

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS - CESBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE -  
PPGAA**

**JORGE ARTHUR NASCIMENTO MIGNONI**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM SISTEMA DE  
INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA NO SUDOESTE MARANHENSE**

Balsas - MA  
2020

**JORGE ARTHUR NASCIMENTO MIGNONI**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM SISTEMA DE  
INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA NO SUDOESTE MARANHENSE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.  
Orientador (a): Dra. Alinne Silva

Balsas - MA  
2020

Mignoni, Jorge Arthur Nascimento.

Atributos químicos e físicos do solo em sistema de integração pecuária-floresta no sudoeste maranhense / Jorge Arthur Nascimento Mignoni. – Balsas, MA, 2020.

60 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Agricultura e Ambiente, Centro de Estudos Superiores de Balsas, Universidade Estadual do Maranhão, 2020.

Orientador: Profa. Dra. Alinne da Silva.

1.Pastagem. 2.Sistemas de integração. 3.Degradação. 4.Sustentabilidade. I.Título

CDU: 631.585(812.1)

**JORGE ARTHUR N. MIGNONI**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM SISTEMA DE  
INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA NO SUDOESTE MARANHENSE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.  
Orientador (a): Dra. Alinne Silva

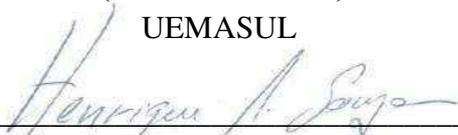
Aprovada em: 05/08/2020

**BANCA EXAMINADORA**



(Dra. Alinne Silva)

UEMASUL



(Dr. Henrique Antunes de Souza)

EMBRAPA



(Dr. Luciano Cavalcante Muniz)

UEMA



*Dedico este meu trabalho a todos aqueles que acreditaram em mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado com saúde durante todo este processo. Agradeço também a minha família, em especial a minha esposa Maria Simone, pelo apoio nesta caminhada e ainda a minha orientadora Alinne Silva pelos ensinamentos e preceitos recebidos neste período de grande aprendizagem. Aos alunos bolsistas que também fizeram parte deste projeto, deixo aqui meus sinceros agradecimentos. E ao colaborador Luiz Fernandes pela realização de análises que muito contribuíram para o trabalho.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito”

Chico Xavier.

## RESUMO

O uso intensivo da terra tem acelerado a perda da qualidade do solo, processo que pode ser evitado pela adoção de sistemas conservacionistas de produção, como os sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF). Os efeitos dos IPF's na qualidade do solo podem ser comprovados pela avaliação de diversos atributos químicos e físicos do solo. Ressalta-se que, no Sudoeste do Estado do Maranhão, grande parte dos solos das propriedades rurais encontram-se em algum estado de degradação, pois têm sido explorados por décadas com pastagens implantadas sem a utilização de medidas conservacionistas. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar alguns atributos físicos e químicos de um solo localizado no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica maranhense sob o sistema IPF, comparado ao sistema com pastagem convencional (PC) e a floresta secundária (FS). Realizou-se o estudo na Fazenda Monalisa, localizada no município de São Francisco do Brejão, MA. O sistema IPF foi implantado no ano de 2016, em uma área com 70 ha, anteriormente ocupada com pastagem. Adjacente a esta área encontra-se uma área de pastagem convencional e um fragmento de floresta secundária. As amostras de solo foram coletadas no período de chuvas e no período seco, que compreende os meses de fevereiro e agosto de 2019, em diferentes profundidades. Foram determinados os atributos físicos, densidade do solo, umidade gravimétrica e resistência mecânica do solo à penetração e os químicos: pH, H+Al, Ca, Mg, P, K, Al, MOS, CTC, SB, V, m e EC. Os sistemas de manejo do solo foram comparados entre si através de análise multivariada de componentes principais. Para a densidade do solo, resistência mecânica do solo à penetração e estoque de carbono orgânico do solo, utilizou-se esquema fatorial 3 x 2 (três usos da terra e duas profundidades, 0-5 e 5-10 cm), no caso de diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey (5% de probabilidade). Para os atributos químicos foi realizada a análise fatorial 3 x 3 (três usos da terra e três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm). Os resultados indicaram que a introdução do sistema de integração, devido à aplicação de corretivo, fertilizantes e ao manejo adequado dos animais bovinos, promoveu melhorias nos atributos químicos em relação à área de PC, pois para todas as profundidades avaliadas, em ambos os períodos, a ACP separou a área com o sistema IPF dos demais usos da terra, em função da maior influência dos atributos da fertilidade do solo. A área de PC apresentou maior influência dos componentes da acidez do solo. A área de PC apresentou maior compactação do solo em relação aos outros usos da terra, refletindo nos maiores valores de densidade do solo e resistência mecânica do solo à penetração, devido aos menores teores de matéria orgânica e estoque de carbono em superfície, bem como a maior movimentação de animais dentro da área. Com este estudo, foi possível compreender a dinâmica do solo após três anos da adoção do sistema de integração em uma região estratégica para o desenvolvimento do Estado.

**Palavras-chave:** Pastagem; Sistemas de Integração; Degradação; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Intensive land use has accelerated the loss of soil quality, a process that can be avoided by adopting conservationist production systems, such as the livestock-forest integration (IPF) systems. The effects of IPF's on soil quality can be proven by assessing various chemical and physical indicators of the soil. It is noteworthy that, in the southwest of the state of Maranhão, a large part of the soils of rural properties are in some state of degradation, as they have been explored for decades with pastures implanted without the use of conservation measures. Therefore, the objective of this study was to evaluate some physical and chemical indicators of a soil located in the ecotone cerrado-floresta amazônica maranhense under the IPF system, compared to the system with conventional pasture (PC) and the secondary forest (FS). The study was carried out at Fazenda Monalisa, located in the municipality of São Francisco do Brejão, MA. The IPF system was implemented in 2016, in an area of 70 ha, previously occupied with pasture. Adjacent to this area is a conventional pasture area and a secondary forest fragment. The soil samples were collected in the rainy and dry periods, which comprise the months of February and August 2019, at different depths. Physical indicators, soil density and soil mechanical resistance to penetration and chemicals were determined: pH in water, potential acidity, calcium, magnesium, phosphorus, potassium, exchangeable aluminum, soil organic matter, cation exchange capacity, sum of bases, base saturation, aluminum saturation and carbon stock. The soil management systems were compared to each other through multivariate analysis of main components. For soil density, soil mechanical resistance to penetration and soil organic carbon stock, a 3 x 2 factorial scheme (three land uses and two depths) was used, in the case of significant differences, the means were compared by the test Tukey's. For the chemical indicators, a 3 x 3 factor analysis was performed (three land uses and three depths). The results indicated that the introduction of the integration system, due to the application of corrective, fertilizers and the adequate handling of the cattle, promoted improvements in the chemical indicators in relation to the area of PC, because for all depths evaluated, in both periods, the ACP separated the area with the IPF system from other land uses, due to the greater influence of soil fertility indicators. The PC area showed greater influence of the components of soil acidity. The PC area showed greater soil compaction compared to other land uses, reflecting the higher values of soil density and mechanical resistance of the soil to penetration, due to the lower levels of organic matter and surface carbon stock, as well as the greater movement of animals within the area. With this study, it was possible to understand the dynamics of the soil three years after the adoption of the integration system in a strategic region for the development of the State.

**Keywords:** Soil; Pasture; Integration; Degradation; Sustainability.

## LISTA DE SIGLAS

FS – Floresta Secundária

ILPF – Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

IPF – Integração Pecuária-Floresta

PC – Pastagem convencional

RMSP – Resistência Mecânica do Solo a Penetração

EC – Estoque de Carbono

Al - Alumínio

Ds - Densidade do solo

H+Al - Acidez potencial

MO - Matéria orgânica

pH - Potencial hidrogeniônico

PT - Porosidade total

SB - Soma de bases

UNEP - United Nations Environment Programme

V% - Saturação por bases

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa com a distribuição dos biomas localizados no território maranhense..... 18
- Figura 2. Vista aérea das áreas cultivadas com pastagem convencional, integração pecuária-floresta, e o fragmento de floresta secundária na Fazenda Monalisa, localizada no município de São Francisco do Brejão, MA, no ano de 2020.....25
- Figura 3. Estado do Maranhão (A); Região sudoeste do estado do Maranhão (B); Município de São Francisco do Brejão (C); Áreas estudadas (D); Esquema de distribuição das unidades amostrais dentro de cada área estudada (E). ..... 27
- Figura 4. Medição das camadas de profundidade do solo coletado com uma pá de corte na área experimental (A); Corte e retirada das camadas de solo separadamente para compor a amostra composta (B). ..... 27
- Figura 5. Inserção do anel volumétrico no solo para retirada das amostras indeformadas de terra (A); Anel volumétrico com a amostra indeformada de terra (B). ..... 28
- Figura 6. Posicionamento do penetrômetro de impacto na superfície do solo (A). Determinação da resistência mecânica do solo à penetração com um penetrômetro de impacto (B). .... 29
- Figura 7. Análise de componentes principais (ACP) dos atributos químicos do solo nas camadas de 0-5 cm (A-D) e 5-10 cm (B-E) e 10-20 cm (C-F) de profundidade, no período chuvoso e seco, em áreas com diferentes usos da terra na Fazenda Monalisa, MA, Brasil. PC = pastagem convencional; FS = floresta secundária e IPF = integração pecuária-floresta,. Matéria orgânica (MO), soma de bases (SB), potencial hidrogeniônico (pH), saturação de bases (V), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), fósforo (P), saturação por alumínio (m), potássio (K), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions pH 7,0 (T) e capacidade de troca de cátions efetiva (t) ..... 32
- Figura 8. Representação gráfica da resistência mecânica do solo a penetração (RMSP) no período chuvoso para as três áreas estudadas, Floresta secundária (FS), Pastagem convencional (PC) e Integração pecuária-floresta (IPF).....45
- Figura 9. Representação gráfica da resistência mecânica do solo a penetração (RMSP) no período seco para as três áreas estudadas, Floresta secundária (FS), Pastagem convencional (PC) e Integração pecuária-floresta (IPF).....46

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Valores médios dos atributos químicos pH (H<sub>2</sub>O), P, K, Ca, Mg, Al, H+Al nas áreas de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), para as amostras de solo coletadas em fevereiro de 2019 (período chuvoso) e agosto de 2019 (período seco).....36
- Tabela 2. Valores médios de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC<sub>pH 7,0</sub>), capacidade de troca catiônica efetiva (CTC<sub>ef</sub>), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) em áreas de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm de profundidade, no período chuvoso (fevereiro) e seco (agosto) de 2019..... 40
- Tabela 3. Valores médios de estoque de carbono (Mg C ha<sup>-1</sup>) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), em amostras de solo coletadas nas camadas entre 0-5 e 5-10 cm de profundidade, em fevereiro (período chuvoso) e agosto (período seco) de 2019.....42
- Tabela 4. Valores médios de densidade do solo (g dm<sup>-3</sup>) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS) em diferentes camadas do solo (0-5 e 5-10 cm) no período chuvoso (fevereiro) e seco (agosto) de 2019..... 44
- Tabela 5. Valores médios de resistência mecânica do solo a penetração (MPa) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), em amostras de solo coletadas nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade, em fevereiro (período chuvoso) e agosto (período seco) de 2019.....47
- Tabela 6. Valores médios de umidade gravimétrica (g g<sup>-1</sup>) dos primeiros 20 cm do solo em áreas de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), no período chuvoso (fevereiro) e seco (agosto) de 2019.....48

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Geral .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Ecótono maranhense Cerrado-Floresta Amazônica .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Sistemas Integrados de Produção .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Qualidade do solo em Sistemas de Integração .....</b>	<b>21</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Caracterização da área de estudo .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Amostragem do solo .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 Determinação dos atributos químicos e físicos .....</b>	<b>29</b>
<b>4.4 Análise estatística.....</b>	<b>31</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais e socioeconômicos, ocasionados pela substituição de extensas áreas de florestas por pastagens, evidenciam uma preocupação mundial (FAO, 2020). Em regiões de clima tropical e subtropical, as práticas inadequadas de manejo do pasto são apontadas como um dos principais motivos de degradação das pastagens (DIAS-FILHO, 2012). A utilização sistematizada de taxas de ocupação que excedam a capacidade do pasto de se restabelecer do pastejo e do pisoteio animal é um dos principais equívocos de manejo.

Dessa forma, é muito importante o fomento às atividades econômicas sustentáveis e a geração de tecnologias que viabilizem a pecuária em áreas já alteradas, priorizando sistemas ambientalmente recomendáveis, socialmente justos e economicamente viáveis. Portanto, o uso de sistemas integrados de produção pode demonstrar uma alternativa viável para otimizar o uso da terra, com sustentabilidade (CASTRO et al., 2008).

No processo de degradação há um crescimento de plantas espontâneas na pastagem, diminuindo gradativamente a capacidade de suporte. Na deterioração biológica, o solo perde a capacidade de sustentar a produção vegetal de forma significativa, levando à substituição da pastagem por plantas pouco exigentes em fertilidade do solo e, em casos mais avançados, ao início do processo de desertificação (solo descoberto) (DIAS-FILHO, 2014).

Os ganhos ambientais mais evidentes com o uso dessa modalidade de sistema de produção, de acordo com Romano (2010) são o maior sequestro de carbono com diminuição da emissão de gases de efeito estufa, recuperação da qualidade e da capacidade produtiva do solo, maior infiltração de água das chuvas, reduzindo o processo erosivo, menor existência de pragas, doenças e plantas espontâneas, bem-estar animal pelo microclima ameno originado pelo elemento florestal, diversificação da produção e minimização dos riscos de mercado.

Vale realçar que este sistema pode ser economicamente rentável se manejado de forma adequada, uma vez que otimiza a utilização da terra, e os custos das atividades são similarmente diluídos, visto que um mesmo manejo serve para mais de uma cultura (ROMANO, 2010).

Um dos principais desafios da produção integrada é utilizar as áreas que já foram intensivamente exploradas em monocultura (pecuária ou lavoura), que se encontram degradadas ou em algum estado de degradação, recuperando-as e tornando o sistema sustentável. A degradação de pastagens é de caráter mundial. Estima-se que cerca de 20% das pastagens mundiais (naturais e plantadas) estejam degradadas ou em processamento de degradação, sendo essa equivalência ao menos três vezes maior nas regiões mais áridas do mundo (UNEP, 2004).

Considerando que o solo é a base para uma agricultura sustentável, é fundamental, portanto, adotar práticas de manejo conservacionistas. Nessa perspectiva, os estudos envolvendo sistemas de integração têm avançado em várias regiões do Brasil, uma vez que este sistema tem surgido como alternativa para contornar a perda da qualidade do solo em razão dos processos de degradação e manejo inadequado da terra (SOUZA et al., 2012).

Os estudos regionais relacionados às alterações dos atributos químicos e físicos do solo em função das mudanças no uso da terra são escassos para a Região Tocantina, a qual apresenta biomas sensíveis a alterações de manejo, sendo um deles o ecótono Cerrado-Floresta Amazônica.

Este fato, aliado às considerações de Moura et al. (2013), que sugerem considerar as interações entre os fatores climáticos locais e os atributos da qualidade do solo para o manejo dos agroecossistemas implantados nos trópicos úmidos, torna o estudo aqui realizado fundamental para a compreensão da dinâmica dos atributos do solo no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica do Sudoeste do Maranhão.

Dessa forma, a recuperação de pastagens degradadas continuará a ter papel primordial nesse processamento de progresso, tornando possível o crescimento da produção, sem a expansão das áreas de pastagem. Para isso, uma das opções de recuperação dessas áreas é realizar utilização dos sistemas integrados de produção (DIAS-FILHO et al., 2008).

O município de São Francisco do Brejão, que se localiza na região sudoeste do Estado do Maranhão, encontra-se inserido no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica, onde se verifica o encontro e interação entre o Bioma Cerrado e o Bioma Floresta Amazônica. Nas últimas décadas essa área sofreu mudanças drásticas, como consequência da sua incorporação ao processo produtivo. Tais mudanças têm causado impactos negativos do ponto de vista ambiental, em função da substituição de vegetações nativas pelo estabelecimento de pastagem (FREIRE et al., 2015).

Ressalta-se que nesta região parte dos solos das propriedades rurais encontram-se degradados e em diferentes estágios de erosão, uma vez que têm sido explorados por décadas com pastagens implantadas sem a utilização de medidas conservacionistas, o que levou ao atual quadro de degradação e baixa produtividade. Portanto, é evidente a necessidade de adoção e avaliação de sistemas conservacionistas nessa região (FREIRE et al., 2015).

O estudo realizado teve como objetivo avaliar alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo localizado no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica maranhense em função da

adoção de Integração pecuária-floresta (IPF), em comparação com um fragmento de floresta secundária e uma pastagem convencional.

O estudo realizado foi pioneiro na Região e poderá contribuir para inversão do atual quadro de degradação observado, permitindo uma exploração sustentável para os solos de uma região estratégica para o desenvolvimento do Estado do Maranhão.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Avaliar alguns atributos físicos e químicos de um Latossolo localizado no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica maranhense sob o sistema IPF, comparado ao sistema com pastagem convencional (PC) e a floresta secundária (FS).

### **2.2 Específicos**

- Compreender a dinâmica dos atributos do solo em um sistema integrado de produção;
- Avaliar o impacto da implantação de IPF nos atributos químicos do solo e compará-los com o solo de uma floresta secundária e pastagem convencional;
- Avaliar o impacto da implantação de IPF nos atributos físicos do solo e compará-los com o solo de uma floresta secundária e pastagem convencional

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Ecótono maranhense Cerrado-Floresta Amazônica**

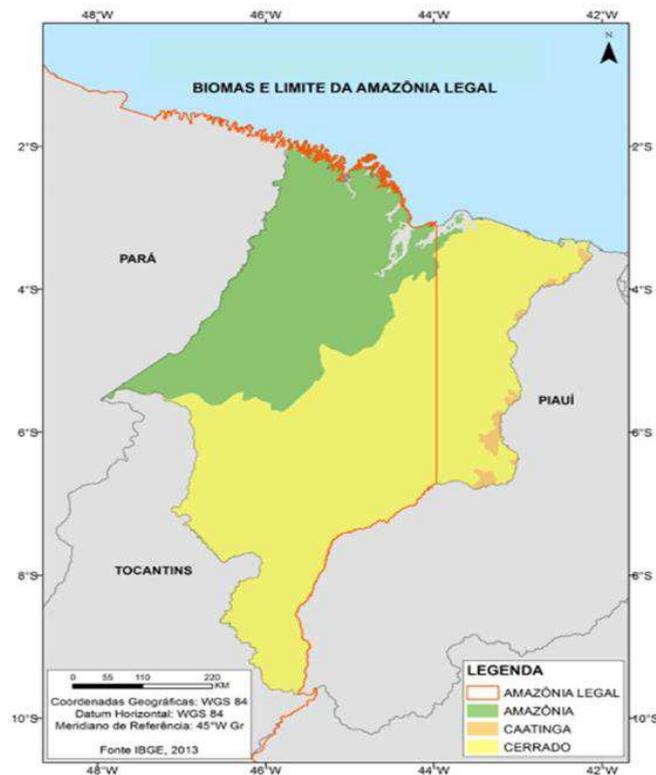
Em 06 de janeiro de 1953, por meio da Lei n.º 1.806, foi instituída a Amazônia Legal, que corresponde aos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, Mato Grosso e alguns dos municípios do Estado do Maranhão, num total de 5.217.423 km<sup>2</sup>, equivalentes a 61% do território nacional (BRASIL, 1953). Rodrigues et al. (2012) consideram a floresta Amazônica como o maior reservatório de diversidade vegetal e animal do mundo. O bioma Amazônico desempenha inúmeros serviços ambientais que, em conjunto, possui papel primordial na conservação da diversidade biológica, na regulação climática e nos ciclos biogeoquímicos (PERES et al., 2010).

Essas funções ecológicas, como a absorção e ciclagem de nutrientes, conservação da qualidade do ar, da água e dos ciclos biogeoquímicos globais são comprometidos em grande escala pelo crescimento expressivo do desmatamento na Amazônia Legal, um fenômeno de classe muito complexo, que não pode ser reivindicado a um único fator (ALENCAR et al., 2004).

O Estado do Maranhão encontra-se na transição entre o Nordeste e a região amazônica, dividido em quatro biomas: Costeiro, Cerrado, Amazônia e Caatinga. A Amazônia maranhense (Figura 1) é localizada na parte ocidental do Maranhão, entre as coordenadas: 0°47'33" e 05°37'02" de latitude Sul e 43°37'54 e 48°53'05" de longitude Oeste (MARTINS e OLIVEIRA, 2011).

Há anos, a Amazônia maranhense vem sendo submetida ao desmatamento, retirada ilegal de madeira, mineração, produção de carvão, caça ilegal e, especialmente, a introdução de pastagens para a criação de animais bovinos. De acordo com a estimativa do desmatamento para o ano de 2019, publicada pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), as taxas de cortes rasos na Amazônia brasileira aumentaram na ordem de 29,54% em comparação a 2018, que foi de 7.536 km<sup>2</sup> (INPE, 2020).

O aumento das áreas agrícolas, pastagens, extração de madeira e a expansão da infraestrutura são os motivos diretos do desmatamento na Amazônia (GEIST e LAMBIN, 2002). Dados do Projeto Terra Class (INPE; EMBRAPA, 2020) indicam que cerca de 62% das áreas desmatadas da Amazônia brasileira, no ano de 2014, foram usadas como pastagens plantadas.



**Figura 1.** Mapa com a distribuição dos biomas localizados no território maranhense.

**Fonte:** MMA/IBGE (2017)

Historicamente, o crescimento das áreas com pastagens cultivadas na Amazônia pode ser revelado pela expansão da pecuária de corte, desenvolvida rapidamente a começar por meados da década de 1960, com a abertura de rodovias, dentre as quais a Belém – Brasília (BR 010), e políticas públicas de incentivos fiscais para a produção de alimentos, que tornaram a região amazônica em uma nova fronteira agrícola do país (DIAS-FILHO, 2014).

A conversão das florestas nativas em pastagens ou campos agrícolas é caracterizada pela abertura de clareiras por práticas de corte, derrubada e queima da vegetação, conhecida na região como “coivara” ou “agricultura de corte e queima”, realizada principalmente por agricultores familiares. Em áreas agrícolas maiores, o solo também pode ser preparado por uma gradagem de discos, incorporando-se calcário em quantidade suficiente para elevar a saturação de bases a 50% na camada de 0-20 cm e em seguida é usada uma grade leve (CARVALHO et al., 2009). Nesse modelo de sucessão, o fogo desempenha papel fundamental, a curto prazo, no aumento expressivos das quantidades de potássio, cálcio e magnésio, em razão da adição de cinzas ao solo (ARAÚJO et al., 2011).

Contudo, as queimadas na região amazônica são apontadas como a maior responsável pela emissão de gases do efeito estufa (GEE) no Brasil. Davidson et al. (2008) comparando as

emissões de GEE pelo solo entre sistemas tradicionais de corte e queima e roças sem queima (*mulching*) na Amazônia, concluíram que as emissões totais de GEE são, pelo menos, cinco vezes menores na roça sem queima. O processo de conversão da terra nos trópicos também é uma das maiores causas de perda de biodiversidade, com efeitos negativos tanto na diversidade de espécies e funcionalidade dos microrganismos do solo, quanto na sustentabilidade da produção agrícola (FAO, 2020).

A Amazônia Legal maranhense apresenta uma diversidade de ocupação, no qual caracterizam-se especialmente pela ocupação da agricultura familiar, a qual realiza atividades conjugadas ao subsistema de pastagem, para a criação tradicional de bovinos e agricultura, ocupando 1,77% das áreas da região (INPE, 2013).

Já as áreas de vegetação secundária, que são caracterizadas por áreas em processamento de regeneração da vegetação arbustiva, ou arbórea depois de corte da floresta, ou que foram usadas para a execução de silvicultura e agricultura regular, com espécies nativas ou exóticas, ocupam 7,45% do território da região. As áreas em processos de reflorestamento ocupam somente 0,53% da localidade da Amazônia Legal Maranhense, setor inferior a soma das áreas usadas para agricultura e áreas de pastagem (INPE, 2013).

As áreas ocupadas por pastagens, nos distintos estágios de degradação, ocupam 22,73% do território da Amazônia Legal maranhense. Desse total, 10,64% são áreas de pastagem em processamento vantajoso, com 90 a 100% de abrangência do solo por gramíneas. Tais áreas possuem grande concentração da pecuária de corte bovina, localizada especialmente na Região Tocantina. (INPE, 2013). Considerando como áreas de início de processamento de degradação com abrangência do solo por gramíneas entre 50 a 80%, agre animais bovinos a vegetação arbustiva esparsa com abrangência entre 20 a 50% do solo, as áreas de pasto “sujo” ocupam 5,93% (INPE, 2013).

Áreas denominadas de regeneração com pasto, definidas como áreas com início do processo de regeneração da vegetação nativa, com dominância de espécies arbustivas e arbóreas, depois da utilização como áreas de pastagem cultivada, conhecidas na região como “Áreas de Capoeira”, ocupam 6,14% do território da região. O estágio final do processo de degradação da pastagem, definido pela exposição do solo acima de 50%, apresenta 0,02% (INPE, 2013).

A área total de pastagens (naturais e plantadas) no Brasil ocupa cerca de 158,6 milhões de hectares, sendo 27,5 milhões destes concentrados na região Nordeste. No estado do Maranhão encontram-se 6 milhões de hectares. O Estado do Maranhão possui o segundo maior

rebanho bovino da região Nordeste, sendo as espécies do gênero *Urochloa* (sinonímia *Brachiaria*) as mais utilizadas para a formação de pastagem (IBGE, 2017). As espécies do gênero *Urochloa*, em geral, não são muito exigentes em relação à fertilidade do solo, contudo, o manejo inadequado tem contribuído para aumentar a degradação nas áreas cultivadas com pastagens. O Brasil apresenta aproximadamente 70 milhões de hectares de pastagens em algum estágio de degradação, comprometendo a atividade pecuária e tornando este sistema pouco sustentável (IBGE, 2017).

### **3.2 Sistemas Integrados de Produção**

A mudança da vegetação natural para sistema de exploração agropecuária provoca modificações nas características do solo (KUMAR et al., 2017). Buscando minimizar os impactos provocados pelos vários sistemas de manejo e proporcionar o crescimento na produção de forma sustentável surgem os diversos modelos de integração entre os sistemas agropecuários. A adoção de sistemas que proporcionem uma menor degradação do solo pode ser considerada importante solução tecnológica para uma produção sustentável (WITTEWER et al., 2017).

O plantio direto (PD) e integração entre sistemas de plantio vêm sendo alternativa na minimização dos impactos provocados pela utilização inapropriada do solo, pois mantém resíduos culturais na superfície, constituindo-se de importante técnica para a preservação e recuperação da capacidade produtiva do solo sob cultivo em regiões de clima tropical e subtropical (KASSAM et al., 2015)

Os sistemas integrados (SI) merecem ser destacados neste trecho como uma estratégia bastante promissora. São conceituados pelo cultivo combinado de culturas agrícolas, pecuária e/ou silvicultura nas mesmas áreas. Eles podem ser capazes de aumentar a fertilidade e o conteúdo de matéria orgânica no solo. Isto favorece a produção de biomassa e permite maiores taxas de lotação em pastagens (BUNGENSTAB, 2012). Este crescimento na produtividade total do sistema representa uma vantagem direta para os agricultores, favorecendo maior retorno financeiro e conservação do solo a longo tempo (GIL et al., 2015).

Tanto os agricultores como a sociedade podem se favorecer dos SI, uma vez que a preservação da fertilidade do solo é crítica para a conservação dos recursos naturais e prestação de serviços ambientais (LEMAIRE et al., 2014; SALTON et al., 2014).

Os sistemas integrados podem incluir culturas anuais e/ou perenes, diferentes espécies de árvores e diversos arranjos espaciais. Densidades de plantio, operações de campo e a

frequência de rotação entre culturas e gramíneas também variam. A literatura baseada em ensaios de campo afirma que estes sistemas podem contribuir para o crescimento dos estoques de carbono nos solos (CERRI et al., 2010; CARVALHO et al., 2014; PIVA et al., 2014).

Segundo Balbino et al. (2011) os sistemas de integração podem ser classificados e definidos em quatro grandes grupos: a) Integração Lavoura-Pecuária (ILP) ou Agropastoril: sistema de produção que integra o componente agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e em um mesmo ano agrícola ou por vários anos, em sequência ou intercalados. b) Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril: sistema de produção que integra o componente pecuário (pastagem e animal) e florestal, em consórcio. Este sistema de produção é mais direcionado para áreas com dificuldade de implantação de lavouras, por isso, inclui apenas os componentes florestal e pecuário na mesma área. c) Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Silviagrícola: sistema de produção que integra o componente florestal e agrícola pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas anuais ou perenes. d) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Agrossilvipastoril: sistema de produção que integra os componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, incluindo também o componente florestal, na mesma área. O componente “lavoura” restringe-se ou não à fase inicial de implantação do componente florestal.

O Brasil possui 11.468.124 ha de áreas com sistema integrados de produção, onde o estado do Maranhão possui cerca de 69.087 ha com sistemas integrados, representando assim 1.44% de toda área sob uso agropecuário no estado. Dentro dessa área, 88% é de sistema integração lavoura-pecuária e apenas 12% é de sistema integração pecuária-floresta (EMBRAPA, 2016).

A base desse progresso, como já vem sendo observado, deverá ser a reutilização das áreas já desmatadas e que se encontram improdutivas (ou seja, abandonadas), ou com baixa produtividade (ou seja, subutilizadas), reduzindo desmatamentos e tornando a atividade mais sustentável (DIAS-FILHO, 2006).

### **3.3 Qualidade do solo em Sistemas Integrados de Produção**

A qualidade do solo (QS) é fator determinante no crescimento da produtividade agrícola, tendo como conceito a capacidade de o solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, conservar a produtividade de plantas e animais, preservar ou reforçar a

qualidade do ar e da água e proporcionar a saúde das plantas, dos animais e dos homens (DORAN, 1997).

Avaliar a QS é uma tarefa difícil, devido à complexidade do sistema solo-planta. A observação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo é considerada, por muitos pesquisadores, a forma mais adequada de medir e monitorar a sua conservação ou qualquer processo de degradação em curso (HAVLICEK, 2012).

A percepção de que o solo é um recurso essencial para o desempenho dos ecossistemas, e a certificação de que os processos de degradação têm afetado uma quantidade considerável dos solos atualmente em utilização, estimulou o interesse pelo entendimento da QS para análise da sustentabilidade ambiental (STAVI e LAL, 2015; BARBIER e HOCHARD, 2016). A diminuição da degradação e a restauração de terras atualmente degradadas são ações urgentemente necessárias para preservar a função e a produtividade do ecossistema, mitigar as mudanças climáticas, conservar a biodiversidade e garantir a produção de alimentos e o fornecimento de recursos (KEESSTRA et al. 2016).

A determinação de atributos globais apropriados de qualidade do solo ajudará os países a avaliar o progresso que estão superando para atingir os objetivos e decidirem que áreas escolher e alocar recursos (COWIE et al., 2018). Dessa maneira, a compilação adequada de atributos de solo, aliada à implementação efetiva de metodologias adequadas de controle serão decisivas para atingir termos de qualidade baseados em recursos do solo (TÓTH et al., 2018).

Os atributos de qualidade são divididos em três grandes categorias: 1) Efêmeros: modificações que ocorrem em curto espaço de tempo ou aqueles que são modificados pelas práticas de cultivo (disponibilidade nutricional, umidade do solo, densidade, pH, etc.); 2) Permanentes: modificações intrínsecas do solo (profundidade, textura, mineralogia, etc.); 3) Intermediários: são modificações que demonstram, a real capacidade de um solo em realizar suas utilidades e são capazes de inferir sobre a sustentabilidade de um sistema (biomassa microbiana, respiração, carbono orgânico total, etc.) (TÓTH et al., 2018).

A matéria orgânica do solo (MOS) tem potencial para ser usada como atributo símbolo da QS, uma vez que além de satisfazer o requisito básico de ser sensível a modificações pelo manejo do solo, é ainda fonte primária de nutrientes às plantas, influenciando na estrutura do solo, com consequência na infiltração, retenção de água e susceptibilidade à erosão (DLAMINI et al., 2016).

Solos tropicais, intensamente intemperizados, contêm como uma das suas principais características químicas a baixa capacidade de troca de cátions (CTC). Nesses solos, o teor de MOS possui importância preponderante na CTC efetiva (PAUL, 2016).

Então, a dinâmica da MOS possui importância chave no conhecimento das alterações provocadas pelo manejo, que se aplica ao solo sobre a QS e na sustentabilidade produtiva e econômica de um sistema de exploração agrícola (MIELNICZUK, 1999; DLAMINI et al., 2016).

Vários estudos demonstram incrementos nos teores de nutrientes em sistemas de integração em diferentes regiões e tipos de solo (BONINI et al., 2016; CARVALHO et al., 2015; MAIA et al., 2006; SANTOS et al., 2011), geralmente, por dois motivos: pela rápida ciclagem de nutrientes no solo, disponibilizados na forma mineralizada por meio das fezes e urina (BALBINOT JR et al., 2009), e a eficiência no uso de fertilizantes, em função das diferentes necessidades das culturas em rotação (MACEDO, 2009).

Relatos na literatura têm mostrado o aumento nos teores de fósforo, potássio e MOS nos primeiros 10 cm de profundidade, bem como redução dos valores de pH (FREIRE et al., 2012; MACHADO et al., 2011). Meneses et al. (2015) observaram que um solo Luvisolo Crômico Órtico típico, sob sistema IPF apresentaram valores superiores ao sistema tradicional para P, K, pH e saturação por bases.

Iwata et al. (2012); Lima et al. (2011) e Maia et al. (2006) verificaram que o sistema IPF promoveu melhorias nos atributos químicos do solo, como aumento do pH, redução da saturação por alumínio, aumento dos teores de nutrientes e maior estabilidade da qualidade química do solo sob efeito da sazonalidade. Por outro lado, em estudo realizado por Diel et al. (2014), em sistemas de cultivo exclusivos e de integração lavoura-pecuária-floresta, em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, constatou-se que os sistemas integrados de produção não proporcionaram mudanças acentuadas nos atributos químicos do solo. Isso pode ter acontecido devido ao curto período de implantação do sistema, que neste estudo foi de apenas dois anos.

De maneira geral, os atributos químicos são agrupados em variáveis relacionadas com o conteúdo da MOS, acidez do solo, conteúdo de nutrientes, elementos fitotóxicos e determinadas relações como a saturação por base e por alumínio (ARAÚJO et al., 2012). Tendo em vista que a qualidade física do solo envolve uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas, que fornecem meios para o funcionamento do solo, o monitoramento adequado da QS só poderá ser realizado utilizando-se atributos que reflitam a capacidade de

produção do solo e sua sustentabilidade. Para isso, é necessário definir as funções do solo e identificar os atributos associados a estas (DORAN e PARKIN, 1994). Para a avaliação da qualidade física do solo é adequado estudar a distribuição de tamanhos de partículas, resistência do solo a penetração mecânica, profundidade em que as raízes crescem, taxa de infiltração de água no solo, retenção e disponibilização de água às plantas (REICHERT et al., 2003; DORAN e PARKIN, 1994).

De acordo com Reichert et al. (2007), a densidade e a porosidade do solo são atributos relacionados com alterações no volume de solo, portanto, altamente relacionadas com a compactação do solo, que é responsável pela redução dos macroporos e, conseqüentemente, pela infiltração de água e aeração do solo. Segundo Secco et al. (2005), alguns atributos físicos do solo, como densidade e espaço poroso, podem ser utilizados como atributos da qualidade física do solo, de acordo com o manejo a que o solo está sendo submetido. Em sistemas de integração lavoura-pecuária Lanzanova et al. (2007) demonstraram que a intensidade de pastejo influencia negativamente a taxa de infiltração de água, densidade e porosidade do solo.

Os sistemas integração pecuária-floresta, foram eficientes para manutenção e até melhoria da fertilidade e dos estoques de carbono do solo (COSTA et al., 2015). Os resíduos vegetais presentes na superfície do solo proporcionam melhorias nas propriedades físicas (agregação das partículas e diminuição da compactação do solo), químicas (aumento nos teores de matéria orgânica na decomposição e mineralização dos resíduos vegetais) e biológicas (aumento da atividade de microrganismos) do solo (COSTA et al., 2015).

Especificidades existentes entre os sistemas de manejo podem produzir efeitos distintos nas propriedades físicas do solo. Efeitos como a compactação do solo podem surgir em consequência do uso de máquinas, cada vez maiores e mais pesadas, e do pisoteio animal, podendo reduzir a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo, contribuindo para um incremento no escoamento superficial de água e redução no crescimento das plantas, em virtude da diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento das raízes e aeração deficiente (REICHERT et al., 2007).

Dessa forma, a manutenção da qualidade do solo representa o fator primordial de uma agricultura sustentável (SALTON et al., 2015) e, a sua avaliação possibilita a determinação de medidas adequadas de manejo, visando à conservação do solo e melhorias nos rendimentos das culturas (MARZAIOLI et al., 2010), destacando-se com enorme versatilidade a utilização dos sistemas integrados na construção da fertilidade do solo, na ciclagem de nutrientes (FERREIRA et al., 2018) e incremento dos estoques de C do solo e mitigação dos GEE (SÁ et al., 2017).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Monalisa (Longitude UTM 234438.00 m E; Latitude UTM 9423313.00 m S) e altitude de 316 m, localizada no município de São Francisco do Brejão, situada no Sudoeste do Estado do Maranhão, inserida no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica (Figura 3A, B e C).

O clima da região é caracterizado como AW<sup>7</sup> (quente e úmido), segundo classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 26 °C, com mínima de 22,3 °C e máxima de 33,5 °C, a precipitação pluviométrica está entre 2.000 a 2.400 mm anuais e a umidade relativa do ar anual entre 79% e 82%. Há duas épocas bem definidas, as quais são o período chuvoso (novembro a maio) e período seco (junho a outubro) (INMET, 2020).

A área apresenta relevo suave ondulado e o solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo segundo Santos et al. (2018), com a seguinte composição granulométrica para ambas as áreas: 185 g dm<sup>-3</sup> de argila, 135 g dm<sup>-3</sup> de silte e 680 g dm<sup>-3</sup> de areia na camada de 0-20 cm de profundidade.

Foram coletadas amostras de solo em três áreas com a mesma classe de solo e com diferentes usos: área manejada com sistema IPF, área sob PC e área de FS não antropizada (Figura 2 e Figura 3D).



**Figura 2.** Vista aérea das áreas cultivadas com PC, FS e IPF na Fazenda Monalisa, localizada no município de São Francisco do Brejão, MA, no ano de 2020. (Fonte: Google Earth Pro)

Toda a área demonstrada na Figura 2 foi desmatada por volta de 1960 para a introdução de pastagem. No ano 2000 a pastagem da área onde atualmente se encontra o fragmento de floresta secundária foi abandonada, e a vegetação iniciou o processo de recuperação natural em 9 ha de área, a qual é mantida como reserva legal. Adjacente a esta área foram mantidos 34 ha de pastagem convencional com braquiária, com presença da vegetação de “juquira”, sem histórico de fertilização mineral.

Em 2016 o sistema IPF foi implantado em 70 ha da propriedade. Anteriormente à implantação do IPF, a área era utilizada para pastagem de braquiária, com presença de vegetação de porte baixo comumente denominada “juquira”. No ano de 2015, no processo de implantação do IPF, a área foi submetida à derrubada da vegetação existente com trator de esteira, posteriormente foi realizado o preparo da área, primeiramente com uma passagem de grade aradora acoplada em trator de esteira, seguida de uma operação para retirada de excesso de galhada. Ainda no preparo da área foi passado mais uma vez a grade aradora acoplada em trator de pneus, e por último foi realizado os sulcos na linha de plantio para receber as mudas do eucalipto.

As mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) foram plantadas com espaçamento 10 x 2 metros (400 árvores/hectares - fileira simples). Antes do plantio foi utilizado 300 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato natural reativo, aplicado em toda área. Após três meses, foi aplicado 800 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico para correção de acidez do solo, e um ano após o plantio, foi realizada a adubação de cobertura com 100 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante mineral 20-00-20 de NPK.

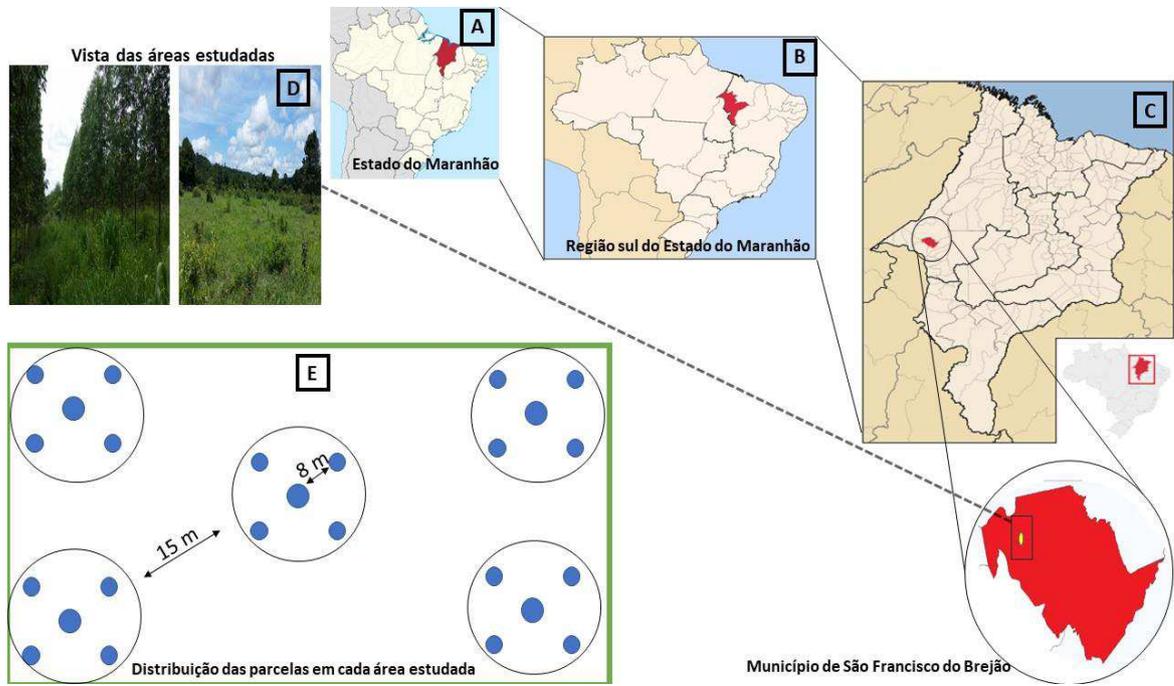
Entre as fileiras, com o espaçamento de 10 m, foi realizado o plantio da gramínea braquiária (*Urochloa brizantha*) e manejada para a alimentação animal. A introdução dos animais para a pastagem ocorreu após 18 meses da implantação do sistema com a lotação de 2 unidades animais (UA) por hectare.

#### **4.2 Amostragem do solo**

Na área sob IPF, FS e PC foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de terra para avaliação de alguns atributos químicos e físicos, respectivamente, bem como a determinação da resistência mecânica do solo à penetração. As amostragens foram realizadas no período chuvoso e no período seco, fevereiro de 2019 e agosto de 2019, respectivamente.

Em cada área foi delimitada uma gleba representativa, composta de cinco unidades amostrais equidistantes 15 metros entre si, totalizando cinco repetições para cada área de estudo. Dentro de cada unidade amostral foram retiradas cinco amostras simples de terra,

equidistantes oito metros entre si, para compor as amostras compostas (Figura 3E). As amostras deformadas foram coletadas em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Cada ponto de coleta de terra foi registrado com auxílio de um receptor GNSS (GPS).



**Figura 3.** Estado do Maranhão (A); Região sudoeste do estado do Maranhão (B); Município de São Francisco do Brejão (C); Áreas estudadas (D); Esquema de distribuição das unidades amostrais dentro de cada área estudada (E).

Utilizou-se como instrumento de coleta uma pá de corte. Equipamento de manuseio simples e que possui alcance de profundidade desejada para a realização da coleta, sendo possível visualizar a camada de solo retirada, e assim foi realizada a medição de cada camada com uma fita métrica graduada, separando-as (Figura 4 A e B).



**Figura 4.** Medição das camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade do solo coletado com uma pá de corte na área experimental (A); Corte e retirada das camadas de solo separadamente, para compor a amostra composta (B).

Após a coleta, as amostras de terra foram acondicionadas em saco plásticos abertos, posteriormente secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm, resultando em terra fina seca ao ar (TFSA).

As amostras indeformadas foram retiradas nos mesmos pontos determinados para as coletas das amostras deformadas, utilizando anéis cilíndricos de aço inox, com volume de 100 cm<sup>3</sup> (Figura 5 A e B). As amostras indeformadas do solo foram coletadas nas duas profundidades 0-5 e 5-10 cm.



**Figura 5.** Inserção do anel volumétrico no solo para retirada das amostras indeformadas de terra (A); Anel volumétrico com a amostra indeformada de terra (B).

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) foi determinada com um penetrômetro de impacto, marca Sonda Terra, produzido em aço inoxidável 304, capaz de realizar os registros em camadas de até 60 cm de profundidade. Trata-se de um equipamento de ação mecânica no solo, determinando a resistência que este oferece à sua penetração.

Primeiramente, apoiou-se a ponteira da haste graduada no solo, mantendo o penetrômetro na posição vertical. Logo em seguida, colocou-se a ponteira contra o solo pressionando verticalmente e de forma constante. À medida que a escala graduada foi aprofundando sem nenhum impacto foi realizado o primeiro registro. Depois de estabilizado, realizou-se o segundo registro após um impacto, em seguida os registros foram efetuados a cada dois impactos, até a haste estabilizar a penetração, sendo mensurado até a camada de 20 cm (Figura 6A e 6B).



**Figura 6.** Posicionamento do penetrômetro de impacto na superfície do solo (A). Determinação da resistência mecânica do solo à penetração com um penetrômetro de impacto (B).

#### 4.3 Determinação dos atributos químicos e físicos do solo

Os seguintes atributos químicos foram determinados nas amostras de TFSA: pH em água, acidez potencial, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), alumínio trocável (Al), matéria orgânica do solo, capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m), de acordo com metodologia descrita por Teixeira et al. (2018).

Os valores de pH em água foram determinados por meio da medição eletroquímica da concentração de íons de  $H^+$  na solução do solo, utilizando-se um potenciômetro com eletrodo combinado; a acidez potencial foi determinada por titulometria (reação ácido-base). A determinação dos teores de Ca e Mg trocáveis foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica.

O P foi extraído com uma solução duplo ácida (Mehlich-1) e determinado por espectrofotometria, por meio da leitura da intensidade da cor em 660 nm; o K disponível no solo foi extraído com uma solução duplo ácida (Mehlich-1) e quantificado através da intensidade da emissão de K no fotômetro de chama.

A matéria orgânica do solo foi determinada pela oxidação da matéria orgânica do solo via úmida, aquecida em bloco digestor e a quantificação por titulação; o Al trocável do solo foi extraído com uma solução de sais e a quantificação por titulometria. Com os resultados obtidos foram calculados os seguintes atributos do solo, conforme equações descritas a seguir:

A soma de bases trocáveis (SB) de um solo, expressa em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , representa a soma dos teores de cátions trocáveis, exceto  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  (Equação 1).

$$\text{SB} = \text{K} + \text{Ca} + \text{Mg} \quad (1)$$

A capacidade de troca de cátions (CTC) determinada em pH 7, expressa em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , corresponde à soma das cargas negativas nas partículas microscópicas do solo (fração argila e matéria orgânica) retendo os cátions, tais como Ca, Mg, K, e (H + Al) (Equação 2).

$$\text{CTC}_{\text{pH}7,0} = \text{SB} + (\text{H} + \text{Al}) \quad (2)$$

A CTC efetiva é obtida pela soma dos cátions que efetivamente podem ser trocados no complexo de cargas. Os cátions que são somados para obtê-la são Ca, Mg, K e Al (Equação 3).

$$\text{CTC}_{\text{efetiva}} = (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al}) \quad (3)$$

A porcentagem de saturação por bases na CTC (V), expressa em %, refere-se à soma de cátions de caráter básicos trocáveis em relação à capacidade de troca de cátions determinada a pH 7,0 (Equação 4).

$$V\% = \frac{(\text{SB})}{\text{CTC}_{\text{pH}7,0}} \times 100 \quad (4)$$

A saturação por alumínio (m), expressa em %, indica a proporção de alumínio disponível em relação aos teores de bases trocáveis e alumínio na  $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$  do solo (Equação 5).

$$m\% = \left( \frac{\text{Al}}{\text{CTC}_{\text{efetiva}}} \right) \times 100 \quad (5)$$

O estoque do carbono do solo (EC), expresso em  $\text{Mg ha}^{-1}$ , foi calculado levando em consideração o teor de carbono orgânico (CO), a densidade do solo (Ds) e a espessura da camada de solo considerada (Equação 6).

$$\text{EC} = \text{CO} \times \text{Ds} \times e \quad (6)$$

As amostras indeformadas de solo foram analisadas no Laboratório de Manejo do Solo e da Água, da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão. Foram determinadas a densidade do solo, de acordo com metodologias descritas pela Embrapa (1997).

A densidade do solo ( $D_s$ ) foi determinada pela seguinte equação (Equação 7):

$$D_s = (\text{Massa seca} / \text{Volume total}) \quad (7)$$

Onde, densidade do solo, expressa em  $\text{g dm}^{-3}$ , é definida como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seco a  $105^\circ\text{C}$  e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros.

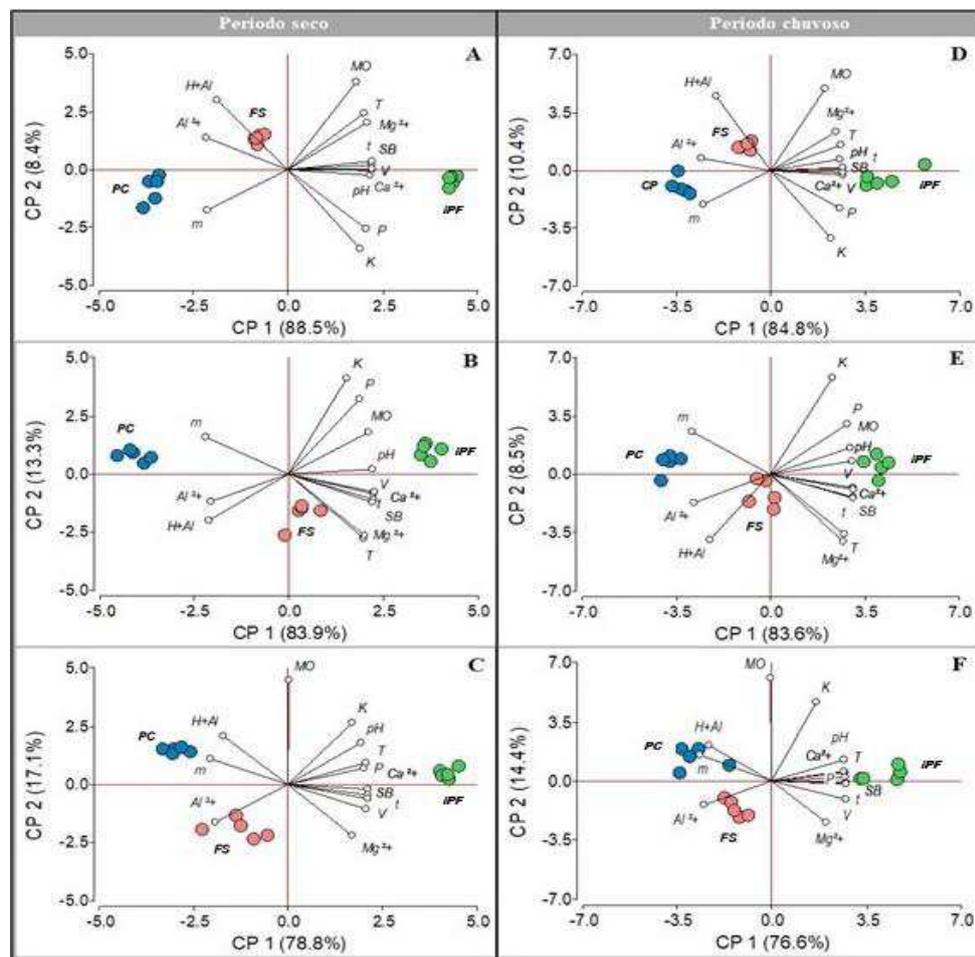
#### **4.4 Análise estatística**

Para garantir a análise de suposições de variância (ANOVA), os dados foram primeiramente verificados quanto à normalidade e homocedasticidade pelos testes Shapiro-Wilk ( $p > 0,05$ ) e Bartlett ( $p > 0,05$ ), respectivamente. Uma vez atendidas essas premissas, os dados foram analisados através da ANOVA pelo software R versão 3.5.2.

Para avaliar o conjunto de atributos químicos de solo, de modo a tornar mais fácil a interpretação e revelar similaridades e diferenças entre as áreas IPF, FS e PC, foi aplicada estatística multivariada pela análise de componentes principais (ACP). Para a densidade do solo, resistência mecânica do solo à penetração e estoque de carbono orgânico do solo, utilizou-se esquema fatorial  $3 \times 2$  (três usos da terra e duas profundidades), no caso de diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Para os atributos químicos, foi realizada a análise fatorial  $3 \times 3$ , (três usos da terra e três profundidades).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 7 apresenta graficamente a ACP em duas dimensões, representadas pelo componente principal 1 e o componente principal 2. A ACP foi realizada a partir dos atributos químicos do solo. A distribuição espacial das 13 variáveis está representada por setas e os usos da terra, PC, IPF e FS, por pontos com cores. A intercorrelação entre as variáveis é dada pelos ângulos entre as setas e a importância destas pelo comprimento das setas, que permitiu visualizar as semelhanças e diferenças entre os usos da terra com base nas variáveis analisadas.



**Figura 7.** Análise de componentes principais (ACP) dos atributos químicos do solo nas camadas de 0-5 cm (A-D) e 5-10 cm (B-E) e 10-20 cm (C-F) de profundidade, em fevereiro de 2019 (período chuvoso) e agosto de 2019 (período seco), em áreas com diferentes usos da terra na Fazenda Monalisa, MA, Brasil. Pastagem convencional (PC); Floresta secundária (FS) e Integração pecuária-floresta (IPF). Matéria orgânica (MO), soma de bases (SB), potencial hidrogeniônico (pH), saturação de bases (V), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), fósforo (P), saturação por alumínio (m), potássio (K), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca de cátions pH 7,0 (T) e capacidade de troca de cátions efetiva (t).

A análise multivariada foi aplicada para verificar a influência dos atributos químicos no

agrupamento das três áreas estudadas. Os resultados demonstram um padrão de agrupamento semelhante para as três profundidades e os dois períodos do ano avaliados, com formação de três grupos bem distintos.

Ao verificar a camada de 0-5 cm, observa-se que a ACP explicou 88,5% da variância no primeiro componente principal e 8,4% na segunda, com um total de 96,9% da variância total do conjunto de dados nesta profundidade, no período seco (Figura 7A). Para o período chuvoso, a ACP explicou 84,8% da variância no primeiro componente principal e 10,4% no segundo, com um total de 95,2% da variância total do conjunto de dados (Figura 7D). Para a profundidade de 5-10 cm, os componentes explicaram 97,2% e 92,1% da variância total do conjunto de dados no período seco e chuvoso, respectivamente (Figura 7B e E). Na camada 10-20 cm de profundidade, a ACP explicou 95,9% e 91% para o período seco e chuvoso (Figura 7C e F).

Para todas as camadas avaliadas, em ambas as estações, o primeiro componente principal separou a área com o IPF das demais, em função da maior influência do pH, teor de matéria orgânica, P, Ca, Mg e K, com reflexo na SB, CTC (T e t) e V verificada nessa área. O segundo componente separou a área de PC, influenciada, principalmente, pela variável saturação por Al

De acordo com a ACP, os atributos maiores e menores que separaram os diferentes usos da terra foram os cátions de caráter básico e os componentes da acidez. A FS, apesar de valores de MOS similares aos da área de IPF, foi separada desta variável devido a maior influência dos teores de Al e H+Al.

Conforme Bayat et al. (2013), a seleção de componentes principais é capaz de explicar a maior fonte de variação dentro das variáveis originais, selecionando apenas aquelas com informação relevante. Na ACP obtida, verificou-se que os atributos químicos do solo apresentaram diferentes estruturas de dependência com os usos da terra.

Portanto, pode-se concluir que a área de IPF caracteriza-se por apresentar solo com maior reservas de nutrientes e MOS. Entretanto, na ACP, as áreas deslocadas para a esquerda, apresentam o inverso em diferentes graus de intensidade, o que explica a distinção entre os solos em decorrência dos diferentes usos da terra. Os resultados indicam as alterações dos atributos químicos do solo causada pela introdução do sistema de integração, evidenciando assim a influência do manejo da fertilidade na área, como a aplicação do fosfato natural reativo, a calagem e fertilização realizadas na sua implantação.

Com bases nos resultados obtidos é possível traçar estratégias de manejo para áreas cultivadas com pastagens, pois é possível inferir que a área de PC necessita de correção da

acidez do solo. Em um planejamento para a recuperação da área de PC a médio prazo, deve-se proceder com a aplicação de fontes de P e K, além do aumento nos teores de MOS, a partir de práticas de manejo conservacionistas.

Esses resultados corroboram com o resultado de Souza et al. (2018), que avaliaram atributos químicos do solo em sistema de integração de braquiária com o componente arbóreo Teca, em solo tipo Cambissolo Háplico. Através da ACP, os autores encontraram forte correlação para os atributos Ca, Mg, SB, CTC, pH e MOS com o sistema de integração. Santos et al. (2018) avaliaram a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e glomalina em ecossistemas de Mata Seca, em diferentes estádios sucessionais no estado de Minas Gerais e, através da ACP, verificaram correlação entre as variáveis P, Ca, Mg, K e pH no mesmo quadrante para os estádios iniciais. Esses resultados evidenciam o efeito positivo do sistema de integração e da deposição de MOS na melhoria dos atributos químicos do solo.

Com estes resultados, efetuou-se a validação da ACP mediante análise fatorial 3 x 3, três usos da terra e três profundidades (Tabelas 1 e 2). A análise química do solo, das áreas com os três diferentes usos da terra, demonstrou que as áreas de PC apresentam os menores valores para os atributos da fertilidade do solo, e que a introdução de um sistema de integração promoveu melhorias em relação ao sistema de uso convencional, para solo arenoso do ecótono Cerrado-Floresta Amazônica Maranhense.

A matéria orgânica apresentou diferença entre os diferentes usos da terra, sendo que na camada superficial de 0-5 cm, os valores médios foram estatisticamente semelhantes na área de IPF e FS, No período chuvoso, a área com IPF apresentou 20,20 g Kg<sup>-1</sup> e a FS 20,06 g Kg<sup>-1</sup> de MOS. No período seco, as áreas de IPF e FS apresentaram 21,64 e 20,78 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. As áreas de IPF e FS apresentaram teores de MOS maiores que a área de PC, 11,84 e 12,50 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 1).

Segundo Dlamini et al. (2016), a MOS tem potencial para ser usada como atributo símbolo da QS, uma vez que além de satisfazer o requisito básico de ser sensível a modificações pelo manejo do solo, é ainda fonte primária de nutrientes às plantas, influenciando na estrutura do solo, com consequência na compactação do solo, infiltração, retenção de água e susceptibilidade à erosão.

A tendência de maior teor de MOS nas camadas superficiais para ambos os usos da terra, IPF e FS é devido à presença do componente arbóreo, que promove maior acúmulo de serapilheira em superfície do solo pela deposição de resíduos vegetais. Vários autores na literatura relatam que a decomposição da serapilheira promove a ciclagem de nutrientes, com

reflexos na fertilidade das florestas (DIDHAM 1998; CALDEIRA et al., 2008; HOOSBEEK et al., 2018).

O acúmulo de material vegetal em superfície na área de IPF ainda é favorecido pelo material vegetal da pastagem, que foi replantada na ocasião da implantação do sistema e, conseqüentemente, teve aumento na quantidade de biomassa superficial e subsuperficial, além dos excrementos bovinos depositados em superfície e da intensidade de pastejo ser moderada. Souza et al. (2009) relataram que a intensidade de pastejo apresenta influencia na adição de C e N em sistemas de integração, uma vez que há relação direta entre a altura do pasto e a massa de forragem da parte aérea da gramínea.

Os resultados obtidos corroboram com Loss et al. (2009), Souza et al. (2009), Silva et al. (2011) e Gazolla et al. (2015), que também verificaram aumento nos teores de matéria orgânica na camada superficial do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. Para eles, a elevada produção de biomassa e o baixo revolvimento do solo nesses sistemas de produção são fundamentais para a manutenção de valores significativos de MOS sobre o solo.

Em sistemas conservacionistas, a ausência de revolvimento do solo, aliado à permanência do material orgânico, favorecem a maior atividade de organismos responsáveis pela transformação do tecido vegetal em compostos orgânicos, dentre outros elementos fundamentais para o funcionamento do agroecossistema (BARTZ et al., 2014). A manutenção da matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção é fundamental para a conservação do solo, pois a palhada acumulada pelas plantas de cobertura e os restos culturais proporcionam um ambiente favorável à recuperação e manutenção dos atributos físicos e químicos do solo (COSTA et al., 2015).

Segundo Suzuki et al. (2007), a matéria orgânica do solo possui papel fundamental na liberação de nutrientes para as plantas. As alterações provocadas na comunidade de microrganismos do solo, através da introdução dos sistemas integrados e da condução de culturas em consórcio, interferem na decomposição da matéria orgânica e liberação de nutrientes, favorecendo a ciclagem de nutrientes no solo (ASSIS et al., 2019).

Os teores de MOS diminuíram em profundidade nas áreas de IPF e FS nos dois períodos avaliados. Contudo, para a área de PC este padrão não se repetiu, pois na camada abaixo de 10 cm, a área manejada com pastagem apresentou o maior teor de MOS comparado aos outros usos da terra (Tabela 1).

**Tabela 1.** Valores médios dos atributos químicos MOS, pH (H<sub>2</sub>O), P, K, Ca, Mg, Al, H+Al em áreas de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária

(FS), em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm de profundidade, em fevereiro (período chuvoso) e agosto (período seco) de 2019.

PERÍODO CHUVOSO									
Prof. (cm)	MOS (g kg <sup>-1</sup> )			pH (H <sub>2</sub> O)			P (mg dm <sup>-3</sup> )		
	Uso da terra			Uso da Terra			Uso da terra		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
0-5	11,84 bC	20,20 aA	20,06 aB	4,34 aC	5,10 aA	4,66 aB	2,92 aB	13,74 aA	3,12 aB
5-10	12,92 abC	17,54 bA	14,54 bB	4,16 bC	5,02 aA	4,50 bB	2,36 bB	6,16 bA	2,68 abB
10-20	13,70 aA	12,50 cB	10,00 cC	4,08 bB	4,88 bA	4,08 cB	2,12 bB	4,96 cA	2,48 bB
CV (%)	5,1			1,97			6,93		
PERÍODO CHUVOSO									
Prof. (cm)	K			Ca			Mg		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
	0-5	0,14 aB	0,30 aA	0,09 aC	0,51 aC	3,32 aA	1,22 aB	0,41 aC	1,28 aA
5-10	0,09 bB	0,19 bA	0,06 bC	0,40 aC	1,94 bA	1,18 aB	0,34 aB	0,87 bA	0,75 aA
10-20	0,06 cA	0,08 cA	0,03 cB	0,29 aC	1,67 bA	0,57 bB	0,22 aB	0,47 cA	0,37 bAB
CV (%)	14,24			21,08			24,82		
PERÍODO CHUVOSO									
Prof. (cm)	Al			H+Al			m		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
	0-5	0,22 aA	0,00 bC	0,17 bB	2,01 abA	1,33 bB	2,25 aA	19,93 cA	0,00 cC
5-10	0,22 aA	0,15 aC	0,19 bB	2,29 aA	1,68 aB	2,09 aA	27,40 bA	6,94 bC	10,38 bB
10-20	0,22 aA	0,14 aB	0,22 aA	1,91 bA	1,47 abB	1,68 bAB	35,92 aA	9,89 aC	23,95 aB
CV (%)	10,03			11,44			10,08		
PERÍODO SECO									
Prof. (cm)	MOS (g kg <sup>-1</sup> )			pH (H <sub>2</sub> O)			P (mg dm <sup>-3</sup> )		
	Uso da terra			Uso da terra			Uso da terra		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
0-5	12,50 bB	21,64 aA	20,78 aA	4,28 aC	5,06 aA	4,54 aB	2,64 aB	13,24 aA	2,50 aB
5-10	14,44 aC	18,14 bA	15,43 bB	4,10 bC	4,80 bA	4,50 aB	2,30 abB	5,48 bA	2,30 abB
10-20	14,42 aA	13,40 cB	11,00 cC	4,10 bB	4,80 bA	3,94 bC	1,98 bB	4,52 cA	2,06 bB
CV (%)	3,7			1,69			5,56		
PERÍODO SECO									
Prof. (cm)	K			Ca			Mg		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
	0-5	0,10 aB	0,25 aA	0,07 aC	0,48 aC	2,61 aA	1,21 aB	0,39 aC	1,00 aA
5-10	0,06 bB	0,13 bA	0,05 bC	0,31 bC	1,54 bA	1,16 aB	0,29 bB	0,64 bA	0,65 bA
10-20	0,04 cB	0,09 cA	0,02 cC	0,23 cC	1,16 cA	0,49 bB	0,16 cB	0,35 cA	0,29 cA
CV (%)	11,23			4,46			10,34		
PERÍODO SECO									
Prof. (cm)	Al			H+Al			m		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
	0-5	0,24 aA	0,00 bC	0,20 bB	2,45 aA	1,37 aB	2,43 aA	17,05 cA	0,00 bC
5-10	0,25 aA	0,17 aC	0,22 bB	2,25 abA	1,63 bB	2,08 bA	21,11 bA	4,86 aC	8,86 bB
10-20	0,24 aA	0,17 aB	0,25 aA	2,43 bA	1,55 abB	1,70 cB	28,48 aA	6,21 aC	18,88 aB
CV (%)	6,93			8,43			14,56		

\*Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tanto na área de IPF como na PC, a presença da braquiária pode ter contribuído de forma significativa no volume de biomassa subterrânea, devido ao sistema radicular abundante.

Essa contribuição foi maior na área de PC, pois essa não foi submetida a nenhuma operação mecânica (subsolagem, aração, gradagem), como ocorreu na área de IPF para preparo da área e implantação do sistema. As operações agrícolas podem ter acelerado a oxidação da biomassa subterrânea das pastagens anteriormente presentes naquela área.

Segundo Silva et al. (1994), quando o solo é submetido ao preparo mecânico com intenso revolvimento, o estoque de MOS apresenta declínio. Esta perda de MOS se reflete de na CTC do solo (MENDONÇA et al., 1995; CIOTTA et al., 2003).

Em áreas com rotação de culturas em sistema IPF faz-se um aporte importante de fitomassa vegetal ao solo, principalmente quando se faz uso de plantas de cobertura como as braquiárias, para aumentar o crescimento radicular, assim como alimento para o animais bovinos (LOSS et al., 2011).

O solo da área com o sistema IPF apresentou maiores valores de pH comparados aos outros usos da terra. Na ocasião da instalação do sistema de integração foi aplicado calcário dolomítico, o qual foi incorporado na camada de 20 cm, promovendo a elevação do pH para 5,00 e 4,90, nos períodos chuvoso e seco, respectivamente (média das três profundidades avaliadas). Para a área de FS os valores médios de pH foram 4,41 e 4,33 e na PC os valores médios foram 4,19 e 4,16, para ambas as estações (Tabela 1).

Em virtude da correção da acidez do solo na área de IPF, conseqüentemente, os teores de Ca e Mg também foram, significativamente, superiores, enquanto os teores de Al e H+Al foram menores, comparados aos demais usos da terra (Tabela 1). Este resultado se repetiu para todas as profundidades. Para o Mg, a área de IPF e a FS apresentaram valores similares abaixo da camada de 0-5 cm de profundidade.

Quaggio (2000) afirma que em condições de acidez, a calagem promove a neutralização do Al, a elevação do pH e o fornecimento de Ca e Mg, possibilitando a proliferação de raízes, com reflexos positivos no crescimento da parte aérea das plantas.

Para Santos et al. (2013), a maior concentração de bases nas camadas superficiais do solo, como Ca e Mg, é atribuída a ciclagem de nutrientes, devido ao maior acúmulo de matéria orgânica em superfície, além do efeito do manejo do solo com correção e adubação.

Santos et al. (2011), Bonini et al. (2016) e Silva et al. (2019) avaliaram a produção de forragem e os atributos físicos e químicos do solo sob sistemas de integração. Os autores verificaram que o sistema, após dois anos de instalação, promoveu o aumento dos teores de Ca e Mg no solo. De acordo com Costa et al. (2015), as alterações químicas do solo em sistemas

integrados resultam do elevado acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo que, após a decomposição, proporcionam aporte de nutrientes ao sistema e estimulam a atividade biológica.

Os teores de alumínio trocável (Al) foram significativamente menores na área de IPF comparado à PC e FS. Como relatado anteriormente, a calagem realizada no sistema de integração promoveu a precipitação do elemento, que na camada entre 0-5 cm de profundidade apresentou valor zero, no período chuvoso e seco.

Para Sobral et al. (2015), os teores de Al iguais ou superiores a  $0,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  podem inibir o crescimento radicular e influenciar na disponibilidade de outros nutrientes para as plantas, especialmente o P, além de comprometer o processo de mineralização da matéria orgânica, com reflexos na redução da taxa de absorção (STEINER et al., 2012).

Para nenhum dos usos da terra os teores de Al ultrapassaram este limite. Nas áreas de PC e FS, que não tem histórico de calagem, os valores médios variaram entre 0,17 e 0,25  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , nos dois períodos do ano avaliados (Tabela 1).

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que até 10 cm de profundidade, a FS apresentou menores teores de Al trocável em relação à PC. Segundo Zamboni et al. (2007), uma das vantagens dos sistemas integrados, e áreas de floresta em relação aos sistemas convencionais de produção, é o acúmulo de MOS proveniente da elevada produção de biomassa, pois esse fato favorece a complexação de cátions, especialmente o Al.

Na área com o sistema IPF constatam-se os maiores valores de P em relação aos demais usos da terra, em todas as profundidades e estações, variando entre  $13,74 \text{ mg dm}^{-3}$  (0-5 cm) e  $4,52 \text{ unidade}$  (10-20 cm), enquanto para PC e FS os valores não ultrapassaram  $3,12 \text{ mg dm}^{-3}$  nas três profundidades avaliadas (Tabela 1). Os maiores valores de P na área de IPF podem ser explicados pela fertilização com aplicação do fosfato natural reativo, realizada na implantação do sistema.

Não houve diferença significativa entre a área de PC e FS para os teores de P disponível no solo, que foram estatisticamente semelhantes para todas as profundidades e período de avaliação.

Para todos os usos da terra, os valores de P foram maiores na camada superficial, o que pode ser atribuído à deposição de material vegetal sobre o solo. Como na FS, na área de IPF tem a presença do componente arbóreo, além da pastagem. O material vegetal proveniente do componente arbóreo e da pastagem se decompõe, mineraliza e libera o P, que devido a sua pouca mobilidade no solo, acumula-se na camada superficial (0-5 cm).

Os valores de K foram estatisticamente maiores na área de IPF para todas as camadas e estações analisadas, diferindo das áreas de PC e FS. A área de IPF apresentou o maior teor de K disponível, variando entre 0,08 mg dm<sup>3</sup> na camada de 10-20 cm e 0,30 mg dm<sup>3</sup> na camada de 0-5 cm.

A introdução do IPF seguiu o mesmo padrão para os teores de K disponível no solo, que foram maiores neste sistema, devido à fertilização mineral em função da implantação em 2016. Para todas as áreas avaliadas, os teores de K foram maiores até 5 cm, com valores que variaram entre 0,30 e 0,25 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na área de IPF, 0,14 e 0,10 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na área de PC e 0,09 e 0,07 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na área de FS, no período chuvoso e seco, respectivamente (Tabela 1). Para todos os usos da terra, o K diminui em profundidade.

As plantas são importantes na ciclagem de K, pois este nutriente ocorre na forma livre, podendo ser facilmente removido pela água após a senescência do tecido vegetal (Mielniczuk, 2005), acumulando-se nas cargas negativas, sejam da fração argila ou da MOS, presentes nos primeiros cm do solo.

Esse resultado corrobora com os resultados obtidos por Ferreira et al. (2009), que avaliaram a concentração de potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com os autores, o pastejo com baixa lotação animal nos sistemas de integração, apesar de propiciarem menor ciclagem de K, resultam em maiores teores do nutriente no solo, já que em áreas intensamente pastejadas, com alta lotação o elemento é perdido através do consumo excessivo da pastagem pelo animal e do processo de degradação ocasionado pelo pisoteio. A exportação de K, via carcaça dos animais, é pequena e, como salientado por Wilkinson e Lowrey (1973), uma alta fração (90 %) de K ingerido é excretada na urina.

Os menores teores de K disponível no solo foram verificados na área de FS. O K pode estar sendo absorvido pelo sistema radicular das árvores, as quais estão distribuídas em toda a área, e se acumulando na biomassa destas (TORNQUIST et al., 1999).

Meneses et al. (2015) afirmam que um solo Luvisolo Crômico Órtico típico, sob sistema IPF, apresentou valores superiores ao sistema tradicional para P, K, pH e saturação por bases, corroborando os resultados encontrados.

Os atributos da fertilidade do solo, SB, CTC<sub>ef</sub>, CTC<sub>pH7</sub> e V nos três usos da terra avaliados são consequência da disponibilidade dos teores de MOS, cátions básicos do solo e Al. Nos resultados de CTC pH 7,0 e CTC<sub>ef</sub> observa-se que, em geral, os maiores valores

médios foram encontrados nas camadas superficiais (0-5 cm), o maior deles na área sob IPF (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores médios de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTCpH 7,0), capacidade de troca catiônica efetiva (CTCef), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) em áreas de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm de profundidade, no período chuvoso (fevereiro) e seco (agosto) de 2019.

PERÍODO CHUVOSO						
Prof. (cm)	SB			V		
	Uso da terra			Uso da terra		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
0-5	1,06 aC	4,90 aA	2,22 aB	34,89 aC	78,33 aA	49,52 aB
5-10	0,83 aC	3,00 bA	1,99 aB	26,77 bC	64,17 bA	48,87 aB
10-20	0,57 aB	2,23 cA	0,97 bB	22,96 bC	59,99 bA	36,55 bB
CV (%)	16,94			7,56		
PERÍODO SECO						
Prof. (cm)	SB			V		
	Uso da terra			Uso da terra		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
0-5	0,97 aC	3,87 aA	2,05 aB	28,55 aC	73,82 aA	45,70 aB
5-10	0,66 bC	2,31 bA	1,86 bB	22,64 bC	58,60 bA	47,20 aB
10-20	0,43 cC	1,59 cA	0,81 cB	17,44 cC	50,52 cA	32,14 bB
CV (%)	4,39			3,25		
PERÍODO CHUVOSO						
Prof. (cm)	CTCpH7			CTCef		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
	0-5	3,07 abC	6,23 aA	4,47 aB	1,28 aC	4,90 aA
5-10	3,12 aB	4,68 bA	4,08 aA	1,05 aC	3,15 bA	2,19 aB
10-20	2,48 bB	3,70 cA	2,64 bB	0,79 aB	2,37 cA	1,19 bB
CV (%)	10,52			15,7		
PERÍODO SECO						
Prof. (cm)	CTCpH7			CTCef		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
	0-5	3,44 aC	5,24 aA	4,48 aB	1,21 aC	3,87 aA
5-10	2,91 bB	3,94 bA	3,94 bA	0,91 bC	2,48 bA	2,09 bB
10-20	2,46 cB	3,14 cA	2,51 cB	0,67 cC	1,76 cA	1,06 cB
CV (%)	5,99			4,05		

\*Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores de CTC observados estão relacionados aos teores de MOS, no qual pode-se observar os maiores valores para CTC na área de IPF e FS respectivamente, em comparação com a área de PC.

A MOS é de extrema importância para a sua capacidade produtiva, pois está relacionada tanto à física, como à biologia e à química do solo, sendo a principal responsável pela CTC de solos tropicais e subtropicais (TESTA, 1989; BURLE et al., 1997)

De acordo com Paul (2016), solos tropicais intensamente intemperizados apresentam, como uma das suas principais características químicas, a baixa capacidade de troca de cátions (CTC). Nesses solos, o teor de MOS possui importância preponderante na CTC efetiva.

Araújo et al. (2011) avaliaram um solo Argissolo Vermelho-Amarelo plúntico no Acre, e afirmaram que o incremento de MOS no solo favoreceu o aumento da CTC do solo, sendo que MOS e CTC estão fortemente correlacionadas e, que os cátions de caráter básicos que são liberados pela mineralização da MOS são retidos pela CTC, aumentando assim os índices de fertilidade do solo.

Quanto aos valores médios de V, com exceção da área em IPF em todas as camadas, os demais usos da terra podem ser considerados baixos. Para Sobral et al. (2015), quando o solo apresenta valores de saturação por bases menor que 50%, indica que o solo tem cargas ocupadas por componentes da acidez, destacando-se os elementos H ou Al.

O V% mais elevado foi verificado na área de IPF na camada de 0-5 cm (Tabela 2), provavelmente em função da maior quantidade de bases provenientes da calagem realizada antes da implantação do sistema, aliado a fertilização mineral realizada e o aporte de MOS que o sistema promove. Ciotta et al. (2004) afirmam que o acúmulo de bases em superfície pode estar relacionado à aplicação de fertilizantes e corretivos durante as práticas de manejo, que aliadas ao baixo revolvimento do solo permanecem no ambiente por um período de tempo maior.

Para Costa et al. (2015), as alterações dos atributos químicos nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta resultam do elevado acúmulo de resíduos vegetais sobre a sua superfície, onde o processo de decomposição vegetal residual, proporcionam aporte de nutrientes ao solo, causando estímulo à atividade biológica que resultam em alterações na sua fertilidade.

A introdução do sistema de integração promoveu acúmulo de carbono orgânico, alcançando valores de 16,1 e 13,7 Mg C ha<sup>-1</sup> para a camada de 0-5 cm de profundidade 13,7 e 11,6 Mg C ha<sup>-1</sup> para a camada de 5-10 cm, na estação seca e chuvosa, respectivamente (Tabela 3).

**Tabela 3.** Valores médios de estoque de carbono ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), em amostras de solo coletadas nas camadas entre 0-5 e 5-10 cm de profundidade, em fevereiro (período chuvoso) e agosto (período seco) de 2019.

Profundidades (cm)	Período chuvoso			Período Seco		
	EC			EC		
	Usos da terra			Usos da terra		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
0-5	9,8 bC	16,1 aA	13,7 aB	8,2 bB	13,7 aA	13,2 aA
5-10	11,5 aB	13,7 bA	10,8 bB	9,4 aB	11,6 bA	9,4 bB
Total	21,3	29,8	24,5	17,6	25,3	22,6
CV (%)	7,17			8,31		

\*Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A área de FS alcançou valores médios de  $13,7$  e  $13,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$  na camada de 0 - 5 cm e  $10,8$  e  $9,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$  na camada de 5 - 10 cm, sendo estatisticamente igual aos valores observados no sistema IPF, no período seco e chuvoso do ano.

As áreas de FS e IPF apresentam aporte contínuo de material orgânico na superfície, devido à presença do componente arbóreo que promove a formação da serapilheira e, na área de IPF, existe ainda a presença da gramínea em consórcio com as árvores de eucaliptos e os excrementos animais, que contribuem para o acúmulo de carbono orgânico no solo.

O carbono orgânico é o principal componente da matéria orgânica do solo e o seu estoque irá variar em função da sua taxa de perda, dentre elas a erosão e a oxidação, através dos microrganismos do solo, e em função da sua taxa de adição por resíduos vegetais e/ou animais. Em solos sem ação antrópica, o teor e o estoque de carbono no solo serão afetados pela temperatura, pela umidade e pelo tipo de solo, pois esses fatores influenciam nas taxas de adição e de perda desse nutriente (BAYER e MIELNICZUK, 1997).

Portanto, a MOS tem sido considerada um indicador importante de qualidade do solo, a qual reflete diretamente na produtividade vegetal (ARAÚJO et al., 2008). A MOS também desempenha papel importante na qualidade ambiental, já que participa do ciclo do carbono do planeta e por esse motivo tem atraído atenções por conta do fenômeno do aquecimento global (CERRI e CERRI, 2007).

A área PC apresentou 9,8 e 8,2 Mg C ha<sup>-1</sup> na camada de 0-5 cm e 11,5 e 9,4 Mg C ha<sup>-1</sup> na camada de 5-10 cm de profundidade. Na primeira camada, a PC apresentou os menores valores de EC comparado aos outros usos da terra e, na camada de 5 a 10 cm, o EC aumentou, sendo estatisticamente semelhante aos verificados para a área de FS, nas duas estações (Tabela 3).

Os resultados obtidos corroboram com Sales et al. (2018) e Costa et al. (2009). O primeiro autor relata que encontrou teores e estoques de carbono orgânico na pastagem semelhante à floresta secundária. Costa et al. (2009) explicam que solos sob pastagens apresentam estoque de carbono iguais ou superiores aos encontrados em ambiente de mata nativa, devido ao maior aporte de matéria orgânica proporcionado pelas raízes.

Rezende et al. (1999) verificaram que as pastagens apresentam um grande potencial para transferir o CO<sub>2</sub> da atmosfera e enriquecer o solo com MOS. Esses autores também observaram que após 10 anos da retirada da vegetação nativa e da instalação das pastagens cultivadas de braquiária, o EC foi repostado pela forrageira e apresentou tendência de aumentar, por meio da decomposição da biomassa aérea e radicular, acumulando grande quantidade de carbono.

Pesquisas recentes têm demonstrado acúmulos de C nos primeiros 40 cm no solo, na ordem de 22,86 a 94,60 Mg C ha<sup>-1</sup> em pastagens, variando conforme o tempo de formação do pasto (ROSA et al., 2014; MASCARENHAS, 2017).

Os resultados que apontam acúmulo de C em solos cultivados com pastagens ocorrem pelo elevado aporte de biomassa no solo pela decomposição do sistema radicular da gramínea e a ausência do revolvimento do solo. Em ecossistemas de vegetação rasteira, como as pastagens, a morte das raízes representa a principal fonte de C para o solo (MOREIRA, 2006).

Cerri et al. (2018) identificaram aumento do sequestro de carbono no solo após o processo de recuperação e melhoramento de pastagens na Amazônia. Apesar da conversão de floresta para pastagem bem manejada resultar em aumentos do estoque de C do solo, é importante ressaltar a importância da vegetação nativa no que se refere ao sequestro de C no sistema solo-planta-atmosfera (CARVALHO et al., 2010).

Apesar da contribuição da biomassa subterrânea da braquiária no aumento dos EC, as forças aplicadas pelo pisoteio contínuo dos animais bovinos ao longo dos anos na área com a PC parecem ter excedido a capacidade de suporte do solo avaliado, que apresentou os maiores valores de Ds e RMSD (Tabela 4 e 5).

Os valores de Ds foram maiores na área de PC (1,42 e 1,58 g cm<sup>-3</sup>) em comparação à área de FS (1,31 e 1,36 g cm<sup>-3</sup>), para ambas as estações. A conversão de PC para IPF não

promoveu efeito significativo na Ds, pois os dois sistemas apresentaram valores similares entre si, da mesma forma, a área sob IPF também não diferiu da área sob FS (1,34 e 1,50 g cm<sup>-3</sup> (Tabela 4).

**Tabela 4.** Valores médios de densidade do solo (g dm<sup>-3</sup>) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS) em diferentes camadas do solo (0-5 e 5-10 cm) no período chuvoso (fevereiro) e seco (agosto) de 2019.

		<b>Densidade do solo (g dm<sup>-3</sup>)</b>	
		Período chuvoso	Período seco
Usos da terra	PC	1,42±0,10 a	1,58±0,14 a
	IPF	1,34±0,10 ab	1,50±0,13 ab
	FS	1,31±0,09 b	1,36±0,14 b
Profundidade (cm)	0-5	1,36±0,08 a	1,46±0,18 a
	5-10	1,37±0,11 a	1,50±0,10 a
<b>CV (%)</b>		10,31	8,09

\*Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Reinerte et al. (2006), os valores críticos de densidade do solo, que são capazes de limitar o desenvolvimento radicular, situam-se em torno de 1,65 g cm<sup>-3</sup> para solos arenosos e 1,45 g cm<sup>-3</sup> para solos argilosos. Na estação seca, a Ds na área de PC atingiu 1,58 ± 0,14 g cm<sup>-3</sup>, sugerindo que a compactação do solo está próxima do limite crítico, podendo afetar o desenvolvimento radicular e o acesso à água e nutrientes. As médias de Ds para as áreas de FS e IPF estão abaixo do valor crítico para solos arenosos, indicando que não há limitações para o crescimento radicular sob esses dois usos da terra.

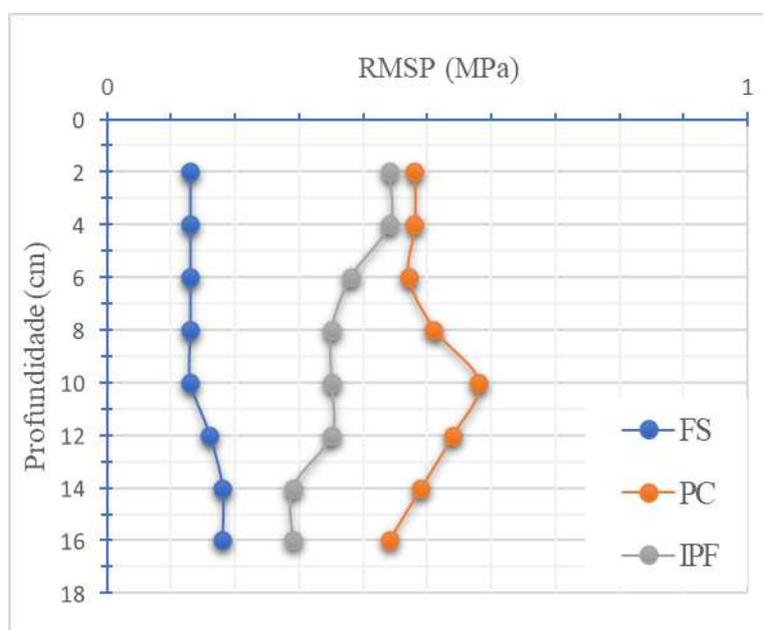
Os valores de Ds na camada superficial da PC, 0-5 cm, podem ser explicados pela formação do “pé de vaca”, que consiste na compactação do solo em razão do aumento de Ds nas camadas superficiais em áreas de pastagens, devido ao impacto negativo do pisoteio animal em condições de alta umidade e à má distribuição espacial (lotação) dos animais (UA ha<sup>-1</sup>) (LINHARES et al., 2016).

O solo da área de FS, por apresentar deposição de matéria orgânica na superfície do solo, formando a serapilheira, aliado a ausência de perturbação antrópica, como o movimento de máquinas e a ausência de animais na área, refletiram nos menores valores de DS (Tabela 4) e RMS (Tabela 5).

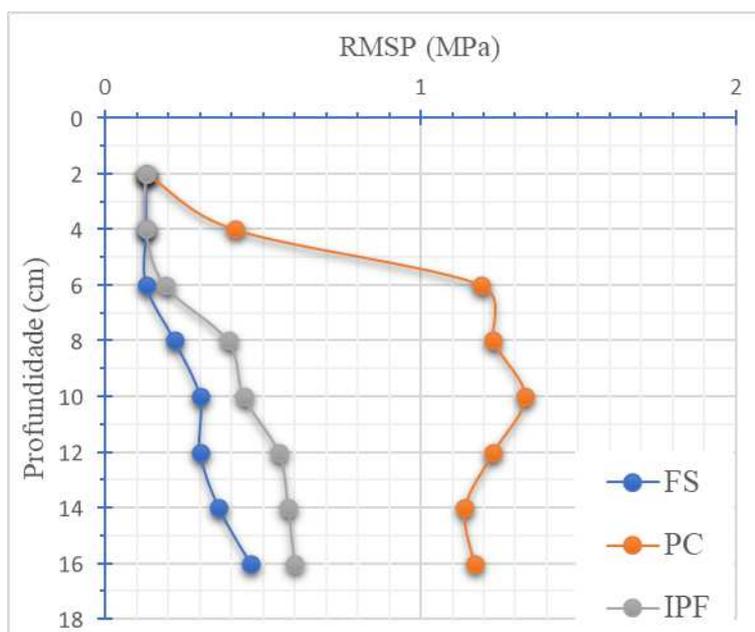
De acordo com Braida et al. (2010), a deposição de matéria orgânica no solo contribui para a redução da  $D_s$ , pois apresenta baixa densidade em relação a dos sólidos minerais do solo, e auxilia positivamente na função estrutural, como foi verificado neste estudo em que a área de FS apresentou menor valor para a DS e RMSP que aos demais usos da terra.

O efeito do pisoteio na alteração da densidade do solo parece ser importante na camada superficial do solo, ou seja, nos primeiros 5 centímetros, conforme demonstraram Salton et al. (2001). Estes autores, utilizando técnicas de geoprocessamento, avaliaram a densidade do solo antes e após o pastejo e mapearam a variabilidade espacial das alterações ocorridas. Os autores observaram que nesta camada houve aumento da densidade do solo, em cerca de 60% da área sob pastejo.

Os valores observados para a RMSP foram significativamente maiores na área de PC comparado à área de IPF e FS, para todas as profundidades avaliadas e nas duas estações. Na estação seca, as áreas de IPF e FS apresentaram valores semelhantes para este indicador em todas as profundidades avaliadas (Tabela 5 e Figura 8). Já na estação chuvosa, a área de FS apresentou valores significativamente menores comparados aos outros dois usos da terra (Tabela 5 e Figura 9).



**Figura 8.** Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS) em diferentes camadas do solo, no período chuvoso (fevereiro) de 2019.



**Figura 9.** Resistência mecânica do solo a penetração (RMSP) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS) em diferentes camadas do solo, no período seco (agosto) de 2019.

Embora a área de PC ter apresentado maiores valores para este indicador, estes não são considerando restritivos ao crescimento das plantas. Segundo Pereira e Thomaz (2015), o valor de 2,5 MPa tem sido aceito como o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração para solos de textura arenosa.

Segundo Silva et al. (2012), valores acima de 2,5 MPa em situações de baixa disponibilidade de água podem restringir, ou mesmo impedir, o crescimento e o desenvolvimento das raízes. No entanto, Tavares Filho et al. (2001) ressaltam que mesmo que sejam observados valores de resistência à penetração acima dos valores críticos, em situações que existam estruturas que permitam as trocas de difusão do oxigênio, condições químicas e umidade, o desenvolvimento das raízes poderá ser mantido através de pontos de menor resistência, todavia, podem apresentar deformações morfológicas.

Na área de PC existe um número muito pequeno de árvores, além da fonte de água estar localizada distante da fonte de alimentação, o que promovem maior movimentação dos animais durante o dia em busca de sombra e água, sendo esses fatores que contribuíram para uma maior compressão no solo pelo pisoteio animal. Moreira et al. (2005) afirmam que pastagens mal manejadas resultam em aumento na densidade do solo e na resistência à penetração, devido ao excesso de carga animal ocasionado por diferentes lotações sobre as pastagens.

**Tabela 5.** Valores médios de resistência mecânica do solo a penetração (MPa) em área de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), em amostras de solo coletadas nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade, em fevereiro (período chuvoso) e agosto (período seco) de 2019.

Profundidades (cm)	Período chuvoso			Período Seco		
	RMSP			RMSP		
	Usos da terra			Usos da terra		
	PC	IPF	FS	PC	IPF	FS
2-6	0,48 abA	0,42 aB	0,13 aC	0,46 bA	0,15 cB	0,13 bB
6-10	0,52 abA	0,36 abB	0,13 aC	1,14 aA	0,34 bcB	0,22 abB
10-14	0,53 aA	0,33 bcB	0,16 aC	1,23 aA	0,52 abB	0,32 abC
14-16	0,46 bA	0,29 cB	0,19 aC	1,16 aA	0,59 aB	0,41 aB
CV (%)	18,92			37,49		

\*Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na área com o sistema IPF, apesar do componente animal, os efeitos causados pelo pisoteio é amenizado por baixas taxas de lotação, além do maior conforto térmico aos animais causados pela sombra promovida pelas árvores e a fontes de água e sal distribuídas na área, diminuindo a locomoção animal. Esses fatores aliados ao maior EC e a deposição de serapilheira contribuem para o aumento da resiliência do solo no sistema de integração.

Os maiores valores de RMSP na área de PC podem ser atribuídos também à menor umidade do solo (Tabela 6). A área de PC diferiu estatisticamente das demais no teor de umidade do solo.

A maior umidade do solo no sistema IPF e FS indica a importância de sombrear a superfície do solo, para conservar maior umidade durante a estação seca no sudoeste do Maranhão. A constante cobertura vegetal promovida pela serapilheira no IPF e FS atua como isolante térmico para o solo, impedindo ou reduzindo a ação direta dos pingos de chuva, evitando o selamento superficial, e mantendo a umidade e a temperatura sem grandes variações ao longo do dia, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular, ajudando a criar um ambiente favorável à agregação do solo.

**Tabela 6.** Valores médios de umidade gravimétrica (%) dos primeiros 20 cm do solo em áreas de pastagem convencional (PC), integração pecuária-floresta (IPF) e floresta secundária (FS), no período chuvoso (fevereiro) e seco (agosto) de 2019.

		Umidade Gravimétrica (%)	
		Período chuvoso	Período seco
Usos da terra	PC	12,8±10 b	11,4±4 b
	IPF	14,4±8 a	13,0±3 a
	FS	15,0±7 a	13,5±8 a
CV (%)		8,36	6,19

\*Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A umidade altera a coesão entre as partículas do solo (Beltrame et al., 1981). Assim, quando o solo está seco ou apresenta baixo conteúdo de água, suas partículas apresentam-se mais próximas e difíceis de serem separadas por qualquer força externa, justificando os valores encontrados no sistema PC. No período chuvoso, verificou-se uma pequena redução dos valores de RMSP em relação ao período seco, determinada pelo aumento da umidade do solo causado pelas chuvas.

## 6. CONCLUSÕES

A introdução do sistema de integração, devido à aplicação de corretivo, fertilizantes e ao manejo adequado dos animais bovinos, promoveu melhorias nos atributos químicos em relação à área de pastagem convencional, pois para todas as profundidades avaliadas, em ambos os períodos, a ACP separou a área com o sistema IPF dos demais usos da terra, em função da maior influência do pH, teor de matéria orgânica, P, Ca, Mg e K, com reflexo na SB, CTC (T e t) e V. A área de PC apresentou maior influência dos componentes da acidez do solo.

A área de PC apresentou maior compactação do solo em relação aos outros usos da terra, refletindo nos maiores valores de densidade do solo e resistência mecânica do solo à penetração, devido aos menores teores de matéria orgânica e estoque de carbono em superfície, bem como a maior movimentação de animais dentro da área.

Foi possível compreender os impactos da adoção do sistema IPF na dinâmica dos atributos do solo após três anos da sua implantação, demonstrando que os atributos químicos e físicos do solo estão melhorando em relação à área de PC. No entanto, são necessárias mais avaliações a longo prazo, para compreender a dinâmica do solo à medida que o sistema evolua.

Com bases nos resultados obtidos é possível traçar estratégias de manejo para áreas cultivadas com pastagens. Em um planejamento para a recuperação da área de PC, a médio prazo, deve-se proceder com a correção da acidez, aplicação de fontes de P e K, além do aumento nos teores de MOS, a partir de práticas de manejo conservacionistas.

Portanto, pode-se concluir que a adoção do sistema integrado em um solo arenoso, localizado em área de transição entre o Cerrado e Floresta Amazônica, está contribuindo para inversão do atual quadro de degradação observado, permitindo uma exploração sustentável para os solos de uma região estratégica para o desenvolvimento do Estado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, A.; NEPSTAD, N.; MCGRATH, D.; MOUTINHO, P.; PACHECO, P.; DIAZ, M. D. C. V.; FILHO, B. S. **Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica**. Manaus, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Ipam), p. 89, 2004.
- ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B.; MONTEIRO, R. T. R. Responses of soil microbial biomass and activity for practices of organic and conventional farming systems in Piauí state, Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v. 44, n. 2, p. 225-230, 2008.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazônica**, v. 41, n. 1, p. 103-114, 2011.
- ARAÚJO, E.A. KER, J.C. NEVES, J.C.L. LANI, J.L. Qualidade do solo: conceitos, atributos e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Agrarian**, v. 12, n. 43, p. 57-70, 2019.
- BALBINO, L. C., PORFÍRIO-DA-SILVA, V., KICHEL, A. N., ROSINHA, R. O., & DA COSTA, J. A. A. Manual orientador para implantação de unidades de referência tecnológica em integração lavoura-pecuária-floresta-URT iLPF. Documentos, 2011.
- BALBINOT JR., A. A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: Intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1925-1933, 2009.
- BARBIER, E. B.; HOCHARD, J. P. Does land degradation increase poverty in developing countries. **Plos One**, v. 11, n. 5, 2016.
- BARTZ, M. L. C.; BROWN, G. G.; ROSA, M. G.; KLAUBERG, F. S.; JAMES, W. S.; DECAENS, T.; BARRETTA, D. Earthworm richness in land-use systems in Santa Catarina, Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 83, n. 1, p. 59-70, 2014.
- BAYAT, H., NEYSHABURI, M. R., MOHAMMADI, K., NARIMAN-ZADEH, N., & IRANNEJAD, M. Improving water content estimations using penetration resistance and principal component analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 129, p. 83–92, 2013.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 105-112, 1997.
- BELTRAME, LF de S.; LAP, GONDIM. **Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul**, 1981.

BONINI, C. S. B.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; HEINRICHS, R.; ARANHA, A. S.; SANTANA, E. A. R.; MEIRELLES, G. C. Produção de forragens e atributos químicos e físicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v. 51, n. 9, p. 1695-1698, 2016.

BRAIDA, J. A., REICHERT, J. M., REINERT, D. J., & DA VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, v.14, n.2, p.131–139, 2010.

BRASIL. **Lei 1.806, 06 de janeiro de 1953.** Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, cria a superintendência da sua execução e dá outras providências. *Lex: Coleção de Leis do Brasil, Rio de Janeiro*, v. 1, p. 1260, 1953.

BUNGENSTAB, D. J., DE ALMEIDA, R. G., LAURA, V. A., BALBINO, L. C., & FERREIRA, A. D., **Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta – A Produção Sustentável.** 2 ed. p. 623, 2012.

BURLE, M. L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant and Soil*, v.190, p.309-316, 1997

CALDEIRA, M.V.W; VITORINO, M.D.; SCHRAMM, S.; MORAES, E.; BALBINO, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. *Ciências Agrárias*, v. 29, n.1, p.53-68, 2008.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PICOLLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. *Soil Tillage Research*, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009.

CARVALHO, J.L.N.; RAUCCI, G.S.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; WRUCK, F.J.; CERRI, C.C. Impact of pasture, agriculture and croplivestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil Tillage Research*, v. 110, n. 1, p. 175-186, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZAO, L. A.; CERRI, E. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gases emissions in the Brazilian Cerrado. *Agriculture Ecosystems Environment*. v. 183, n.1, p.167–175, 2014.

CARVALHO, R. P. De; DANIEL, O.; VIDE, A. C. Da; SOUZA, F. R. De. Atributos físicos e químicos de um neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Caatinga*, v. 28, n. 1, p. 148 – 159, 2015.

CASTRO, A.C.; LOURENÇO JUNIOR, J. DE B.; SANTOS, N. DE F. A. DOS; MONTEIRO, E.M.M.; AVIZ, M.A.B.DE; GARCIA, A.R Sistema silvipastoril na Amazônia: ferramenta para elevar o desempenho de búfalos. *Ciência Rural*. v.38, n.8, p.2395-2402, 2008.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n.1, p. 40-44, 2007.

CERRI, C.C., BERNOUX, M., MAIA, S.M.F., CERRI, C.E.P., COSTA JR., C., FEIGL, B. J., FRAZÃO, L.A., MELLO, F.F.C., GALDOS, M.V., MOREIRA, C.S., CARVALHO, J.L.N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, v. 67, n.1, p. 102–116, 2010.

CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; CHERUBIN, M. R.; FEIGL, B. J.; LAL, R. Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the Cerrado for advancing food security and mitigating climate change. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 989-1007, 2018.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, 2003.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 28, n. 1, p. 317- 326, 2004.

CORDEIRO, S.A.; SILVA, M.L. da. **Análise técnica e econômica de Sistemas Agrossilvipastoris**. In: OLIVEIRA NETO, S.N. de; VALE, A.B. do; NACIF, A. de P.; VILAR, M.B.; ASSIS, J.B. de. Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), p. 167 – 189, 2010.

COSTA, O. V.; CANTARUTTI, R. B.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M.; NACIF, P. G. S.; FARIA, J. C. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.5, p.1137-1145, 2009.

COSTA, N. R., ANDREOTTI, M., LOPES, K. S. M., YOKOBATAKE, K. L., FERREIRA, J. P., PARIZ, C. M. & LONGHINI, V. Z. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.

COWIE, A. L.; ORR, B. J.; SANCHEZ, V. M. C.; CHASEK, P.; CROSSMAN, N. D.; ERLEWEIN, A. Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. **Environmental Science & Policy**. v.79, n. 79, p. 25-35. 2018.

DAVIDSON, E. A.; SA, T. D. A.; CARVALHO, C. J. R.; FIGUEIREDO, R. O.; KATO, M. S. A.; KATO, O. R.; ISHIDA, F. Y. An integrated greenhouse gas assessment of an alternative to slash-and-burn agriculture in eastern Amazônia. **Global Change Biology**, v. 14, p. 998-1007, 2008.

DIAS-FILHO, M. B. **Sistemas silvipastoris na recuperação de pastagens degradadas**. Belém, PA: Embrapa Amazônia, p. 34, 2006.

DIAS-FILHO, MOACYR BERNARDINO; FERREIRA, JOICE NUNES. Barreiras à adoção de sistemas silvipastoris no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E)**, 2008.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. Belém, PA: Embrapa Amazônia, p. 34, 2012.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia, p. 38, 2014.

DIDHAM, R. K. Altered leaf-litter decomposition rates in tropical forest fragments. **Oecologia**, v. 116, n. 3, p. 397-406, 1998.

DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A. L.; ISERNHAGEN, 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.

DLAMINI, P.; CHIVENGE, P.; CHAPLOT, V. Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH: A meta-analysis shows. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v.221, p. 258–269. 2016.

DORAN, J. W.; PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1-21, 1994.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. A. Soil health and sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 56, p. 2-54, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa/CNPSO. p. 212, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. Embrapa Solo: Embrapa Informação Tecnológica, p. 370, 1999.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. p. 353, 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **ILPF em números**. Embrapa agrossilvipastoril. Brasília, DF, 2016. 12 p.

FAO. **Sítio Agricultura de Conservação**. Disponível em: <http://www.fao.org/ag/ca/es/>. Acesso em: 20 de janeiro de 2020.

FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A.; CAO, E. G. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 9, p. 16-75-1684, 2009.

FERREIRA, A. O.; AMADO, T. J. C.; RICE, C. W.; RUIZ DIAZ, D. A.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P. **Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South**. 2018.

FREIRE, F.M.; COELHO, A.M.; BARROS, N.F.; BARROS FILHO, N.F. & NEVES, J.C.L. Manejo da fertilidade do solo no Sistema de Integração lavoura-pecuária-floresta. **Informativo Agropecuário**., v. 31. p. 25-36, 2012.

- FREIRE, A.T.G.; SILVA, C.H.L.; ANDERSON, L.O.; ARAGÃO, L.E. O e C.; SILVA, F.B.; MENDES, J.J. A zona de transição entre a Amazônia e o Cerrado no estado do Maranhão. Parte I: Caracterização preliminar dos dados focos de queimadas. INPE, 2015
- GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. **BioScience**, v. 52, p. 143-150, 2002.
- GAZZOLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, M. G. P.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.
- GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environmet** (Print), v. 199, p. 394-406, 2015.
- HAVLICEK, E. Soil biodiversity and bioindication: From complex thinking to simple acting. **EuropeanJournalofSoilBiology**, v.49, p.80-84, 2012.
- HOOSBEEK, M.R.; REMME, R.P.; RUSCH, G.M. Trees enhance soil carbon sequestration and nutrient cycling in a silvopastoral system in south-western Nicaragua. **Agroforest System**, v.92, p. 263-273, 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro, RJ. v.7, p. 1-108, 2017. Acesso em: 12 janeiro de 2020.
- INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia-2010**. Belém-PA. Embrapa-CPATU, INPE. 2013.
- INPE. PRODES. **Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2019 (Km<sup>2</sup>/ano)** Disponível em: [http://www.obt.inpe.br/prodes/taxas\\_prodes.htm](http://www.obt.inpe.br/prodes/taxas_prodes.htm) Acesso em: 08 de janeiro de 2020.
- INPE. **Projeto Terra Class**: levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia Legal brasileira – 2004-2014. São José dos Campos, 2016. Disponível em: [http://www.inpe.br/cra/projetos\\_pesquisas/terraclass2014.php](http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2014.php) Acesso em: 25 de janeiro de 2020.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. São Francisco do Brejão. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em 13 jan. 2020.
- IWATA, B. F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, A. P. L.; GEHRING, C.; KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R.; KIENZLE, J. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. **Field Actions Science Reports**, v. 8, 2012.
- KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R., & KIENZLE, J.. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. **Field Actions Science Reports**. The Journal of Field Actions, v. 8, 2015.
- KESSTRA, S. D.; QUINTON, J. N.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, v. 2, p. 111-128, 2016.

- KÖPPEN, W. Grundriss der klimakunde. Berlin: W. Guyter, p. 390, 1931.
- KUMAR, A.; DORODNIKOV, M.; SPLETTSTÖBER, T.; KUZYAKOV, Y.; PAUSCH, J. Effects of maize roots on aggregate stability and enzyme activities in soil. **Geoderma**, v. 306, p. 50–57, 2017.
- LANZANOVA, M. E., NICOLOSO, R. D. S., LOVATO, T., ELTZ, F. L. F., AMADO, T. J. C., & REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.
- LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P.C.; DEDIEU, D.F. Integrated crop– livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environmet**. v. 190, p. 4–8, 2014.
- LIMA, S. S. D., LEITE, L. F. C., OLIVEIRA, F. D. C., & COSTA, D. B. D. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em argissolo vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v. 35, n. 1, p. 51-60, 2011.
- LINHARES, J.M.S.; BASTOS, W.R.; JUNIOR, R.F.S.; OLIVEIRA, L.C.S. Variabilidade de atributos físico-químicos e dos estoques de carbono orgânico em Argissolo Vermelho sob sistemas agroflorestais no Assentamento Umari Sul do Amazonas. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.10, n.1,2016.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L.H.C. dos; SILVA, E.M.R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p.1067-1072, 2009.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; GIACOMO, S.G.; PERIN, A. Agregação, carbono e nitrogênio em agreanimais bovinoss do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1269-1276, 2011.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 1, p. 133-146, 2009.
- MACHADO, L.A.Z.; BALBINO, L.C.; CECCON, G. **Integração lavoura-pecuária-floresta**. 1. Estruturação dos sistemas de integração lavoura-pecuária. ed. 110, p.48, 2011.
- MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no Semi-Árido Cearense. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 837-848, 2006.
- MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no Semi-Árido Cearense. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 837-848, 2006.
- MARTINS, M. B.; OLIVEIRA, T. G. **Amazônia Maranhense: diversidade e conservação**. p. 328, 2011.

MARZAIOLI, R.; ASCOLI, R. D.; DE PASCALE, R. A.; RUTIGLIANO, F. A. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. **Applied Soil Ecology**, v. 44, p. 205– 212, 2010.

MENDONÇA, E.S. Oxidação da matéria orgânica e sua relação com diferentes formas de alumínio de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.25-30, 1995.

MENESES, F. M. N., PRIMO, A. A., VIEIRA, L. V., MELO, M. D., FERNANDES, J. K. S., & DE SOUZA, H. A. Avaliação dos atributos químicos do solo em função do tipo de manejo agrícola no semiárido cearense. In Embrapa Caprinos e Ovinos-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35., 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 4 f. 2015

MASCARENHAS, F. S. Dinâmica da cobertura florestal e ocorrência de incêndios florestais e suas implicações na gestão da Reserva Extrativista Chico Mendes. Dissertação (Mestrado em Gestão de Áreas Protegidas na Amazônia) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2017.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais**. p.1-8, 1999.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T. & ROBERTS, T.L. Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba, **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**. p.165-178, 2005.

MOREIRA, J. A. A.; OLIVEIRA, I. P.; GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F. Atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.35, n.3, p.155-161, 2005.

MOREIRA, F.S. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, 2006.

MOURA, E.G.; SENA, V.G.L.; CORRÊA, M.S.; AGUIAR, A.C.F. The Importance of an Alternative for Sustainability of Agriculture around the Periphery of the Amazon Rainforest. **Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture**, v.5, p. 70-78, 2013.

PEREIRA, A. A.; THOMAZ, E. L. Parâmetros físicos do solo em diferentes sistemas de manejo convencional. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 30, p. 65 – 76, 2015.

PAUL, E. A. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 98, p. 109–126, 2016.

PERES, C.A.; GARDNER, T.A.; BARLOW, J.; ZUANON, J.; MICHALSKI, F.; LEES, A.C.; VIEIRA, I.C.G.; MOREIRA, F.M.S.; FEELEY, K.J. Biodiversity conservation in human-modified Amazonian forest landscapes. **Biological Conservation**, v.143, n. 10, p.2314-2327, 2010

PIVA, J.T., DIECKOW, J., BAYER, C., ZANATTA, J.A., DE MORAES, A., TOMAZI, M., PAULETTI, V., BARTH, G., DE PICCOLO, M.C. Soil gaseous N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions and

carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical ferralsol. **Agriculture Ecosystems Environment**. v. 190, p.87–93, 2014.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico. p. 111, 2000.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. p. 27:29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. (Eds.) **Tópicos em ciência do solo**. 5. ed. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p.49-134, 2007.

REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, 2006.

REZENDE, C. D.; CANTARUTTI, R. B.; BRAGA, J. M.; GOMIDE, J. A.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; TARRE, R.; MACEDO, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K. E.; BODDEY, R. M. Litter deposition and disappearance in Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 54, n. 2, p. 99-112, 1999.

RODRIGUES, S. T.; SCHWARTZ, G; ALMEIDA, S. S. Diversidade, síndromes de dispersão e formas de vida vegetal em diferentes estágios sucessionais de florestas secundárias em Tomé-Açu, Pará, Brasil. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v.7, p.21-31, 2012.

ROMANO, P. A. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: uma estratégia para a sustentabilidade. EPAMIG. **Informe Agropecuário** 257, v. 31, p. 7 – 15, 2010.

ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J.S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. **Sociedade & Natureza**, v.26, n.2, p.333-351, 2014.

SÁ, J. C. de M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017.

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

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACHADO, I. A. Z.; OLIVEIRA, H. Pastoreio da aveia e compactação do solo. Embrapa Agropecuária Oeste, p. 5, 2001.

SALTON, J. C.; PEZARICO, C. R.; TOMAZI, M.; COMAS, C. C.; RICHETTI, A.; MERCANTE, F. M.; CONCENÇO, G. **20 anos de experimentação em Integração** Integrated crop–livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture Ecosystems Environment**. v.190, p. 70–79, 2014.

SALTON, J. C.; OLIVEIRA, P.; TOMAZI, M.; RICHETTI, A.; BALBINO, L. C.; FLUMIGNAM, D.; MERCANTE, F.M.; MARCHÃO, R. L.; CONCENÇO, G.; SCORZA JUNIOR, R. P.; ASMUS, G. L. Benefícios da adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. p. 35-51, 2015.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; DREON, G. Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 3, p.474-482, 2011.

SANTOS, J. D. L.; ALMEIDA, J. N.; SANTOS, A. C. Caracterização física e química de um Planossolo localizado no semiárido baiano. **Agropecuária Científica no semiárido**, Patos, v. 9, n. 3, p. 13-17, 2013.

SANTOS, H. G. DOS JACOMINE, P. K. T. ANJOS, L. H. C. DOS OLIVEIRA, V. A. DE LUMBRERAS, J. F. COELHO, M. R. ALMEIDA, J. A. DE ARAUJO FILHO, J. C. DE OLIVEIRA, J. B. DE CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, 2018. 355 p.

SECCO, D., DA ROS, C. O., SECCO, J. K., & FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.541-547, 1994.

SILVA, E. F.; LOURENTI, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011.

SILVA, A. R.; SILVA, L. L.; FRAZÃO, J. J.; SALANIMAI BOVINOS, F. H. M.; SILVA, M. C.; CORRECHER, V. Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 22, n. 2, 2012.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; TAVARES, D. D.; NÓBREGA, C. C.; AMARAL, A. J. Water availability under integrated crop-livestock-forestry systems in Agreste region of Paraíba, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 2, p. 449-457, 2019.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análise de solos**. Embrapa Tabuleiros Costeiros. p. 15, 2015.

SOUZA, E.D. de; COSTA, S.E.V.G. de A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C. de F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em

sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n. 6 p.1829- 1836, 2009

SOUZA, H.N.; CARDOSO, I.M.; MENDONÇA, E.S.; CARVALHO, F.A.; GJORUP, D.F.; OLIVEIRA, G.B.; BONFIN, V.R. Learning by doing: a participatory methodology for systematization of experiments with agroforestry systems, with an example of its application. **Agroforestry systems**, v. 85, n. 2, p. 247-262, 2012.

SOUZA, E.D. de; SILVA, C.R.M. da; PINTO, F.A.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SOUZA, H. S.; TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SOUZA, E. C. ARRIEL, D. A. A.; MEDEIROS, R. A. Análise multivariada de atributos químicos e físicos do solo em sistema groflorestal com teca. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 87-93, 2018.

STAVI, I.; LAL, R. Achieving zero net land degradation: challenges and opportunities. **Journal Arid Environment**, v.112, p. 44-51. 2015.

STEINER, F.; LOZ, T.; PINTO JÚNIOR, A. S.; COSTAGNARA, D. D.; DRANSKI, J. A. L. Effects of aluminium on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1779-1788, 2012.

SUZUKI, R.; TAKEDA, S.; THEIN, H. M. Chrono sequence changes in soil properties of teak (*Tectona grandis*) plantations in the Bago Mountains, Myanmar. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 19, n. 4, p. 207-217, 2007.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular de milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 725-730, 2001.

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, 573 p. 2018.

TESTA, W. M. **Características químicas de um Podzólico Vermelho-escuro, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas**. 1989. f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

TORNQUIST, C. G.; HONS, F. M.; FEAGLEY, S. E.; HAGGAR, J. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 73, n. 1, p. 19-28, 1999.

TÓTH, E.; DEÁK, B.; VALKÓ, O.; KELEMEN, A.; MIGLÉCZ, T.; TÓTHMÉRÉSZ, B.; & TÖRÖK, P. Livestock type is more crucial than grazing intensity: Traditional cattle and sheep grazing in short-grass steppes. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 2, p. 231-239, 2018.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Land degradation in drylands (LADA)**: GEF grant request. Nairobi, Kenya, 2004.

ZAMBONI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. C. Teores de Al trocável após calagem e gessagem em Latossolo sob plantio direto. **Bragantia**, v. 66, n. 3, p. 487-495, 2007.

WILKINSON, S.R. & LOWERY, R.W. Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystems. In: BUTTLER, G.W. & BALLEY, R.W., eds. **Chemistry and biochemistry of herbage**, Academic Press, n. 2, p.247-315, 1973.

WITTWER, R.A.; DORN, B.; JOSSI, W.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.. Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.