 2011), como acontece nos Latossolos. A taxa de degradação e liberação de ácidos orgânicos pode, também, ajudar a justificar a diferença entre os dois componentes florestais (RE x RS).

A baixa disponibilidade do P é característica natural de solos do Cerrado, principalmente Latossolos, por apresentar baixa disponibilidade de cátions básicos e nutrientes (BOTTEGA et al., 2013; SILVA, 2013), isso pode ser observado ao analisar o componente CN; para os renques, estes se diferenciam, sendo que o renque de sabiá apresentou maiores concentrações em profundidade, o que pode ser explicado por ser uma espécie nativa, com maior eficiência de uso do elemento.

As maiores concentrações de cátions básicos e soma de bases, não estiveram atreladas a área de referência (CN), o que é justificado ao manejo

utilizado nos renques e entre renques pelas adubações, calagem, além dos restos culturais, o que contribui com a reciclagem dos nutrientes, extraídos pelas culturas anteriores (FREITAS et al., 2014).

Resultados semelhantes para Ca, Mg e SB nas camadas de 0-0,2 m foram encontrados por Campos et al. (2011) no Cerrado piauiense, ao avaliar os atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo do solo, com a área de Cerrado nativo apresentando os menores resultados.

Os resultados para COT (Tabela 3) podem estar relacionados à ausência de perturbação do solo nos renques, que favorece o maior conteúdo e manutenção da matéria orgânica do solo, pois, de acordo com Costa et al. (2020) a ausência de operações de cultivo resulta em menor taxa de decomposição/mineralização resultando na manutenção e acúmulo de matéria orgânica do solo, contribuindo para as maiores concentrações de COT nesses componentes.

Além disso, as raízes são as principais fontes de COT em profundidade (SHAHBAZ et al., 2017), isso em espécies florestais com seus diferentes sistemas radiculares podem também ter contribuído para os valores mais altos de COT nos renques. Os menores resultados estão relacionados à presença de C prontamente disponível (LOPES, et al. 2015). Contrário ao presente estudo, Nanzer et al. (2019) obtiveram maiores teores de COT nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m em área de vegetação nativa de Cerrado (1,13 e 1,04 dag kg<sup>-1</sup>), comparando solos cultivados sob diferentes sistemas de uso. Essas diferenças podem estar relacionadas ao clima da região do presente estudo.

Os componentes florestais proporcionaram maiores concentrações C-FAF, sendo dessa forma, vantajoso para sistemas integrados, pois esta fração tem a capacidade de acumular C nas substâncias húmicas. Valladares et al. (2016), destacam que o C-FAF pode passar para camadas mais profundas e sofrer polimerização ou mineralização, o que reduz sua presença no solo, por ser uma fração mais solúvel em relação aos C-FAH e C-HUM, mas nos componentes avaliados nota-se maior concentração na camada superficial, podendo estar relacionado ao teor de MO presente nessa camada, mas também ao aporte de material vegetal (serapilheira), a qual permanece no sistema.

Loss et al. (2014) obtiveram maiores valores para C-FAF com eucalipto nas camadas de 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m e atribuíram a isso à serapilheira, a qual possui

maiores teores de lignina e polifenóis, contribuindo para a atuação dos microrganismos e favorecendo o processo de umidificação.

O C-FAH possui maior peso molecular e concentração de carbono aromático, o que torna essa fração mais estável, mas também aumenta o tempo necessário para sua formação, algo que pode explicar a maior presença dessa fração na área de eucalipto, por ser um ambiente mais estável (SILVA et al., 2017).

A razão de ter maior quantidade de humina em área de floresta nativa e nos componentes RS e RE se atribui ao aumento no conteúdo de folhas, ramos e galhos, que são de difícil decomposição (MOREIRA; COSTA, 2004), além disso, há menor perturbação do solo nesses locais favorecendo o acúmulo de carbono dessa fração.

Outra forma também verificada de incremento de carbono na fração humina é através do plantio direto (FERNANDES et al., 2015). Assim, vale ressaltar que a área ERM após a colheita dos grãos, recebeu aporte de palhada de milho por dois anos sucessivos, cultura esta reconhecida por aportar valores significativos de massa vegetal (a cada 1 t de grão aporta-se 2 t de massa seca da parte aérea); o que pode justificar o destaque na concentração dessa variável (C-HUM). As menores concentrações de C-HUM no ERS estão associadas a menor adição de resíduos de plantas em comparação ao milho, e cuja palha apresenta menor relação C/N, contribuindo para maior degradação da matéria orgânica do solo.

A relação AH/AF nos componentes ERS e ERM apresentaram valores acima de 1, o que favorece para o processo de humificação, polimerização e estabilização da matéria orgânica, indicando maior formação de AH em relação aos AF (EBELING et al., 2011). Baixos valores da relação AH/AF indicam evolução limitada da MO adicionada ou adição recente de material vegetal, que aumenta, inicialmente, o conteúdo de ácidos fúlvicos, fração essa com maior solubilidade e mobilidade através do solo (DORTZBACH et al., 2020; ROSA et al., 2017).

Nos componentes RS e RE houve superioridade para a fração COP, o que pode ser justificada pela maior deposição de material orgânico, contribuindo para a manutenção e aumento do teor das frações lábeis da matéria orgânica. Os maiores valores de COP normalmente são verificados na camada superficial pela maior introdução de resíduos vegetais e decomposição acentuada nesta camada (NANZER et al., 2019). Esses mesmos autores afirmam que a fração COM promove

a estabilização da MOS em longo prazo, principalmente em profundidade, algo que foi verificado com o RE e ERM com maiores valores.

A menor densidade do solo ( $D_s$ ) apresentada pelo CN foi proporcionada pela presença de material orgânico oriundo de folhas e ramos e nenhum distúrbio devido a passagem de máquinas; contudo ela se assemelhou aos componentes RS, ERS e ERM, devido à presença tanto de resíduos da espécie florestal quanto pelos resíduos das culturas cultivadas nos entre renques, diminuindo a densidade.

Pragana et al. (2012) considera máximo o valor de densidade de 1,70-1,80 g  $\text{cm}^{-3}$  para solos da mesma região de estudo e ao analisar os resultados, podemos observar que todos os valores estiveram abaixo do limite crítico, isso de acordo com Macedo (2009), deve-se aos sistemas integrados, que diminuem a densidade do solo e a compactação em relação a sistemas exclusivos, resultados esses verificados, também por Assis et al. (2019), Sales et al. (2018) e Stone et al. (2015).

Ademais é importante relatar que entre os componentes do sistema silviagrícola estudado há duas leguminosas, a soja e o sabiá, contudo há diferença na composição dos resíduos deixados pelas duas culturas; o sabiá apresenta elevado valor de lignina, que é um atributo que impacta nas taxas de decomposição e mineralização de nutrientes (PRIMO et al., 2018).

O conteúdo de COT é determinante para os resultados de EC, cujos menores valores estiveram associados ao ERS, o que se pode atribuir ao aumento no consumo do C prontamente disponível pela biomassa microbiana do solo e por meio da exportação de C pelas culturas anuais, algo que pode ter ocorrido nas áreas agrícolas do presente estudo (ALHO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2019).

Costa et al. (2020) acrescentam ainda que o estoque de C tende a aumentar em áreas sujeitas a práticas de conservação (consórcio e sucessão), devido à maior proteção física de compostos orgânicos contra a decomposição microbiana e, conseqüentemente, maior oclusão de C nos agregados do solo, além da química de proteção de compostos orgânicos através da interação desses compostos com minerais e cátions do solo.

Guareschi; Pereira; Perin (2012), afirmam que a área de mata nativa pode depositar 107 Mg  $\text{ha}^{-1}$  de resíduos vegetais na superfície do solo, valor esse superior a uma área só com plantio direto com pelo menos quinze anos (7,85 Mg  $\text{ha}^{-1}$ ), contribuindo para os teores de COT. Já para o eucalipto, Gatto et al. (2010), avaliando várias regiões, tiveram como resultado para estoque de carbono aos sete

anos de plantio, valores variando de 30-40 t ha<sup>-1</sup> oriundo dos resíduos (casca + folhas + galhos + raízes + matéria orgânica) e 80-141 t ha<sup>-1</sup> no solo na camada de 0-100 cm. Costa et al. (2020) relatam que o eucalipto favorece o aumento de 7 t ha<sup>-1</sup> de carbono em profundidade de 0,2-0,6 m. Adicionalmente, as raízes do componente árvore dos sistemas agroflorestais, produzem exudados que são uma fonte essencial de C e nutrientes (ISAAC; BORDEN, 2019). Isso demonstra que a presença destes componentes assim como do RS no sistema, gera reserva e incorpora carbono ao solo.

As características edafoclimáticas da área de estudo são alguns dos fatores que condicionam a capacidade de armazenar carbono, impactando no estoque de carbono acumulado (Figura 4). Isso aliado as espécies vegetais podem contribuir para o carbono armazenado (ANTONIO et al., 2019), principalmente quando há uso de diferentes espécies numa mesma área. O eucalipto, no caso, é capaz de capturar e imobilizar cerca de 50 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> da atmosfera (GATTO et al., 2010).

O sequestro de carbono pode ser avaliado usando como indicador a relação de estratificação do carbono. Essa variável reflete o grau de organização e o funcionamento dos ecossistemas e tem como princípio comparar uma camada superficial com elevada influência das práticas de manejo antrópicas com outra camada com baixo impacto dessas práticas (FERREIRA et al., 2012).

A falta de significância para estratificação do COT (Figura 5A) pode ser explicada devido ao sistema de plantio direto realizado nos entre renques, onde ocorre deposição de resíduos culturais, menor revolvimento do solo, assim como a rotação de culturas e conseqüentemente o comportamento do carbono se equipara as áreas de renques e Cerrado, exceto pela correção e adubação do solo constantes, o que pode influenciar a dinâmica da matéria orgânica (mineralização). Aliado a isso, nota-se que não há um padrão com um determinado componente com maiores teores de COT em profundidade (Tabela 3).

Matias et al. (2012) obtiveram os mesmos resultados ao comparar a estratificação do carbono de uma área de plantio direto em relação a uma área de mata nativa. O contrário foi obtido por Troian et al. (2020), encontrando maiores valores de estratificação para mata nativa.

A maior relação de estratificação para o ERM (Figura 5B) indica que a taxa de conversão do carbono desse componente foi superior aos demais. Isso pode estar relacionado ao uso do plantio direto e o cultivo sucessivo por dois anos desta

cultura, que aporta maior biomassa em relação ao entre renque com cultivo de soja, conforme discutido anteriormente; o que proporciona menor perda relativa de carbono via respiração, e maior acúmulo de carbono no solo em longo prazo (BARBIERI et al., 2019), por não destruir os agregados formados, manter a cobertura do solo (ALMEIDA; SANCHES 2014), além da alta relação C/N da palhada do milho (VALLADARES et al., 2016).

Diferentemente, a área de soja já estava no segundo ano em sucessão ao milho, e isso aliado a menor quantidade de palhada em relação ao milho e degradação mais rápida por ter menor relação C/N (ROSA et al., 2017; SCHOLLES et al., 2021), influenciaram os resultados. Então, quanto maior a relação de estratificação, maior a ciclagem de C, resultando em maior sequestro de carbono do solo (BRIEDIS et al. 2012).

Os resultados para L, IL e IMC (Tabela 4), demonstram que o componente RS foi eficiente na conservação do carbono do solo. Nota-se que os componentes com a presença de espécies florestais promoveram maiores ICCs, o que denota o potencial do RE e RS em manter o compartimento de carbono em comparação à área de referência. Esses mesmos componentes apresentaram IMC acima de 100, indicando impactos positivos na qualidade do solo, isso representa mudanças nos estoques de carbono considerados lábeis no solo e que as práticas de manejo são favoráveis à manutenção da matéria orgânica do solo (GUIMARÃES et al., 2014; SCHIAVO et al., 2011). Isernhagen et al. (2017), comparando o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com sistemas exclusivos obtiveram para o eucalipto valores que variaram de 47-80% no IMC nas camadas de 0-0,3 m.

Os menores valores de IMC para o ERM podem estar relacionados ao fato que cultivos que apresentam leguminosas como a soja (ERS), cultivada em sucessão há dois anos no presente trabalho, podem apresentar maiores IMC do que cultivos com gramíneas como o milho, devido a adição de carbono ao solo pelos resíduos com menor relação C/N das leguminosas (VIEIRA, 2007).

Na análise dos componentes principais (Tabela 5), atinge-se o objetivo da ACP quando um número relativamente pequeno de componentes extraídos possuírem a capacidade de explicar a maior parte da variabilidade nos dados originais (RIBAS; VIEIRA, 2011). Desta maneira, o terceiro componente principal mesmo apresentando autovalor maior que um não foi empregado, pois a variância acumulada apresentou valores superiores a 80%. A relação entre as variáveis e os

componentes principais foi considerada relevante quando apresentaram coeficientes de peso de 0,3.

No dendrograma para a camada de 0-0,1 m, há formação dos três grupos sendo um deles o RS e o RE, o que pode ser justificada pelas variáveis de carbono, como COT, EC,L, ICC, IL e IMC, conforme apresentado na análise de componentes principais para a mesma camada. O outro grupo foi formado pelos entre renques (ERS e ERM), o que pode ser justificado pelos maiores valores de atributos químicos, como K, Ca e Mg, e outro grupo formado pela área de CN (Figura 7A).

As diferenças de agrupamento existentes nas camadas 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,2-0,3 resultam das variações de fertilidade natural da mata e aquelas decorrentes de diferentes aportes de fertilizantes nas áreas cultivadas, além de ser influenciada pelo manejo do solo na implantação e manutenção da cultura, assim como do uso de implementos agrícolas (FREITAS et al., 2015).

De maneira geral, nas camadas de 0,1-0,2 e 0,3-0,5 m o RE se diferenciou dos demais módulos (RS, ERS e ERM) do sistema silviagrícola pelas variáveis ácidos húmicos (AH) e fúlvicos (AF), conforme verificado na análise de componentes principais. A área de Cerrado (CN) apresentou maior dissimilaridade de todos os demais módulos do sistema silvipastoril (renques e entre renques). Essa dissimilaridade entre as áreas e nas profundidades estudadas mostradas pelo dendrograma reforça que o uso do solo altera suas propriedades físicas e químicas, devido ao manejo e à capacidade que cada tipo de uso possui (PANTOJA et al., 2019). Então, verifica-se que a interação entre as espécies florestais e culturas agrícolas é benéfica para implantação do sistema silviagrícola com alterações nas concentrações químicas favoráveis a fertilidade do solo, mas vale ressaltar que o CN se destaca para as características de Ds e estoque de carbono.

Esses resultados assemelham-se aos encontrados por Freitas et al. (2014) ao avaliar diferentes manejos, onde a área de mata nativa também apresentou maior dissimilaridade dos outros agrupamentos. Os autores acrescentam ainda que essas diferenças de agrupamento resultam dos atributos analisados, possibilitando verificação mais generalizada da qualidade das áreas estudadas, conforme análise de componentes principais.

#### **4. CONCLUSÕES**

O sistema silviagrícola agrega melhorias na fertilidade do solo, assim como no carbono do solo do solo.

O componente ERM proporciona maior relação de estratificação do carbono, contribuindo para maior qualidade do solo na camada superficial e assim como o ERS apresenta maior estabilidade da matéria orgânica medido pela relação AH/AF.

Os renques com espécies florestais contribuem para o aumento das frações carbono dos ácidos fúlvicos e ácidos húmicos, assim como do estoque de carbono.

A presença do componente RS contribui para os teores de fósforo em profundidade assim como colabora para melhoria do índice de manejo do carbono, o que proporciona conservação do carbono do solo.

O RE e o CN proporcionam maior estoque de carbono acumulado do solo.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em cambissolo e argissolo. **Pesquisa agropecuária tropical**, v. 44, p. 246-254, 2014.
- ALMEIDA, R.F.; SANCHES, B. C. Disponibilidade de carbono orgânico dos solos no cerrado brasileiro. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 4, p. 259-264, out./ dez., 2014.
- ANTONIO, R.T.; RODRÍGUEZ, E. A.; PÉREZ, J. J.; CALDERÓN, O. A. A.; GARZA, E. J. T.; Accumulated carbon estimation in gmelina arbórea roxb. from tlatlaya, estado de México with allometric equations. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**. v.10, n.55, 2019.
- ARAÚJO, S. R.; PEDROSO, A. J. S.; SOARES, I. R.; RODRIGUES, S.; MORAES, E. T. de; TORRES, L. C. Atributos físico-químicos do solo em áreas de conversão da Amazônia Oriental em pastagem e plantio direto. **Jornal Aplicado em Hidro-Ambiente e Clima**, v. 1, n. 1, p. 25-37, 2019.
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J.de M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Agrarian**, Dourados, v.12, n.43, p.57-70, 2019.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFIRIODA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1-12, 2011.
- BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de.; **Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações**. In: BUNGENSTAB, D. (Ed.). **Sistemas de integração a produção sustentável: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF)**. 2 ed. Brasília: Embrapa, 2012. p.11-18.
- BARBIERI, M.; DOSSIN, M. F.; NORA, D. D.; SANTOS, W. B. dos; BEVILACQUA, C. B.; ANDRADE, N. de; BOENI, M.; DEUSCHLE, D.; JACQUES, R. J. S.; ANTONIOLLI, Z. I. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n.1, p.121-130, 2019.
- BENITES, V. de M.; MACHADO, P. L. O. de A.; MADARI, B. E.; FONTANA, A. **Fracionamento químico da matéria orgânica**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2017. Cap. 6, pag. 401-414.

- BLAIR, G.J.; LEFROY, B.; LISLE, L. Soil carbon fractions, based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, p. 1459-1466, 1995.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v.44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; DE-CARLI, R. S.; ANTUNES, E. A. P.; SIMON, Lucas; ROMKO, M. L.; ELIAS, L. S.; FERREIRA, A. de O. Particulate soil organic carbon and stratification ratio increases in response to crop residue decomposition under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p.1483-1490, 2012.
- CAMPANHA, M. M.; COSTA, T. C. e C. da; GONTIJO NETO, M. M. **Crescimento, estoque de carbono e agregação de valor em árvores de eucalipto em um sistema de Integração LavouraPecuária-Floresta (ILPF) no cerrado de Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2017. 24 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 157).
- CAMPOS, D. V. B. de; MACHADO, P. L. O. de A. **Fracionamento físico da matéria orgânica**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, Cap. 6, pag. 401-414, 2017.
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; IWATA, B. de F.; NÓBREGA, J. C. A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.46, n.12, p.1681-1689, dez., 2011.
- CARNEIRO, J.; S. DA S.; FARIA, Á. J. G.DE; FIDELIS, R. R.; SILVA NETO, S. P. DA; SANTOS, A. C. DOS; SILVA, R. R. DA. Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no cerrado. **Scientia Agraria**, vol. 17, n. 3, p. 38-49, 2016.
- CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 15-43, 2015.
- COSTA, A. A.; DIAS, B. de O.; FRAGA, V. da S.; SANTANA, C. C.; SILVA, N. da. Carbon and nitrogen stocks in soils under different forms of use in the Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.8, p.528-533, 2020.
- COSTA, M. S. S. de M.; PIVETTA, L. A.; STEINER, F.; COSTA, L. A. de M.; CASTOLDI, G.; GOBBI, F. C. Atributos químicos do solo sob plantio direto afetado por sistemas de culturas e fontes de adubação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n. 4, p. 579-587, 2011.
- DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A. L.; ISEMHAGEN, E. C. C. Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de

integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.8, p.639-647, 2014.

DORTZBACH, D.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; SANTOS, O. A. Q. Compartimentos da matéria orgânica do solo em vinhedos altomontanos de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 10677–10691, 2020.

EBELING, A. G.; CUNHA DOS ANJOS, L. H.; PEREIRA, M. G.; PINHEIRO, É. F. M.; VALLADARES, G. S. Substâncias húmicas e relação com atributos edáficos. **Bragantia**, v.70, n.1, 2011.

FERNANDES, M. M.; PRAGANA, R. B.; PINHEIRO, E. F. M.; NÓBREGA, J. C. A.; FERNANDES, M. R.de M. Frações orgânicas do solo em áreas de cerrado piauiense sob plantio direto. **Energia Agricultura**, v.30, n.2, p.189-192, 2015.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A.H. B. M. **Atualização dos métodos de cálculo de estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2013. 5 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 95).

FERREIRA, A. de O.; SÁ, J. C. de M.; HARMS, M. G.; BRIEDIS, S. M. C.; QUADROS NETTO, C.; SANTOS, J. B. dos; CANALLI, L. B. dos S.; DIAS, C. T. dos S. Relação de estratificação como indicador do sequestro de carbono em macroagregados de Latossolo sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.42, n.4, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista brasileira de biometria**, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019.

FRANZLUEBBERS, A. J. Razão de estratificação da matéria orgânica do solo como indicador de qualidade do solo. **Soil and Tillage Research**, v.66, n. 2, p.95–106, 2002.

FREITAS, L. DE; CASAGRANDE, J.C.; OLIVEIRA, I. A. DE; SOUZA JÚNIOR, P. R. DE; CAMPOS, M. C. C.; Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista agroambiente on-line**, v. 8, n. 2, p. 155-164, 2014.

FREITAS, L. de; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A. de; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, L. S.. Técnicas multivariadas na avaliação de atributos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2015.

FREITAS, L. de; OLIVEIRA, I. A. de; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, v. 26, n.1-2, p. 08-25, 2017.

GATTO, A.; BARROS, N. F. de; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. da; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, E. M. de A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.1069-1079, 2010.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de Resíduos Vegetais, Matéria Orgânica Leve, Estoques de Carbono e Nitrogênio e Fósforo Remanescente Sob Diferentes Sistemas de Manejo no Cerrado Goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 909-920, 2012.

GUIMARÃES, D.V.; GONZAGA, M.I.S.; MELO NETO, J.O. Gerenciamento da matéria orgânica do solo e armazenamento de carbono em fruteiras tropicais. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.18, n.3, p.301-306, 2014.

ILPF em números: região 03-MATOPIBA. Embrapa, 2017.

INMET. **Normal climatológica**. Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> Acesso em: dezembro de 2017.

ISAAC, M. E.; BORDEN, K. A. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. **Plant and Soil**, v.444, p.1-19, 2019.

ISERNHAGEN, E. C. C.; RODRIGUES, R. de A. R.; DIEL, D.; MATOS, E. da S.; CONCEIÇÃO, M. C. G. da. Estoques de carbono lábil e total em solo sob integração lavoura-pecuária-floresta na região de Transição Cerrado/Amazônia. **Nativa**, v.5, esp., p.515-521, 2017.

KÖPPEN, W; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, n.p. 1928.

LOPES, E. L. N.; FERNANDES, A. R.; TEIXEIRA, R. A.; SOUSA, E. S. de; RUIVO, M. de L. P. Soil attributes under different crop management systems in an Amazon Oxisols. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p.428-435, 2015.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M.G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em santa teresa, ES. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1347-1357, 2014.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista brasileira de zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009.

MATIAS, S. S. R.; CORREIA, M. A. R.; CAMARGO, L. A.; FARIAS, M. T. de F.; CENTURION, J. F.; NÓBREGA, J. C. A. Influência de diferentes sistemas de cultivo nos atributos físicos e no carbono orgânico do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.7, n.3, p.414-420, 2012.

MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; REIS JUNIOR, F.B.; FERNANDES, M.F.; CHAER, G.M., MERCANTE, F. M.; ZILLI, J.E. **Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade?** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 31p. (Doc. 246).

MOREIRA, A.; COSTA, D.G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.39, p. 1013-1019. 2004.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P. DE; SILVA, J. R. M. DA; PAULINO, L. A.; Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, 2019.

PANTOJA, J. C. M.; CAMPOS, M. C. C.; LIMA, A. F. L. de; CUNHA, J. M. da; SIMÕES, E. L.; OLIVEIRA, I. A. de; SILVA, L. S. Multivariate analysis in the evaluation of soil attributes in areas under different uses in the region of Humaitá, AM. **Revista Ambiente & Água**. Taubaté, v. 14, n. 5, e2342, 2019.

PRAGANA, R. B.; SOUZA JUNIOR, V. S. de; MOURA, R. dos S.; SOARES, J. M. Characterization of yellow latosols (oxisols) of serra do quilombo, in piauí state savanna woodlands – brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 832–840, 2016.

PRAGANA, R.B.; RIBEIRO, M.R.; NÓBREGA, J.C.A.; RIBEIRO FILHO, M.R.; COSTA, J.A. Qualidade física de latossolos amarelos sob plantio direto na região do cerrado piauiens. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.1591-1600. 2012.

PRIMO, A. A.; MELO, M. D.; PEREIRA, G. DE A. C.; SILVA, L. A.; FERNANDES, F. É. P.; SOUZA, H. A. DE. Potencial fertilizante da serapilheira de espécies lenhosas da Caatinga na recuperação de um solo degradado. **Revista Ceres**, v. 65, n. 1, p. 74–84, 2018.

R CORE TEAM (2017). R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.

RIBAS, J. R.; VIEIRA, P. R. da C. **Análise Multivariada com o uso do SPSS**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna. p. 272, 2011.

RIBEIRO, J. M.; FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 913-923, 2019.

ROSA, D. M.; NÓBREGA, L. H. P.; MAULI, M. M.; LIMA, G. P.; PACHECO, F. P. Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e soja. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 2, p. 221-230, 2017.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A.C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, Bárbara Maia. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na amazônia legal. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n.1, p.01-15, 2018.

SCHIAVO, O. A.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G.; SALTON, J. C. Índice de manejo de carbono e substâncias químicas do latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.46, n.10, p.1332-1338, 2011.

SCHOLLES, D.; LISBOA, B. B.; SÃO JOSÉ, J. F. B.; VARGAS, L. K. Atividade microbiana e permanência de resíduos vegetais em função de sua composição e disposição no solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 27, n. 1, p. 3–13, 2021.

SHAHBAZ, M.; KUZYAKOV, Y.; HEITKAMP, F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: mechanisms and controls. **Geoderma**, v.304, p.76-82. 2017.

SILVA, C. S. DA; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; ASSUNÇÃO, S. A. Spatialization of fractions of organic matter in soil in an agroforestry system in the atlantic forest, Brazil. **Cerne**. v.23, n.2, 2017.

SILVA, J. M. Análise espacial de atributos físicos em um latossolo cultivado em plantio direto. **Engenharia Ambiental**, v.10, n. 3, p. 27-38, 2013.

SILVA, J. R. M. da; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; REZENDE, J. V. O.; BARRETA, P. G. V.; ZUFFO, A. M. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, v.15, n.2, e6874, 2020.

SOUZA, J. F. D.; PERUSSO, R. L. S.; BONINI, C. S. B.; SOUZA, C. T.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; PEDRO, F. G. P. Atributos físicos, matéria orgânica do solo e produção de capim marandu em sistema de Integração lavoura-pecuária-floresta. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 1, p. 51–64, 2019.

STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; ALCÂNTARA, F.; FERREIRA, E. P. de B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho ácrico sob sistemas silviagrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.10, p.953–960, 2015.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. de P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em Diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.13, n.4, p.1447-1469, 2020.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; BENITES, V. de M.; DOS ANJOS, L. Helena C.; EBELING, A. G.; GUARESCHI, R. F. Carbon and nitrogen stocks and humic fractions in brazilian organosols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, 2016.

VIEIRA, F. C. B. **Estoque e labilidade da matéria orgânica e acidificação de um argissolo sob plantio direto afetados por sistemas de cultura e adubação nitrogenada**. 2007. 124p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p. 1127-1138, 2011.

### CAPÍTULO III

#### FRAÇÕES DE FÓSFORO INORGÂNICO EM DIFERENTES COMPONENTES DE SISTEMA SILVIAGRÍCOLA NO CERRADO PIAUIENSE

RESUMO- O fósforo (P) pode ser encontrado nas formas orgânicas e inorgânicas no solo, sendo considerado um atributo importante para avaliar a fertilidade do solo. O fracionamento do fósforo permite identificar as formas de P inorgânico, P-Al, P-Fe e P-Ca e verificar alterações no suprimento deste nutriente. Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a disponibilidade de fósforo em componentes de um sistema silviagrícola, por meio do fracionamento das formas inorgânicas de P ligadas ao Al, Fe e Ca. O estudo foi desenvolvido em Bom Jesus, PI; em um sistema silviagrícola com três anos de implantação, avaliando os diferentes componentes: (i) renque com eucalipto, (ii) renque com sabiá, (iii) entre renque com milho, (iv) entre renque com soja e (v) área de Cerrado nativo, como testemunha. Após três anos de implantação (safra 2018/2019), foram realizadas coletas de amostras de solo deformadas em transectos com distância de 15 m, totalizando quatro repetições em cada componente, nas camadas: 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m. Foram determinadas as concentrações de P disponível (Mehlich-1), as formas de P ligadas a Al (P-Al), ao Fe (P-Fe), e ao Ca (P-Ca), além de matéria orgânica e pH. Os dados foram submetidos à análise de variância e em função da significância submetidas a teste de médias. Os renques e entre renques não apresentaram diferença quanto ao pH, apresentando maiores valores em relação a área de referência. Quanto a matéria orgânica maiores valores foram obtidos com o renque de eucalipto. A concentração de P disponível foi maior no componente entre renque de milho. Não houve diferenças para os componentes florestais e agrícolas para P-Al e P-Fe nas camadas avaliadas. A fração P-Ca apresentou maior concentração nos componentes renque de eucalipto, entre renque de milho e de soja na camada de 0-0,1 m, entretanto na camada 0,1-0,2 m o entre renque com soja apresentou maiores valores para esta fração. A magnitude das formas de fósforo para os componentes do sistema silviagrícola é P-Al>P-Fe>P-Ca, e para o Cerrado nativo é P-Fe>P-Al>P-Ca. O entre renque de soja apresenta maiores concentrações das frações de fósforo.

**Palavras-chave:** Fracionamento do fósforo inorgânico, sistemas integrados; manejo do solo.

### CHAPTER III

#### INORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS IN DIFFERENT COMPONENTS OF THE FORESTRY SYSTEM IN THE CERRADO PIAUIENSE

ABSTRACT- Phosphorus (P) can be found in organic and inorganic forms in the soil, being considered an important attribute to assess soil fertility. Phosphorus fractionation allows identifying the forms of inorganic P, P-Al, P-Fe and P-Ca and verifying changes in the supply of this nutrient. The objective of this work was to evaluate the availability of phosphorus in components of a silviagricultural system, through the fractionation of inorganic forms of P linked to Al, Fe and Ca. The study was carried out in Bom Jesus, PI; in a silviagricultural system with three years of implementation, evaluating the different components: (i) row with eucalyptus tree, (ii) row with sabiá tree, (iii) between row with corn plant, (iv) between row with soybean plant and (v) area of Native savanna, as a witness. After three years of implantation (2018/2019 harvest), deformed soil samples were collected in transects with a distance of 15 m, totaling four repetitions in each component, in the layers: 0.0-0.1 and 0.1- 0.2 m. Concentrations of available P (Mehlich-1), forms of P bound to Al (P-Al), Fe (P-Fe), and Ca (P-Ca), as well as organic matter and pH were determined. Data were subjected to analysis of variance and, as a function of significance, subjected to mean test. The rows and between rows did not differ in terms of pH, with higher values in relation to the reference area. As for organic matter, higher values were obtained with the row of eucalyptus trees. The concentration of available P was higher in the component among corn plant rows. There were no differences for forest and agricultural components for P-Al and P-Fe in the evaluated layers. The P-Ca fraction showed the higher concentration in the components of eucalyptus herds, between corn and soybean herds in the 0-0.1 m layer, however in the 0.1-0.2 m layer between herring and soy it presented higher values for this fraction. The magnitude of phosphorus in different forms for the components of the forestry system is P-Al>P-Fe>P-Ca, and for the native Cerrado it is P-Fe>P-Al>P-Ca.

**Keywords:** inorganic phosphorus fractionation, integrated systems, soil fertility.

## 1. INTRODUÇÃO

As formas de P do solo variam de acordo com a natureza química do ligante e com a energia de ligação entre o nutriente e o solo, quanto à natureza do ligante o P pode ser encontrado como P orgânico diéster, P orgânico monoéster e P inorgânico em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos de Fe e de Al, sendo que essas formas de P apresentam diferentes capacidades de dessorção e reposição na solução do solo (SOUZA JÚNIOR et al., 2012). Os óxidos de Fe tem alta afinidade pelo fosfato e a dessorção por esses óxidos podem ser influenciadas pela matéria orgânica, principalmente em solos altamente intemperizados (FINK et al., 2016).

O P inorgânico é considerado uma medida eficaz para mensurar o suprimento de P no solo (CHENG et al., 2019). Ele pode ser absorvido diretamente pelas plantas, apresentando-se como um importante componente da fertilidade do solo usado para avaliar o nível de fertilidade pela distribuição das diferentes formas de fósforo (WU et al., 2018).

O fracionamento químico do fósforo identifica formas individuais de P inorgânico predominante nos solos, dentre elas o P adsorvido na superfície de óxidos de Al e Fe (P-Al e P-Fe) e associado ao Ca (P-Ca) (BURESH, 1999). Entre os métodos de fracionamento para quantificar essas frações, o de Chang e Jackson (1958) é o mais conhecido.

O P ligado ao Al e ao Fe são abundantes em solos ácidos altamente intemperizados, e o P associado ao Ca é predominante em solos calcários jovens de áreas áridas e semiáridas que geralmente têm pH alto, características estas que influenciam na mobilidade, biodisponibilidade e comportamento químico podendo ser transformadas de uma forma para outra dependendo das condições e manejo (MELESE; YLI-ALLA, 2016). Além disso, as frações de fósforo (P) do solo são importantes para a compreensão da dinâmica e disponibilidade de P no solo (CHANG; JACKSON, 1958; HOU et al., 2018).

O aumento da matéria orgânica gera incrementos de fósforo na solução do solo melhorando a capacidade de armazenamento (YANG; CHENG; YANG, 2019). Dessa forma, a utilização dos sistemas integrados (Silviagrícola) pode aumentar o teor de matéria orgânica gerando melhoria da qualidade do solo (GIONGO et al., 2021).

Com isso, levando em consideração a deficiência de P dos solos tropicais, o estágio avançado de intemperismo dos Latossolos do Cerrado e que o P disponível nos sistemas ILPF concentra-se nos primeiros 20 cm de solo (CAMÊLO et al., 2015; BEHLING et al., 2019), espera-se que as formas inorgânicas de P após o estabelecimento do sistema silviagrícola tenha efeito nas suas concentrações, mesmo com os incrementos anuais de P e aplicação de corretivos, especialmente nas formas ligadas ao Ca.

Existe a necessidade de estudos com a finalidade de avaliar como o sistema de manejo influencia as formas disponíveis de P e que caracterizem a variação dessas frações, principalmente na região do Cerrado, onde há escassez de trabalhos em ILPF. Assim, objetivou-se avaliar a influência de um sistema silviagrícola na disponibilidade de fósforo por meio do fracionamento das formas inorgânicas de P ligadas ao Al, ao Fe e ao Ca.

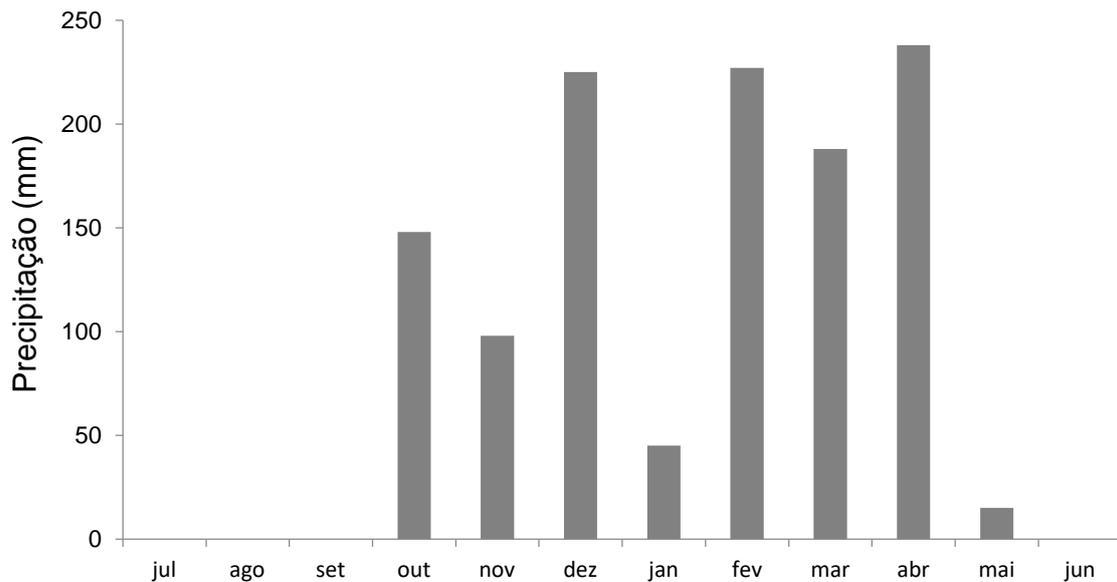
## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local e informações da área experimental

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Vô Desidério, situada na Serra do Quilombo, em Bom Jesus, Piauí (9°16'20"S; 44°44'56"O; 628 m de altitude), em área com declividade de 0,2%. De acordo com Pragma et al. (2016), o solo da região é classificado como LATOSSOLOS AMARELOS Distróficos. Antes da instalação do experimento foram coletadas amostras de solo na área, e posteriormente enviados para análise em laboratório utilizando a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017) (Tabela 1). O clima da área é do tipo Aw (tropical, com inverno seco) de acordo com Köpen; Geiger (1928), a temperatura média é de 26,7°C e a pluviosidade média de 1.002 mm (INMET, 2018). Na Figura 1, estão ilustrados os dados de precipitação pluvial durante o período de condução do experimento, com total de 951, 1.170 e 1.184 mm nas safras 2016/2017, 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente.

**Tabela 1.** Atributos químicos e granulometria do solo antes da implantação do ensaio, Bom Jesus, 2016.

Camadas	pH <sub>H2O</sub>	V	H+Al	Al	Ca	Mg	SB	CTC
m		%	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					
0,0-0,2	5,5	36	5,7	0,1	2,0	0,8	3,2	9,0
0,2-0,4	5,2	29	4,2	0,2	1,0	0,3	1,7	5,8
	P	K	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	m	M.O.	Argila	Silte	Areia
m	mg dm <sup>-3</sup>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	%	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
0,0-0,2	56,5	0,45	16,5	3	20	223	5	772
0,2-0,4	19,4	0,31	17,1	10	12	234	20	746



**Figura 1.** Valores médios da precipitação pluvial da safra 2018/2019.

Fonte: Estação Fazenda Colorado, Bom Jesus, PI.

A área experimental foi implantada na safra 2016/2017 e contempla módulos com 3 renques de espécies florestais, sendo um renque com oito linhas no espaçamento 4 x 3 m, e outros dois renques com três linhas no mesmo espaçamento mencionado, com dois entre renques (área de cultivo agrícola) de 34 m. O comprimento total dos três renques foi de 230 m, sendo 140 m ocupados com eucalipto e 90 m com sabiá. Nos entre renques, foram cultivados milho e soja. Para as avaliações também foi utilizada uma área de Cerrado nativo, próxima a área experimental.

No primeiro ano (safra 2016/2017), um dos entre renques (entre renque A) foi cultivado com milho. O outro entre renque (entre renque B), na safra 2016/2017, foi cultivado com soja e na safra seguinte (2017/2018), houve a inversão de cultivos. Na safra 2018/2019, manteve a mesma cultura cultivada da safra anterior (soja no entre renque A e milho no entre renque B).

Após três anos de implantação, para realização desta avaliação foram considerados os seguintes componentes do sistema silviagrícola: renque de eucalipto (RE), renque de sabiá (RS), entre renque com soja (ERS) (Figura 2A), entre renque com milho (ERM) (Figura 2B), e área de Cerrado nativo (CN), com coleta das amostras de solo no fim do período chuvoso da safra 2018/2019.



**Figura 2.** Entre renque com plantio de soja (A). Entre renque com plantio de milho (B).

Fonte: Silva (2019).

Na safra 2018/2019 antecipadamente ao plantio, foram aplicadas três toneladas de calcário (85% PRNT, >12% MgO) nas áreas de entre renque. Nesta safra a soja (ERS) foi adubada 400 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 170 kg ha<sup>-1</sup> de KCl em cobertura e o milho (ERM) foi fertilizado com 500 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 8-24-12 (NPK) e em cobertura recebeu 240 kg ha<sup>-1</sup> de ureia. A área dos renques de eucalipto e sabiá foram adubadas somente na implantação, as adubações foram procedidas de acordo com Sousa e Lobato (2004).

No entre renque de soja foi usado a cultivar M8644IPRO, empregando-se o espaçamento de 0,5 m entre fileiras, com população de 200.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Na semeadura, as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*. No entre renque de milho foi usado o híbrido simples Pioneer 30F35<sup>®</sup> cultivado em espaçamento de 0,5 m entre fileiras e população de 66.000 plantas po ha<sup>-1</sup>.

Nos componentes foram realizadas coletas de amostras de solo deformadas após a colheita da cultura. As amostras foram coletadas em transectos com distância de 15 m, totalizando quatro repetições em cada componente. Nesses transectos foram coletadas 5 amostras simples para formar uma composta. As camadas avaliadas foram: 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m e após a coleta. Em seguida as amostras foram secas à sombra e peneiradas.

Foram mensurados o pH em água (pH H<sub>2</sub>O), matéria orgânica (MO) e P disponível (Mehlich-1) segundo Teixeira et al. (2017) e o fracionamento de fósforo segundo Chang e Jackson (1957) com o intuito de separar as formas de P ligadas a Al (P-Al), ao Fe (P-Fe), e P ligado ao Ca (P-Ca).

Para análise dos dados considerou-se as limitações de extrapolações para pseudo repetições, procedendo análise de variância (teste F), considerando os manejos como tratamentos em delineamento inteiramente casualizado, pelo software SISVAR versão 5.7 (FERREIRA, 2019), utilizando-se o teste F e em função da significância as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Realizou-se também a análise multivariada, com análise de componentes principais (ACP) por meio do software R (R CORE TEAM, 2017).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Resultados

O uso do sistema silviagrícola influenciou significativamente todas as variáveis analisadas nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m (Tabela 2).

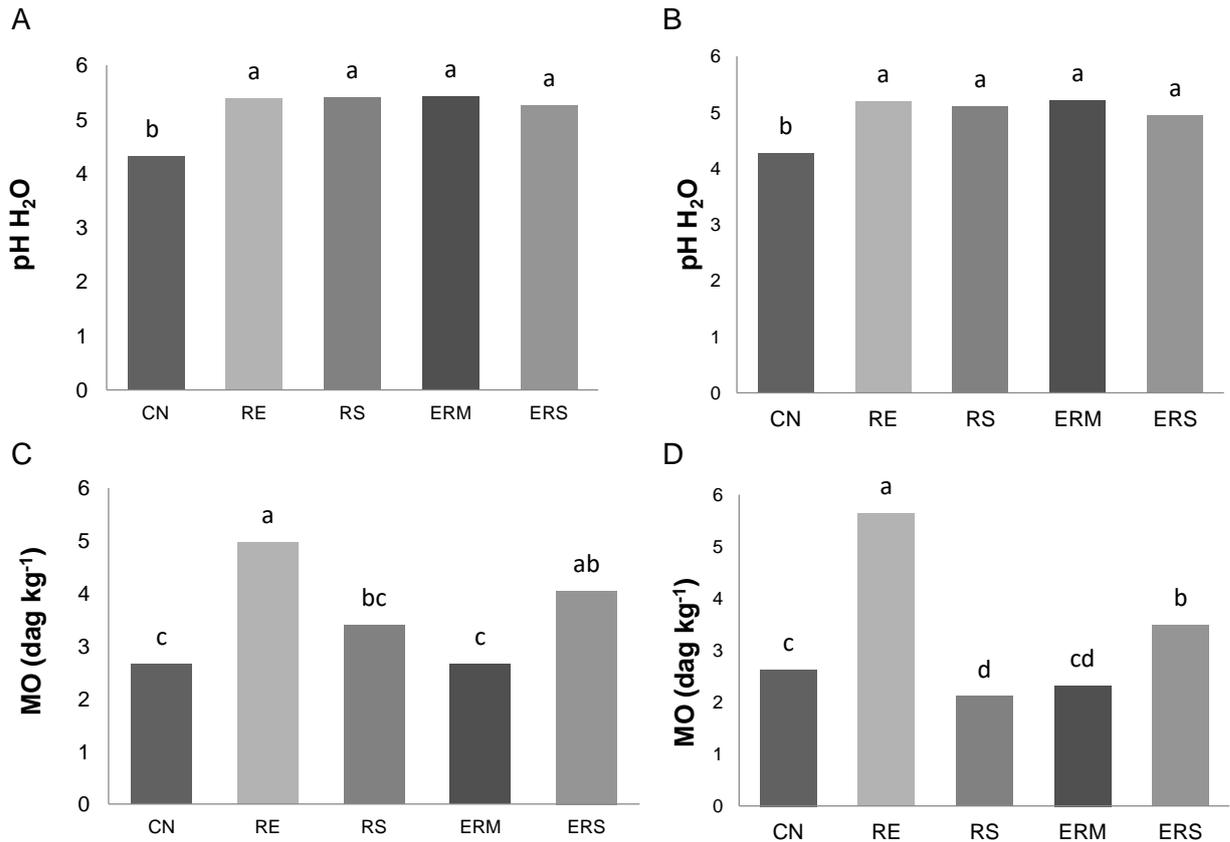
**Tabela 2.** Análise de variância para pH H<sub>2</sub>O, matéria orgânica, P disponível e frações do fósforo (P-Al, P-Fe e P-Ca) sob influência dos componentes do sistema silviagrícola, Bom Jesus, PI, 2019.

Causa de variação	pH H <sub>2</sub> O	MO	P disponível	P-Al	P-Fe	P-ca
		dag kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		mg kg <sup>-1</sup>	
<b>0-0,1 m</b>						
Sistema (" F")	23,52*	18,81*	22,12*	15,59*	47,01*	7,99*
Média geral	5,16	3,55	44,09	58,11	46,15	1,39
SQ	4,12	19,79	12982,47	17249,19	5979,38	11,09
CV (%)	3,76	12,79	25,20	25,41	11,53	35,10
<b>0,1-0,2 m</b>						
Sistema (" F")	33,24*	226,54*	8,21*	6,18*	14,48*	3,50*
Média geral	4,94	3,24	40,76	60,12	42,83	1,24
SQ	2,71	34,06	11615,92	18269,92	5654,50	12,16
CV (%)	2,75	5,92	38,93	36,86	20,99	52,73

\* significativo a 5%; ns: não significativo a 5% de probabilidade.

Os maiores valores de pH foram obtidos nos componentes do sistema silviagrícola (Figuras 3A; 3B), ou seja, nos renques e entre renques, independentemente da cultura agrícola ou florestal, em relação ao Cerrado nativo. No que se refere à concentração de MO destaca-se o renque de eucalipto com maiores valores nas diferentes camadas, entretanto estatisticamente igual ao ERS na camada 0-0,1 m (Figuras 3C; 3D).

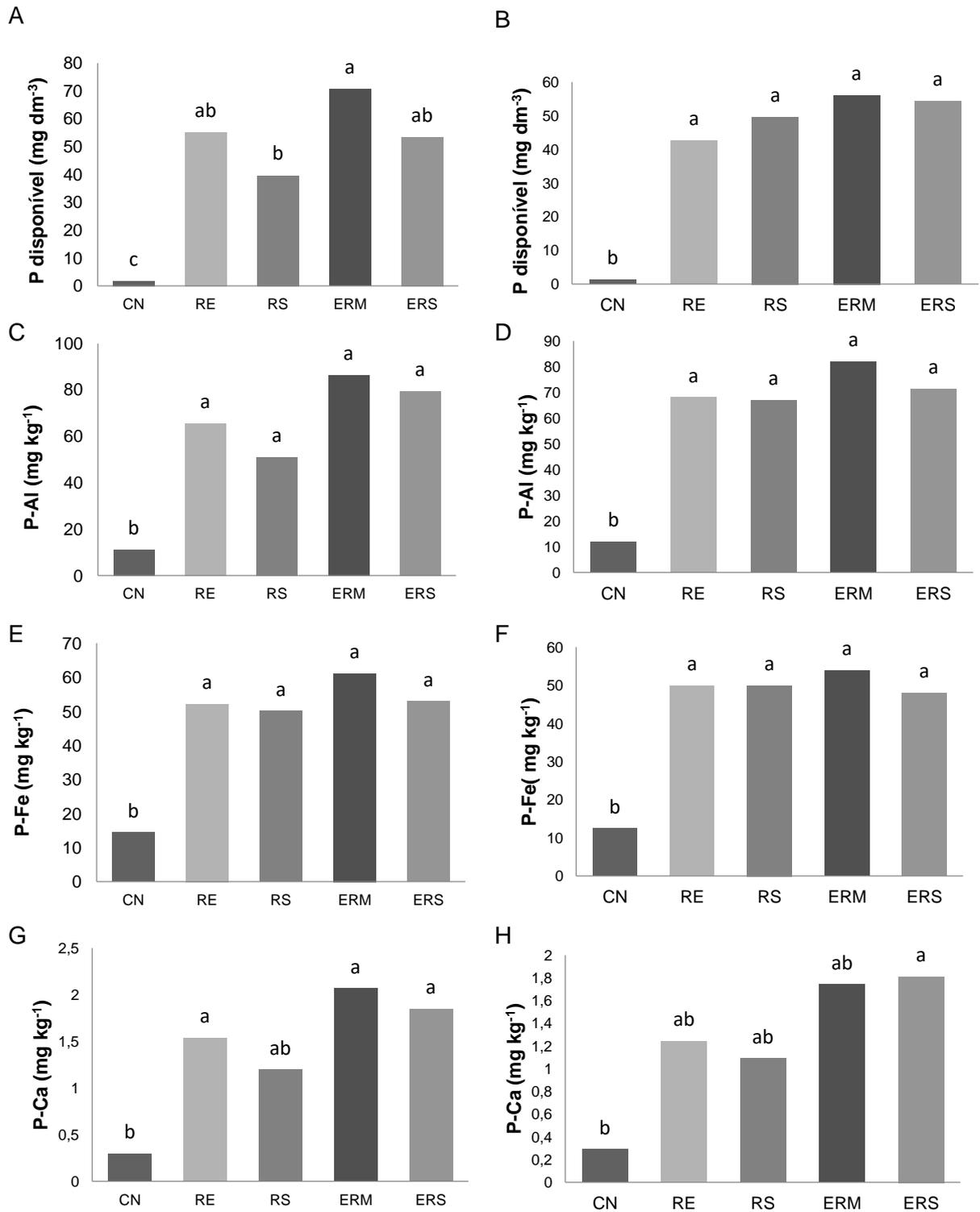
A concentração de P disponível foi maior no entre renque de milho em relação aos demais manejos, mas estatisticamente igual ao RE e ERS na camada de 0,0-0,1 m. Ainda, na camada de 0,1-0,2 m todos os componentes do sistema silviagrícola (renques e entre renques) apresentaram superioridade para P disponível em relação a área de Cerrado nativo (Figuras 4A; 4B).



**Figura 3.** pH em água (pH H<sub>2</sub>O) e Matéria orgânica (MO) sob influência do sistema silviagrícola e Cerrado nativo nas camadas 0-0,1 (Figuras A e C) e 0,1-0,2m (Figuras B e D), Bom Jesus, PI, 2019.

Para o fracionamento do fósforo, os componentes do sistema silviagrícola (renques de eucalipto e sabiá e entre renque de soja e milho) apresentaram maiores concentrações de P-Al (Figuras 4D; 4E) e P-Fe (Figuras 4F; 4G) nas duas camadas avaliadas em relação ao Cerrado nativo.

Para a fração P-Ca os componentes renque de eucalipto, e entre renque de milho e de soja na camada de 0-0,1 m (Figura 4G), apresentaram maiores valores em relação ao Cerrado nativo, entretanto não diferiram do renque de sabiá. Na camada 0,1-0,2 m (Figura 4H) o entre renque de soja apresentou maiores concentração para a fração P-Ca em relação ao Cerrado nativo, entretanto, não diferiu dos demais componentes do sistema silviagrícola (entre renque de milho e renques de sabiá e eucalipto).



**Figura 4.** Fósforo disponível (P) e fracionamento do fósforo do solo (P-AI, P-Fe e P-Ca) sob influência do sistema silviagrícola e Cerrado nativo nas camadas 0-0,1 (Figuras A, C, E e G) e 0,1-0,2 m (Figuras B, D, F e H), Bom Jesus, PI, 2019.

A análise de componentes principais mostrou que os dois componentes selecionados explicaram 96,72 e 95,75% da variância total dos dados para as camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente (Tabela 3).

**Tabela 3.** Coeficientes de pesos (auto vetores), autovalores e variância explicada por cada componente principal (CP1 e CP2) para pH e matéria orgânica, fósforo disponível, fracionamento do fósforo solo sob influência dos componentes do sistema silviagrícola nas camadas 0-0,1 e 0,1-0,2m. Bom Jesus, PI, 2019.

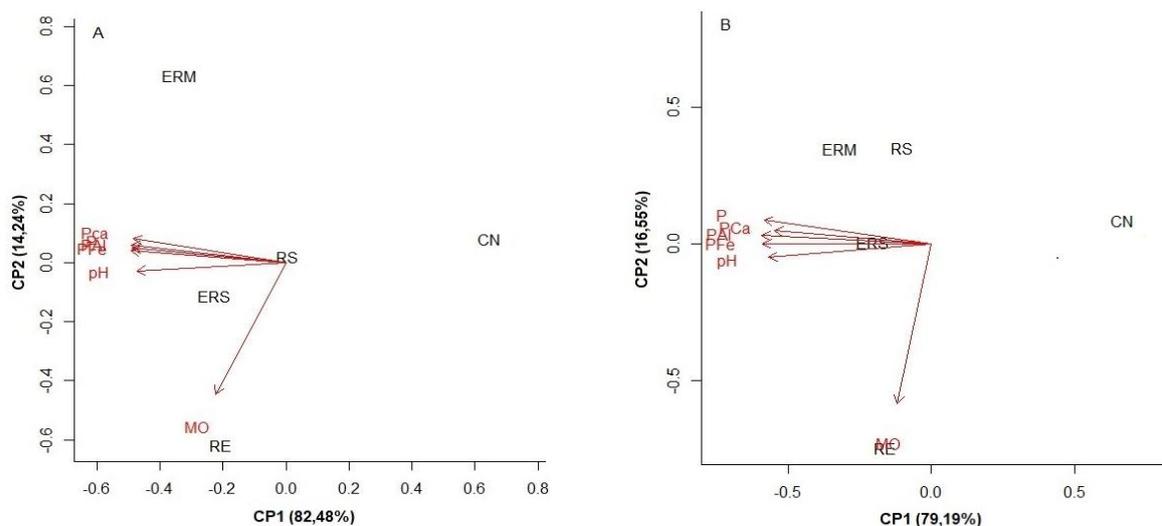
Atributos	0-0,1 m		0,1-0,2 m	
	CP1	CP2	CP1	CP2
pH	-0,42	-0,06	-0,44	-0,08
MO	-0,20	-0,96	-0,09	-0,98
P	-0,44	-0,12	-0,45	-0,15
P-Al	-0,44	-0,11	-0,45	0,05
P-Fe	-0,44	0,08	-0,45	0,01
P-Ca	-0,43	0,17	-0,42	0,08
Autovalores	4,49	0,85	4,75	0,99
Variância total (%)	82,48	14,24	79,19	16,55
Variância acumulada (%)	82,48	96,72	79,19	95,75

pH=potencial hidrogeniônico; MO=matéria orgânica; P=fósforo disponível; P-Al= fósforo ligado ao alumínio; P-Fe=fósforo ligado ao ferro; P-Ca= fósforo ligado ao cálcio.

Para a camada superficial e subsuperficial (0-0,1 e 0,2m) verifica-se a distinção entre os manejos para a análise de componentes principais, com as variáveis pH, P, P-Al, P-Fe e P-Ca apresentando escores negativos para o componente principal 1, estando atreladas a área de ERS. Já a variável MO com escore negativo para CP2 esteve associada ao RE (Figura 5A; 5B).

Na camada 0-0,1m (Tabela 4) nos diferentes componentes do sistema observa-se que houve correlação elevada entre o pH e as concentrações de P disponível ( $r=0,91^*$ ) e P-Fe ( $r=0,97^{**}$ ). Além dessas variáveis, também houve correlação alta entre o pH e o P-Al na camada subsuperficial.

Na camada 0-0,1 e 0,1-0,2 m houve alta correlação entre o P disponível e as frações de fósforo, assim como entre as próprias frações, porém com exceção na camada 0,1-0,2 m.



**Figura 5.** Biplot entre a relação do fracionamento do fósforo inorgânico, pH e matéria orgânica sob influência dos componentes do sistema silviagrícola para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A) e 0,1-0,2 m (B). pH=potencial hidrogeniônico; MO=matéria orgânica; P=fósforo disponível; P-Al= fósforo ligado ao alumínio; P-Fe=fósforo ligado ao ferro; P-Ca= fósforo ligado ao cálcio.

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação linear simples entre os valores de pH, MO, fósforo disponível e fósforo inorgânico sob sistema silviagrícola Bom Jesus, PI, 2019.

0-0,1 m	pH	MO	P	P-Al	P-Fe	P-Ca
pH	1					
MO	0,45	1				
P	0,91*	0,34	1			
P-Al	0,87	0,36	0,98**	1		
P-Fe	0,97**	0,36	0,97**	0,95*	1	
P-Ca	0,86	0,30	0,98**	0,99**	0,95*	1
0,1-0,2 m	pH	MO	P	P-Al	P-Fe	P-Ca
pH	1					
MO	0,25	1				
P	0,91*	0,05	1			
P-Al	0,96*	0,14	0,98**	1		
P-Fe	0,98**	0,19	0,98**	0,99	1	
P-Ca	0,77	0,13	0,92*	0,92	0,87	1

pH=potencial hidrogeniônico; MO=matéria orgânica; P=fósforo disponível; P-Al= fósforo ligado ao alumínio; P-Fe=fósforo ligado ao ferro; P-Ca= fósforo ligado ao cálcio.

### 3.2 Discussão

Os maiores valores de pH nos entre renques de soja e milho estão associados à aplicação de calcário realizada em 2018, já nos renques de eucalipto e sabiá pode-se sugerir ao incremento da matéria orgânica (LUSTOSA FILHO et al., 2017). Dessa forma, práticas de manejo como adubação e calagem impactam principalmente a camada superficial do solo (CARNEIRO et al., 2016). Os valores de pH corroboram com os encontrados por Soumare et al, (2016) para o eucalipto e Primo et al. (2018) para o sabiá, ao avaliar a fertilidade do solo com a deposição de serrapilheira dessas espécies florestais.

O acúmulo de serapilheira do eucalipto é de  $6,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (SILVA et al., 2015) e através da decomposição desse material acumulado, ocorre a incorporação de matéria orgânica pela percolação de ácidos húmicos (DICK; SCHUMACHER; MOMOLLI, 2016). Adicionalmente, estudos relatam que os altos níveis de polifenóis e lignina presentes na serapilheira do eucalipto diminuem a taxa de decomposição desse material, permanecendo por período mais longo na superfície do solo (OLIVEIRA et al., 2020; SANTOS et al., 2017; SOUMARE et al., 2016).

A maior concentração de matéria orgânica no renque de eucalipto pode estar associada a menor taxa de decomposição da serapilheira que ocorre nessa espécie florestal, favorecendo maior aporte de matéria orgânica do solo (FERREIRA et al., 2020). Dessa forma, o uso e cobertura da terra afetam a quantidade e composição da MOS (MAIA; PARRON, 2017). Essa espécie florestal gera deposição anual de nutrientes através da serapilheira com sequência para  $\text{Ca} > \text{N} > \text{Mg} > \text{K} > \text{P}$ , com o Ca apresentando concentração de  $44,97 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (SILVA et al., 2015). Adicionalmente, para o sabiá, a sequência é de  $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P}$  depositados pela serapilheira (PRIMO et al., 2018). Dessa forma, as raízes profundas das árvores têm efeito de bombeamento, onde absorvem nutrientes e estes podem ser depositados no solo pela serapilheira que, conseqüentemente, ficam acessíveis às culturas (ISAAC; BORDEN, 2019).

O conteúdo de P disponível maior nos componentes que receberam adubação fosfatada (entre renques) é devido à adubação fosfatada realizada no plantio das culturas, nos renques das espécies florestais o maior valor pode estar associado à deposição da serapilheira, contribuindo para incremento de MO, a qual é fonte de P. O maior aporte de nutrientes via adubação nos entre renques e a

imobilização de fósforo na biomassa da parte aérea das árvores nos renques (BEHLING et al., 2019), ajuda a justificar os resultados apresentados. Contudo, a disponibilidade do nutriente nos componentes do sistema foi considerada muito alta de acordo com Resende et al. (2016), tanto nos entre renques como nos renques, diferentemente da área de Cerrado.

O aumento da disponibilidade de P ocorre com a aplicação contínua ou em excesso de fertilizantes fosfatados, mineralização do P orgânico, solubilização do P inorgânico e/ou menor fixação do P adicionado (KRISHNA et al., 2019). Solos com maiores conteúdos de P extraível (P disponível e P inorgânico) têm maior capacidade de suprir P (CHENG et al., 2019).

Analisando os resultados obtidos pelo fracionamento do P inorgânico, observa-se que a maior parte do nutriente está complexada com o Al nos renques e entre renques, com exceção do Cerrado nativo, prevalecendo a ordem P-Al>P-Fe>P-Ca em ambas as camadas avaliadas, indicando que os compostos de Al controlam a disponibilidade de P, ou seja, há maior contribuição dessa fração para a disponibilidade de P. Diferentemente, no CN a ordem foi P-Fe>P-Al>P-Ca, assemelhando-se a abundância relativa das formas de P inorgânicas encontradas por Melese et al. (2015), analisando diferentes tipos de solo. A prevalência da fração de P-Al pode estar relacionada ao carbono orgânico e a argila do solo, que de acordo com Majumdar; Patil; Patil (2016), o P orgânico é mineralizado e convertido a P-Al pela alta atividade biológica e no caso da argila, o teor de Al é maior que o de Fe e o Ca, dessa forma, a inclusão do sistema silviagrícola pode melhorar a disponibilidade de P.

Observa-se que a fração P-Ca apresenta menor concentração em relação às demais, sendo justificado pela acidez e pedogênese avançada do tipo de solo da área. Isso é um indicativo que toda a apatita nativa se extinguiu, algo que não ocorre em solos menos intemperizados (LI et al., 2016). Nos Latossolos ocorrem minerais de solos mais intemperizados como a caulinita, gibbsita e goethita (PRAGANA et al. 2016). Outra hipótese é que os ligantes dos ácidos orgânicos prontamente formam complexos mais estáveis com Fe e Al do que com o Ca, com isso, o P é prontamente desorvido ou dissolvido de compostos de P-Al e P-Fe do que compostos de P-Ca (WANG et al., 2016).

Ainda, os maiores valores de P-Ca nos entre renques das camadas avaliadas em relação ao CN, podem estar associados à maior solubilização de  $\text{CaCO}_3$  do

calcário aplicado e adição de fertilizantes fosfatados, de forma que a precipitação de P pelo incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  ocorre em situação de neutralidade/alcalinidade do solo (KRISHNA et al., 2019; VU et al., 2008). Vale ressaltar que o entre renque de soja recebeu calagem e sua adubação fosfatada foi realizada empregando a fonte superfosfato simples, a qual apresenta em sua constituição o gesso, fonte de S e Ca, o que pode justificar os resultados, de superioridade para ERS, para P-Ca, da camada subsuperficial (0,1-0,2 m).

Cheng et al. (2019), trabalhando com sistemas agroflorestais, verificaram que o consórcio de árvores com culturas agrícolas aumenta a concentração de P-Ca devido a mudança de pH induzida pela raiz via alcalinização, o que muda a dinâmica do P da rizosfera. Dessa forma, o conteúdo de P-Ca é determinado pelo pH (TENG et al., 2018).

Nos solos mais intemperizados, como os Latossolos, classe de solo do presente estudo, as maiores proporções de P inorgânico estão associadas às frações P-Al e P-Fe, conforme já relatado em outros trabalhos (SOUZA JÚNIOR et al., 2012; MELESE; YLI-HALLA, 2016; LI et al., 2016).

Além disso, teores de P-Fe muito elevados em comparação a outras frações, ocorre devido ao alto teor de óxidos de Fe e baixo pH, como na área de CN (LI et al., 2016). Outro fator está relacionado à presença de MO na área de CN, que aumenta a concentração dessa fração devido ao dióxido de carbono liberado durante a decomposição, ajudando na formação do P-Fe do solo (MITRAN et al., 2016).

Solos ácidos e pobres em  $\text{Ca}^{2+}$ , tanto o P nativo como o P do fertilizante adicionado, além de formar precipitados de Al e Fe, é adsorvido à superfície dos coloides minerais de modo que o P-Al e P-Fe são as frações que predominam (SOUZA JÚNIOR et al., 2012). Assim, tanto o P-Al quanto o P-Fe são importantes para o crescimento das plantas, sendo as fontes mais importantes de P, fornecendo-o à solução do solo (MELESE; YLI-HALLA, 2016).

Os resultados para o pH, P disponível e as frações de fósforo associadas ao ERS representados na figura 6, podem estar associados a calagem realizada que aumenta os valores de pH, assim como aplicação de fertilizantes fosfatados e mineralização do fósforo orgânico. Quanto a MO, a ACP confirmou os resultados da análise de variância, com maior deposição de serrapilheira para o RE.

As altas correlações podem estar associadas à aplicação de  $\text{CaCO}_3$ , possibilitando o aumento de pH e disponibilizando maiores concentrações de P pela

liberação de P ligado ao Al e ao Fe (NASCENTE; COBUCCI, 2015). Hong e Lu (2018) também observaram correlação significativa do pH do solo com o P-Al e P-Fe. Eles relatam que o aumento do pH em solos ácidos precipita  $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$  livremente nos solos, depois, diminui os locais de sorção de P altamente ativos que podem alterar as formas químicas de P no solo.

A correlação elevada entre o fósforo disponível e a fração P-Ca pode estar associadas com o extrator Mehlich-1, pela preferência desse extrator em extrair P-CA (NARDIS et al., 2021). Já as altas correlações em relação às frações de P, sugerem que elas são críticas na regulação da disponibilidade de P, indicando que o aumento da proporção das formas de fósforo melhora sua disponibilidade no solo.

#### **4. CONCLUSÕES**

A distribuição sequencial de diferentes formas de P sob o sistema silviagrícola apresenta abundância na ordem P-Al>P-Fe>P-Ca, com maior participação do P-Al e P-Fe, representando em média 57 e 43% do total das frações, respectivamente, nos renques e entre renques.

A área de Cerrado nativo apresenta abundância na ordem de P-Fe>P-Al>P-Ca.

As frações de fósforo ocorrem em maior concentração no ERS.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEHLING, M.; CARVALHO, G. de; DIEHL, D.; LANGE, A.; FARIAS, J. B.; CAMARGO, D. Distribuição horizontal e vertical de fósforo na ILPF. In: FARIAS NETO, A. L. de; NASCIMENTO, A. F. do; ROSSONI, A. L.; MAGALHÃES, C. A. de S.; ITUASSU, D. R.; HOOGERHEIDE, E. S. S.; IKEDA, F. S.; FERNANDES JUNIOR, F.; FARIA, G. R.; ISERNHAGEN, I.; VENDRUSCULO, L. G.; MORALES, M. M.; CARNEVALLI, R. A. (Ed.). **Embrapa Agrossilvipastoril: primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. pt. 4, cap. 17, p. 269-275.
- BURESH, R. J. Phosphorus management in tropical agroforestry: current knowledge and research challenges. **Agroforestry Forum**, v. 9, pp. 2–8, 1999.
- CAMÊLO, D. DE L.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; CORRÊA, M. M.; LIMA, V. C. DE. Extrações sequenciais de fósforo por mehlich-1 e resina de troca iônica em horizontes B latossólicos férricos e perférricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1058–1067, 2015.
- CARNEIRO, J. S. S.; SANTOS, A. C. M.; FIDELIS, R. R.; SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; SILVA, R. R. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.14, n. 2, p. 10-21, 2016.
- CHANG S. C, JACKSON M. L. Soil phosphorus fractions in some representative soils. **Journal of Soil Science**. v.9, p.109-119, 1958.
- CHENG, Z.; CHEN, Y.; GALE, W. J.; ZHANG, F. Inorganic Phosphorus Distribution in Soil Aggregates Under Different Cropping Patterns in Northwest China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 157–165, 2019.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista brasileira de biometria**, [S.l.], v. 37, n. 4, p. 529-535, dec. 2019.
- FERREIRA, N. C. DE F.; RAMOS, T. V.; FERREIRA JÚNIOR, R. J.; CARVALHO, I. A. DE. Decomposição de serapilheira em mata nativa do bioma cerrado e litter decomposition in native forest of the cerrado biome and eucalyptus urograndis urograndis. **Revista de biotecnologia & ciência**, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2020.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 369–379, 2016.
- HONG, C.; LU, S. Does biochar affect the availability and chemical fractionation of phosphate in soils?. **Environmental Science and Pollution Research**, v., 25, p.8725–8734, 2018.
- HOU, E.; TAN, X.; HEENAN, M.; WEN, D. Data descriptor: A global dataset of plant available and unavailable phosphorus in natural soils derived by hedley method. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–13, 2018.
- ISAAC, M. E.; BORDEN, K. A. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. **Plant and Soil**, v.444, p.1-19, 2019.

KÖPPEN, W; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, n.p. 1928.

KRISHNA, G. K. S.; KRISHNA, T. G.; MUNASWAMY, V.; RAMU, Y. R. Status of Available Phosphorus and Forms of Phosphorus in Soil under Major Cropping Systems of Y.S.R. Kadapa District, A.P. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 30, n. 4, p. 1–7, 2019.

LI, B.; GE, T.; XIAO, H.; ZHU, Z.; LI, Y.; SHIBISTOVA, O.; LIU, S.; WU, J.; INUBUSHI, K.; GUGGENBERGER, G. Phosphorus content as a function of soil aggregate size and paddy cultivation in highly weathered soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 7494–7503, 2016.

LUSTOSA FILHO, J. F. et al. Co-pyrolysis of poultry litter and phosphate and magnesium generates alternative slow release fertilizer suitable for tropical soils. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v.5, n.10, p.9043-9052, 2017.

MAIA, C. M. B. de F.; PARRON, L. M. **Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais**. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Ed.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Brasília, DF : Embrapa, 2015.

MAJUMDAR, S.; PATIL, P. L.; PATIL, C. R. Forms and distribution of phosphorus as influenced by various land use systems of a micro-watershed in Northern transition zone of Karnataka. **Ecology, Environment and Conservation**, v. 22, p. 111–118, 2016.

MELESE, A.; GEBREKIDAN, H.; YLI-HALLA, M.; YITAFERU, B. Phosphorus status, inorganic phosphorus forms, and other physicochemical properties of acid soils of Farta District, northwestern highlands of Ethiopia. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2015, 2015.

MELESE, A.; YLI HALLA, M. Effects of applications of lime, wood ash, manure and mineral P fertilizer on the inorganic P fractions and other selected soil chemical properties on acid soil of Farta District, Northwestern highland of Ethiopia. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 2, p. 87–99, 2016.

MITRAN, T.; MANI, P. K.; BASAK, N.; MAZUMDER, D.; ROY, M. Long-term manuring and fertilization influence soil inorganic phosphorus transformation vis-a-vis rice yield in a rice–wheat cropping system. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 1–18, 2016.

NASCENTE, A. S.; COBUCCI, T. Calcário na forma de micropartículas aplicado no sulco de semeadura aumenta produtividade do feijoeiro. **Revista Ceres [online]**, v. 62, n. 6, 2015.

NARDIS, B.O.; CARNEIRO, J.S.S.; SOUZA, I.M.G.; BARROS, R.G.; MELO, L.C.A. Phosphorus recovery using magnesium-enriched biochar and its potential use as fertilizer. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 8, p.1017-1033, 2021.

OLIVEIRA, A. M. DE; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; NOVAES, A. B. DE; CARVALHO, F. F. DE; MEIRELES, I. E. DA S. Decomposição da serapilheira foliar em plantios de bambu, nim indiano e eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 845–855, 2020.

PRAGANA, R. B.; SOUZA JUNIOR, V. S. de; MOURA, R. dos S.; SOARES, J. M. Characterization of yellow latosols (oxisols) of serra do quilombo, in piauí state savanna woodlands – brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 832–840, 2016.

PRIMO, A. A.; MELO, M. D.; PEREIRA, G. DE A. C.; SILVA, L. A.; FERNANDES, F. É. P.; SOUZA, H. A. DE. Potencial fertilizante da serapilheira de espécies lenhosas da Caatinga na recuperação de um solo degradado. **Revista Ceres**, v. 65, n. 1, p. 74–84, 2018.

R Core Team (2017). R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.

RESENDE, A.V.; FONTOURA, S.M.V.; BORGHI, E.; SANTOS, F.C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S.G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A.L.D.C. **Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo**. Informações Agronômicas, v.156, p.1-17, 2016.

SANTOS, A. F. A.; CARNEIRO, A. C. P.; MARTINEZ, D. T.; CALDEIRA, S. F. Capacidade de retenção hídrica do estoque de serapilheira de eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1–9, 2017.

SILVA, C. F. DA; CARMO, É. R. DO; MARTINS, M. A.; FREITAS, M. S. M. DE; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. R. DA. Deposition and nutritional quality of the litter of pure stands of *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia mangium*. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 4, p. 1081-1091, 2015.

SOUMARE, A.; SALL, S. N.; SANON, A.; CISSOKO, M.; HAFIDI, M.; NDOYE, I.; DUPONNOIS, R. Changes in soil PH, polyphenol content and microbial community mediated by *eucalyptus camaldulensis*. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 14, n. 3, p. 1–19, 2016.

SOUZA JÚNIOR, R. F. DE; OLIVEIRA, F. H. T. DE; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. DE. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 159–169, 2012.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

TENG, Z.; ZHU, Y.; LI, M.; WHELAN, M. J. Microbial community composition and activity controls phosphorus transformation in rhizosphere soils of the Yeyahu Wetland in Beijing, China. **Science of the Total Environment**, v. 628–629, p. 1266–1277, 2018.

VU, D.T.; TANG, C.; ARMSTRONG, R.D. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate. **Plant and Soil**, v.304, p.21-34, 2008.

WANG Y., WHALEN JK, CHEN X., CAO Y., HUANG B., LU C. E SHI Y. Mecanismos para alterar as características de sorção de fósforo induzidas por ácidos orgânicos de baixo peso molecular. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 96, n. 3, p. 289–298, 2016.

WU, W.; ZHENG, Z.; LI, T.; HE, S.; ZHANG, X.; WANG, Y.; LIU, T. Distribution of inorganic phosphorus fractions in water-stable aggregates of soil from tea plantations converted from farmland in the hilly region of western Sichuan, China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 906–916, 2018.

YANG, XIAOYAN; CHEN, X.; YANG, XITIAN. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 85–91, 2019.