

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ENG.º AGRÔNOMO LUCAS MENEZES FELIZARDO

**ESTOQUE DE CARBONO NOS BIOMAS BRASILEIROS COM
ENFOQUE NO CERRADO E NO CULTIVO DE EUCALIPTO NO
MATO GROSSO DO SUL**

Ilha Solteira

2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

ENG.º AGRÔNOMO LUCAS MENEZES FELIZARDO

**ESTOQUE DE CARBONO NOS BIOMAS BRASILEIROS COM
ENFOQUE NO CERRADO E NO CULTIVO DE EUCALIPTO NO
MATO GROSSO DO SUL**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia -
UNESP - Campus de Ilha Solteira, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia – Área de
Conhecimento: Sistemas de produção

Orientadora: **Prof^a. Dr^a. Kátia Luciene Maltoni**

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F316e Felizardo, Lucas Menezes.
 Estoque de carbono nos biomas brasileiros com enfoque no cerrado e no cultivo de eucalipto no Mato Grosso do Sul / Lucas Menezes Felizardo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
 93 f. : il.

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2022

 Orientador: Kátia Luciene Maltoni
 Inclui bibliografia

 1. Uso do solo. 2. Resistência do solo a penetração. 3. Carbono orgânico.

Folha de Julgamento



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Estoque de carbono nos biomas brasileiros com enfoque no Cerrado e no cultivo de Eucalipto no Mato Grosso do Sul

AUTOR: LUCAS MENEZES FELIZARDO

ORIENTADORA: KÁTIA LUCIENE MALTONI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente
KÁTIA LUCIENE MALTONI
Data: 25/08/2022 23:53:34-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof.^a Dr.^a KÁTIA LUCIENE MALTONI (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual)

Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RICARDO ANTONIO FERREIRA RODRIGUES (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof.^a Dr.^a ELISANGELA DUPAS

(Participação Virtual)

Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade Federal da Grande Dourados

Prof. Dr. EPITÁCIO JOSÉ DE SOUZA (Participação Virtual)

Departamento de Agronomia / UNIFEV

Assinado de forma digital por Epitácio José de Souza
DN: cn=Epitácio José de Souza, email=epitacio.agro@gmail.com, c=BR
Dados: 2022.08.26 16:42:35 -03'00'

Ilha Solteira, 19 de agosto de 2022

Dedicatória

Dedico esta tese à minha esposa e à
minha família pelo apoio de todas as horas.

“Árvore do cerrado

Que sejamos como árvore do cerrado, podendo até ter o porte pequeno, porém tendo grande capacidade de amar. Apesar de sua casca ser rugosa, não torna a madeira sem valor e ainda a protege contra o fogo. Não esqueçamos o nosso valor! Suas características não surgiram por caso. Que tenhamos a capacidade de nos adaptar às intempéries da vida, como as árvores do cerrado têm quanto as intempéries climáticas. Assim como as árvores do cerrado buscam água nos lençóis mais profundos para saciar sua necessidade, que tenhamos raízes profundas, dando-nos suporte para buscar a esperança quando não houver mais água na superfície. Não deixemos de mostrar nossa beleza. Façamos como as árvores do cerrado fazem com suas flores em período seca. Que sejamos destaque em meio a paisagem, por pior que seja. Que possamos produzir frutos mesmo em terra de baixa fertilidade, como as árvores do cerrado. E como o cerrado tem uma importância fundamental para a vida de vários seres, você também tem um valor inestimável.”

Ezequias Reis

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o amparo, sem o qual não teria sido possível passar por alguns dos empecilhos da vida.

À minha companheira Gláucia, pelo apoio em todos os momentos, sendo sempre meu escudo, minha espada e minha fortaleza.

À minha orientadora, a Prof^ª. Dr^ª. Kátia Luciene Maltoni, pela orientação e contribuição ao estudo realizado. Por sempre acreditar e confiar no meu trabalho.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, que sempre que solicitados me deram o suporte necessário para a elaboração desse trabalho.

À grandiosa instituição Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia e ao programa de Pós-Graduação em Agronomia, que vem fazendo parte de minha vida nos últimos 5 anos.

Agradeço o apoio da empresa Eldorado por ter disponibilizado o acesso as áreas de coleta e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 por apoiar os programas de Pós-graduação da UNESP.

RESUMO

A presença de carbono orgânico no solo e na biomassa vegetal é benéfica para as funções dos ecossistemas e está intimamente associada à redução dos efeitos negativos das mudanças climáticas. Os estoques de carbono do solo são controlados por uma variedade de fatores climáticos e biogeoquímicos, sendo diretamente influenciados por mudanças no uso e ocupação do solo, em particular pela conversão de ecossistemas naturais em áreas cultivadas para agricultura e pecuária. Deste modo, objetivou-se com este trabalho estudar a presença de carbono orgânico no solo e os fatores que podem promover alteração no seu estoque (EstC). Para avaliar tais fatores, este trabalho foi dividido em três capítulos: No capítulo 1, foi realizado um estudo a partir de dados amostrais e resultados de simulações de estoque de carbono no solo, em seis biomas brasileiros (Cerrado, Amazônia, Pantanal, Caatinga, Mata-atlântica e Pampas), bem como verificar a contribuição dos fatores Bioma, Sistemas de uso do solo, Profundidade amostrada e o Tipo de dado (amostrado ou simulado) sobre o estoque de carbono dos solos. Apenas 42 trabalhos em mais de 200 artigos científicos foram qualificados para este estudo. Para analisar os dados, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) seguindo o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, cujos fatores analisados foram o uso da terra, a camada do solo (0,0 – 0,10 e 0,0 – 0,20 m), o bioma e a interação entre eles, aplicando-se o teste F a 5% de probabilidade para detectar as diferenças dos fatores e a interação entre eles, e o teste de Scott-Knott a 5% foi utilizado para detectar diferenças entre as médias. Complementar à ANOVA, foi aplicada uma técnica com base na análise de componentes principais (CP), com o intuito de verificar a contribuição dos fatores de estudo analisados no EstC. Nos estoques de carbono amostrados de 0,0 – 0,20 m, houve diferença significativa no Bioma Pantanal, com estoques inferiores aos demais biomas na vegetação nativa bem como na pastagem, na interação uso da terra x Bioma Pampas. Nos dados simulados de 0,0 – 0,20 m foram observadas diferenças significativas para Mata Atlântica e Pantanal, com valores acima de 43 Mg ha⁻¹, e para uso da terra na pastagem o estoque de pastagens do Pantanal foram obtidos os menores valores. Por meio da técnica CP, foi possível observar que o EstC se correlaciona com as práticas de conservação, permitindo inferir que as práticas agrícolas influenciam o estoque de carbono. No Capítulo 2, foi verificado o EstC em diferentes áreas de cultivo localizadas no Sudeste do Mato Grosso do Sul: pastagem degradada, cerrado natural e áreas de plantio de eucalipto em diferentes estádios de desenvolvimento (3, 5, 7, 10 e 14 anos) com coletas de solo realizadas nas linhas e

entrelinhas de plantio. Os dados obtidos foram analisados quanto a estatística descritiva e análise de variância (ANOVA), que seguiu o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial ($5 \times 2 + 2$) com 4 repetições, sendo cinco anos de plantio de eucalipto (3, 5, 7, 10 e 14 anos), duas posições (linha e entrelinha) e dois tratamentos adicionais (cerrado e pastagem) em quatro profundidades (0,0 – 0,10, 0,10 – 0,30, 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m). O teste F foi utilizado para detectar as diferenças dos fatores e das interações, o teste de Tukey para detectar as diferenças entre as médias dos anos de cultivo e o teste de Dunnett para comparações entre essas médias com as médias das testemunhas e entre testemunhas. Na análise do EstC as diferenças significativas de destaque foram encontradas na profundidade 0,30 – 0,60 m no ano 14, na entrelinha, para eucalipto ($9,99 \pm 0,89 \text{ Mg ha}^{-1}$), Cerrado ($9,88 \pm 0,62 \text{ Mg ha}^{-1}$) e pastagem ($10,96 \pm 0,87 \text{ Mg ha}^{-1}$) e na profundidade 0,60 – 1,00 m no ano 14, na linha, para eucalipto ($11,04 \pm 0,96 \text{ Mg ha}^{-1}$), Cerrado ($14,47 \pm 0,60 \text{ Mg ha}^{-1}$) e pastagem ($15,19 \pm 1,37 \text{ Mg ha}^{-1}$). Com base na análise dos dados ficou evidenciado que a preservação do Cerrado mantém o Carbono no solo e que no final dos ciclos do Eucalipto (7 e 14 anos) os valores estão próximos ao encontrado no Cerrado. Por fim, no Capítulo 3 foi avaliada a medição da resistência do solo à penetração (RP) por três metodologias a partir do penetrógrafo manual de molas (SC60), penetrômetro estático de bancada com 60 cm.c.a-coluna d'água (PEB60) e penetrômetro estático de bancada com 100 cm.c.a (PEB100), em 3 áreas de cultivo (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e cerrado conservado – CERC), em 3 profundidades (0 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m). Os dados obtidos foram convertidos para MPa (para resistência do solo à penetração), analisados quanto a estatística descritiva e análise de variância, sendo o teste F utilizado para detectar as diferenças dos fatores e as interações, e o teste Tukey para comparar as médias quando encontradas diferenças significativas. Foram verificados valores de RP acima de 1,9 MPa com o uso do SC-60 no eucalipto e na pastagem. Foram constatados valores de RP superiores, para pastagem nas profundidades de 0,10 – 0,30 m (1,50 Mpa), no SC60 em cultivo de eucalipto e pastagem (1,90 Mpa) e SC60 a partir da profundidade de 0,10 – 0,30 m (1,75 a 2,07 Mpa), valores considerados moderados e não impeditivos ao desenvolvimento radicular do eucalipto. O SC60 apresentou os maiores valores de RP (1,16 a 2,07 Mpa) independente do cultivo e da profundidade. Não houve variações significativas na RP em relação às colunas d'água utilizadas (60 e 100 cm.c.a.).

Palavras-chave: uso do solo; resistência do solo a penetração; carbono orgânico.

ABSTRACT

The presence of organic carbon in soil and plant biomass is beneficial for ecosystem functions and is closely associated with reducing the negative effects of climate change. Soil carbon stocks are controlled by a variety of climatic and biogeochemical factors, being directly influenced by changes in land use and occupation, in particular by the conversion of natural ecosystems into cultivated areas for agriculture and livestock. Thus, this work aimed to study the presence of organic carbon in the soil and the factors that can promote changes in its stock (EstC). To evaluate these factors, this work was divided into three chapters: In chapter 1, a study was carried out based on sample data and results of simulations of carbon stock in the soil, in six different Brazilian biomes (Cerrado, Amazônia, Pantanal, Caatinga, Atlantic Forest and Pampas), as well as verifying the contribution of the factors Biome, Land use systems, Sampled depth and the type of data (sampled or simulated) on the carbon stock of soils. Only 42 papers in more than 200 scientific articles were qualified for this study. To analyze the data, analysis of variance (ANOVA) was carried out following a completely randomized design, in a factorial scheme, whose factors analyzed were land use, soil layer (0.0 - 0.10 and 0.0 – 0.20 m), the biome and the interaction between them, applying the F test at 5% of probability to detect the differences of the factors and the interaction between them, and the Scott-Knott test at 5% was used to detect differences between the means. Complementary to ANOVA, a technique based on principal component analysis (CP) was applied, in order to verify the contribution of the study factors analyzed in the EstC. In the carbon stocks sampled from 0.0 – 0.20 m, there was a significant difference in the Pantanal Biome, with stocks lower than the other biomes in native vegetation as well as in pasture, in the interaction of land use x Pampas Biome. In the simulated data of 0.0 – 0.20 m, significant differences were observed for Atlantic Forest and Pantanal, with values above 43 Mg ha⁻¹, and for land use in pasture and pasture stock in the Pantanal, the lowest values were obtained. Through the CP technique, it was possible to observe that the EstC is correlated with conservation practices, allowing us to infer that agricultural practices influence carbon stock. In Chapter 2, the EstC was verified in different cultivation areas located in the Southeast of Mato Grosso do Sul: degraded pasture, natural cerrado and eucalyptus plantation areas at different stages of development (3, 5, 7, 10 and 14 years) with soil collections carried out in the rows and between the planting rows. The data obtained were analyzed in terms of

descriptive statistics and analysis of variance (ANOVA), which followed a randomized block design, in a factorial scheme ($5 \times 2 + 2$) with 4 replications, with five years of eucalyptus plantation (3, 5, 7, 10 and 14 years), two positions (row and between rows) and two additional treatments (Cerrado and pasture) at four depths (0.0 – 0.10, 0.10 – 0.30, 0.30 – 0.60 and 0.60 – 1.00 m). The F test was used to detect differences in factors and interactions, Tukey's test to detect differences between the averages of the years of cultivation and Dunnett's test for comparisons between these averages with the averages of the controls and between controls. In the analysis of the EstC, significant differences were found at depth 0.30 – 0.60 m in year 14, between the rows, for eucalyptus ($9.99 \pm 0.89 \text{ Mg ha}^{-1}$), Cerrado ($9.88 \pm 0.62 \text{ Mg ha}^{-1}$) and pasture ($10.96 \pm 0.87 \text{ Mg ha}^{-1}$) and at depth 0.60 – 1.00 m in year 14, in the line, for eucalyptus ($11.04 \pm 0.96 \text{ Mg ha}^{-1}$), Cerrado ($14.47 \pm 0.60 \text{ Mg ha}^{-1}$) and pasture ($15.19 \pm 1.37 \text{ Mg ha}^{-1}$). Based on the data analysis, it became evident that the preservation of the Cerrado maintains the carbon in the soil and that at the end of the Eucalyptus cycles (7 and 14 years) the values are close to those found in the Cerrado. Finally, in Chapter 3, the measurement of soil penetration resistance (RP) was evaluated by three methodologies using manual spring penetrometer (SC60), benchtop static penetrometer with 60 cm.w.c-water column (PEB60) and benchtop static penetrometer with 100 cm.w.c (PEB100), in 3 cultivation areas (eucalyptus - EUCP, pasture - PAST and conserved cerrado - CERC), in 3 depths (0 – 0.10; 0.10 – 0.30 and 0.30 – 0.60 m). The data obtained were converted to MPa (for soil penetration resistance), analyzed for descriptive statistics and analysis of variance, and the F test was used to detect differences in factors and interactions, and the Tukey test to compare the means when significant differences were found. PR values above 1.9 MPa were verified with the use of SC-60 in eucalyptus and pasture. Higher RP values were found for pasture at depths of 0.10 – 0.30 m (1.50 MPa), in SC60 in eucalyptus cultivation and pasture (1.90 MPa) and SC60 from a depth of 0.10 – 0.30 m (1.75 to 2.07 MPa), values considered moderate and not impeding the root development of eucalyptus. SC60 showed the highest RP values (1.16 to 2.07 MPa) regardless of cultivation and depth. There were no significant variations in the RP in relation to the water columns used (60 and 100 cm.w.c.).

Keywords: soil depth; land use; C determination methods.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Amostragem à campo (CMP)
Análise de componentes principais (ACP)
Análise de variância (ANOVA)
Anos de cultivo (Acult)
Carbono (C)
Carbono Orgânico (CO)
Cerrado conservado (CERC)
Coeficiente de variação (CV)
Coluna d'água (c.a.)
Derivada do modelo RP (Θ_m) ($dC/d\Theta$)
Densidade do solo (Ds)
Espessura da camada considerada (e)
Estoques de carbono orgânico do solo (EstC)
Eucalipto (EUCP)
Matéria orgânica do solo (MO)
Megapascal (MPa)
Pastagem (PAST)
Penetrógrafo manual de molas (SC-60)
Penetrômetro estático de bancada (PEB)
Perda de massa por ignição (PMI)
Plantio convencional (PC)
Porosidade total (Pt)
Posição (Pos)
Práticas conservacionistas (PCS)
Processos de retirada de umidade a 100 cm.c.a (B100)
Processos de retirada de umidade a 60 cm.c.a (B60)
Profundidade (Prof)
Quadrado médio (QM)
Quilograma-força (Kgf)
Resistência do solo à penetração (RP)
Resistência à penetração corrigida (RP_c)
Resistência à penetração medida (RP_m)

Sociedade Americana de Engenharia Agrícola (ASAE)

Teor de Umidade (TU)

Testemunhas (T)

Umidade medida (Θ_m)

Umidade a base de massa de referência (Θ_{ref})

Vegetação nativa (VN)

Vegetação plantada (VP)

Vegetações (VEGT)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	CAPÍTULO 1: ESTOQUE DE CARBONO AMOSTRADO E SIMULADO EM BIOMAS BRASILEIROS	17
		17
2.1	Introdução.....	18
2.2	Material e Métodos	20
2.3	Resultados e Discussão.....	24
2.4	Conclusões.....	29
	REFERÊNCIAS	30
3	CAPÍTULO 2: ESTOQUE DE CARBONO NO CULTIVO DE EUCALIPTO EM COMPARAÇÃO COM PASTAGEM E CERRADO NATURAL, NO SUDESTE DO MATO GROSSO DO SUL.....	33
		33
3.1	Introdução.....	35
3.2	Material e Métodos	37
3.3	Resultados e Discussão.....	40
3.4	Conclusões.....	49
	REFERÊNCIAS	50
4	CAPÍTULO 3: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM SOLOS DO CERRADO	55
		55
4.1	Introdução.....	57
4.2	Material e Métodos	58
4.3	Resultados e Discussão.....	61
4.4	Conclusões.....	71
	REFERÊNCIAS	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	APÊNDICES.....	76
	ANEXO	85

1 INTRODUÇÃO

Devido às características climáticas e edafológicas do extenso território brasileiro, seis biomas principais podem ser descritos: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. Com biomas tão distintos, os eventos de mudanças climáticas podem se tornar um imenso desafio ambiental, e impedir que grandes quantidades de carbono sejam adicionadas à atmosfera pode ser solução para esse problema. O solo é um enorme reservatório de carbono, capaz de armazenar cerca de 3 vezes mais C que a atmosfera. Para quantificar esse elemento modelos matemáticos foram desenvolvidos, os quais monitoram as mudanças nos estoques de carbono em diferentes compartimentos do solo, podendo então prever o impacto das práticas de manejo sobre o comportamento do estoque de carbono e assim quantificar o CO₂ que se perde para a atmosfera ou se ganha incorporando ao solo.

O carbono do solo é considerado um dos importantes indicadores gerais de segurança do solo, pois pode sinalizar se determinado solo está suscetível ou caminhando em direção à degradação, relacionada à mitigação das mudanças climáticas, ou à capacidade do solo em suprir as necessidades básicas de instalação ou manutenção de um cultivo. A presença de C no solo e na biomassa vegetal é benéfica para as funções dos ecossistemas e está intimamente associada à redução dos efeitos negativos sobre as mudanças climáticas. Os estoques de carbono do solo são controlados por uma variedade de fatores climáticos e biogeoquímicos, sendo diretamente influenciados por mudanças no uso e ocupação do solo, em particular pela conversão de ecossistemas nativos em áreas cultivadas para agricultura e pecuária.

Nos últimos anos, no Cerrado houve a intensificação do processo de substituição de suas áreas nativas por áreas com diferentes usos, o que tem acelerado processos de degradação ambiental. Dependendo de como é a transição do Cerrado para outros sistemas de uso do solo pode aumentar o carbono do solo, uma vez que, em geral os solos sob Cerrado são pobres em carbono e nutrientes. No entanto, a perda do carbono armazenado sob Cerrado nativo não pode ser ignorada e chama a atenção para a importância de se analisar as mudanças no uso da terra, pois podem colocar mais carbono na atmosfera. Com a intensificação da ocupação do Cerrado para dar lugar a diferentes usos do solo, surgem relevantes sinais de degradação, sendo a compactação um dos mais importantes problemas, e os solos de textura moderada a moderadamente grosseiras (francos, franco arenosos e franco siltosos) tem se

mostrado muito suscetíveis a estes processos, pois suas partículas se reorganizam mais facilmente.

A avaliação da resistência do solo a penetração (RP) é um parâmetro muito utilizado para avaliar a compactação e está relacionada às propriedades físicas do solo, sendo considerada um indicador de compactação, como também a textura e umidade que afetam diretamente a compactação do solo. Os dados de RP, associados a outras ferramentas tecnológicas e observações de campo, podem contribuir para formação de um cenário realista das condições em que ele se encontra, onde se pretende implementar planos de produção agropecuária, outras mobilizações do solo, implantação de culturas, e/ou operações com vistas à sua recuperação física e de fertilidade.

O eucalipto, nativo da Austrália, adaptou-se muito bem às condições de clima e solo no Brasil, o que favoreceu seu estabelecimento. Este tem sido plantado em extensas áreas, para produção de celulose e, mais recentemente, a cultura tem se expandido na região sudeste do Mato Grosso do Sul, em áreas de pastagens bastante degradadas, ou mesmo em áreas de Cerrado.

Para esse estudo foram levantadas algumas hipóteses acerca dos fatores que podem promover alteração no estoque de carbono do solo, são elas: Existem diferenças entre o estoque de carbono entre Biomas brasileiros? O uso e ocupação influenciam no estoque de carbono? O estoque de carbono é maior em região preservada de Cerrado, pastagem ou cultivo de eucalipto? Os anos de cultivo de eucalipto interferem no estoque de carbono? Será que o cultivo de eucalipto em substituição à pastagem degradada no Cerrado do Mato Grosso do Sul pode ampliar o estoque de carbono no solo desse bioma? Se ocorrer aumento do estoque de carbono no solo no cultivo de eucalipto, ele ocorre com maior intensidade na linha ou na entrelinha do plantio? Há diferença nos resultados, para os equipamentos e os métodos utilizados na obtenção da resistência do solo a penetração?

Assim, como objetivo geral do trabalho buscou-se quantificar o estoque de carbono para múltiplos usos do solo, determinando a dinâmica do estoque de carbono no solo do Cerrado no sudeste do estado do Mato Grosso do Sul

Os objetivos específicos foram: 1) avaliar o estoque de carbono no solo dos biomas brasileiros; 2) identificar diferenciações nos valores de estoque de carbono obtidos a partir de dados amostrados ou simulados, nos biomas estudados; 3) entender como o sistema de uso do solo pode reduzir ou aumentar os estoques de carbono nos biomas; 4) no bioma Cerrado, avaliar como o efeito da mudança da vegetação nativa para pastagem, bem como posteriormente para cultivo de eucalipto, interfere no estoque de carbono no solo; 5) avaliar o

comportamento do estoque de carbono ao longo do perfil do solo em múltiplos usos; e, 6) verificar se as médias nos parâmetros para determinação do estoque de carbono no solo do cerrado apresentam diferenças à medida que se utilizam diferentes equipamentos e, ou, metodologias distintas.

Para alcançar os objetivos e testar as hipóteses formuladas, dividiu-se este trabalho em três capítulos: No capítulo 1 foi realizado um estudo a partir de dados amostrais e resultados de simulações de estoque de carbono no solo, em seis biomas brasileiros (Cerrado, Amazônia, Pantanal, Caatinga, Mata-atlântica e Pampas), bem como verificar a contribuição dos fatores Bioma, Sistemas de uso do solo, Profundidade amostrada e o Tipo de dado (amostrado ou simulado) sobre o estoque de carbono dos solos. Neste capítulo foram avaliados os resultados das estimativas de modelos relacionados às observações de campo em estudos realizados no Brasil, na tentativa de demonstrar a importância da compreensão do comportamento do carbono em seis biomas e em diferentes cenários de uso da terra agrícola.

No Capítulo 2 foi avaliado o estoque de carbono no solo (EstC) em áreas de cultivo localizadas no Sudeste do Mato Grosso do Sul: pastagem degradada, cerrado natural e áreas de plantio de eucalipto em diferentes estádios de desenvolvimento (3, 5, 7, 10 e 14 anos), com coletas realizadas nas linhas e entrelinhas de plantio.

No Capítulo 3 foi avaliada a medição da resistência do solo à penetração (RP) por três metodologias: a partir do penetrógrafo manual de molas (SC60), do penetrômetro estático de bancada com 60 cm.c.a (PEB60) e do penetrômetro estático de bancada com 100 cm.c.a (PEB100), em 3 áreas de cultivo (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e cerrado natural – CERC), em 3 profundidades do solo (0 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m).

2 CAPÍTULO 1: ESTOQUE DE CARBONO AMOSTRADO E SIMULADO EM BIOMAS BRASILEIROS

Resumo – Com a compilação e avaliação de informações de dados amostrais e resultados de simulações de estoque de carbono do solo (EstC), em seis biomas brasileiros, Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampas e Pantanal. Encontrou-se 42 artigos científicos com as características necessárias para realizar esta análise, que visa entender entre os fatores avaliados quais têm maior efeito sobre o estoque de carbono. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, onde os fatores analisados foram: uso da terra, camada do solo (0,0 – 0,10 e 0,0 – 0,20 m), bioma e a interação entre eles. Nos estoques amostrados de 0,0 – 0,20 m, houve diferença significativa no Pantanal e na interação entre uso da terra, com média e erro médio padrão de $14,75 \pm 1,67 \text{ Mg ha}^{-1}$, inferior à pastagem do bioma Pampas que obteve valores de $20,28 \pm 1,86 \text{ Mg ha}^{-1}$. Nos dados simulados de 0 – 0,20 m para as diferenças significativas foram observadas para Mata Atlântica e Pantanal, no uso da terra das práticas convencionais, $25,66 \pm 3,09 \text{ Mg ha}^{-1}$ e na pastagem $37,67 \pm 13,39 \text{ Mg ha}^{-1}$, no estoque médio de pastagens da Mata Atlântica e Pantanal de $12,67 \pm 1,89 \text{ Mg ha}^{-1}$. No uso convencional da terra, o estoque médio de C foi de $22,63 \pm 3,73 \text{ Mg ha}^{-1}$ e na interação entre os biomas Caatinga e Amazônia houve diferença para pastagem na Caatinga, apresentando média de $18,33 \pm 6,14 \text{ Mg ha}^{-1}$, para valores simulados na interação entre os biomas, enquanto que na pastagem na caatinga o EstC foi de $41,23 \pm 2,34 \text{ Mg ha}^{-1}$. Na análise dos componentes principais, o estoque de C está mais correlacionado com as práticas de conservação que nesse estudo foram plantio direto e cultivo mínimo, permitindo inferir que as práticas agrícolas conservacionistas podem influenciar para o aumento do estoque de carbono.

Palavras-chave: modelos computacionais; CENTURY; CQESTR; dinâmica do C.

Sampled and simulated carbon stock in Brazilian biomes

Abstract – With the compilation and evaluation of information from sample data and results of soil carbon stock (EstC) simulations, in six Brazilian biomes, Amazon, Caatinga, Cerrado, Atlantic Forest, Pampas and Pantanal, 42 scientific articles were found with the characteristics necessary to carry out this analysis, which aims to understand among the factors evaluated which have the greatest effect on carbon stock. A completely randomized design was used, in a factorial scheme, where the factors analyzed were: land use, soil layer (0.0 - 0.10 and 0.0 -

0.20 m), biome and the interaction between them. In the stocks sampled from 0.0 – 0.20 m, there was a significant difference in the Pantanal and in the interaction between land use, with a mean and mean standard error of $14.75 \pm 1.67 \text{ Mg ha}^{-1}$, lower than the pasture of the biome Pampas that obtained values of $20.28 \pm 1.86 \text{ Mg ha}^{-1}$. In the simulated data of 0 – 0.20 m for the significant differences were observed for Atlantic Forest and Pantanal, in the land use of the conventional practices, $25.66 \pm 3.09 \text{ Mg ha}^{-1}$ and in the pasture $37.67 \pm 13, 39 \text{ Mg ha}^{-1}$, in the average stock of pastures in the Atlantic Forest and Pantanal of $12.67 \pm 1.89 \text{ Mg ha}^{-1}$. In conventional land use, the average stock of C was $22.63 \pm 3.73 \text{ Mg ha}^{-1}$ and in the interaction between the Caatinga and Amazon biomes there was a difference for pasture in the Caatinga, with an average of $18.33 \pm 6.14 \text{ Mg ha}^{-1}$, for simulated values in the interaction between the biomes, while in the pasture in the caatinga, the EstC was $41.23 \pm 2.34 \text{ Mg ha}^{-1}$. In the analysis of the principal components, the stock of C is more correlated with the conservation practices that in this study were no-tillage and minimum tillage, allowing to infer that the conservationist agricultural practices can influence for the increase of the carbon stock.

Keywords: CENTURY; CQESTR; dynamics C; computational models.

2.1 Introdução

Devido à ampla gama de características climáticas e de solos ao longo do território brasileiro, seis grandes biomas podem ser descritos: Amazônico, Caatinga, Cerrado, Mata-atlântica, Pampa e Pantanal. Nesses cenários encontra-se o domínio morfoclimático e fitogeográfico Amazônico, a Mata Atlântica, também conhecida como "mata de encosta" que é um bioma de florestas tropicais úmidas, o Cerrado, que não tem uma fisionomia única e uniforme, mas sim três: a campestre (campo limpo de Cerrado), a savânica (campo sujo de Cerrado, campo cerrado e cerrado sensu stricto) e a florestal (cerradão), a Caatinga nordestina bioma de savana semiárida, os Pampas que é um bioma campestre e o Pantanal constituído por um complexo mosaico de diferentes biomas florestais de hidrobiomas e helobiomas (COUTINHO, 2016; BATALHA, 2011).

Devido as dimensões continentais, com tantas diferenças entre os biomas, os eventos de mudanças climáticas podem se tornar um desafio ambiental ainda maior no Brasil, e evitar que grandes quantidades de carbono cheguem à atmosfera pode ser uma alternativa para combater esse problema (CERRI *et al.*, 2018; SILVA; FRANÇA, 2018). O solo é um grande reservatório de carbono, pois armazena cerca de 3 vezes mais carbono que a atmosfera

(OELKERS; COLE, 2008). Para quantificar esse carbono alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos, com a perspectiva de monitorar as mudanças no seu estoque nos diversos compartimentos do solo e prever os efeitos do comportamento deste carbono nas diferentes práticas de manejo (CERRI *et al.*, 2018).

Quando ecossistemas nativos são alterados por atividades antrópicas, o equilíbrio dinâmico existente é rompido e, normalmente, as entradas de carbono passam a ser menores do que as saídas, reduzindo a quantidade e alterando a qualidade da matéria orgânica do solo (BONILLA-BEDOYA *et al.*, 2017; MURPHY, BOSCHMA, HARDEN, 2017).

Os estoques de carbono do solo são controlados por uma variedade de fatores climáticos e biogeoquímicos e são diretamente influenciados por mudanças no uso e ocupação do solo, em particular pela conversão de ecossistemas nativos em áreas cultivadas para agricultura e pecuária (CERRI *et al.*, 2008; SOARES, 2018), entre outros.

O aumento dos estoques de carbono no solo está comumente associado à redução dos efeitos negativos das mudanças climáticas, no entanto, a presença de carbono no solo e na biomassa vegetal é também benéfica para outras funções dos ecossistemas (PARRON; RACHWAL; MAIA, 2015).

Muito embora a dinâmica do carbono venha sendo estudada nos solos brasileiros há algum tempo (BRITO *et al.*, 2018; MASCARENHAS *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2019), muitos autores avaliam os estoques de carbono apenas na superfície do solo, isto é, até 0,40 m de profundidade, considerando que as variações em função das profundidades do preparo do solo e da área de influência de raízes ocorrem principalmente até essa profundidade (PARRON; RACHWAL; MAIA, 2015).

Os modelos de simulação, como CENTURY, CQESTR, DNDC, ROTHC, DoSoftware, permitem a extrapolação dos resultados sem deixar de levar em conta as particularidades de cada local. Os modelos explicitam relações, pois integram o conhecimento já existente sobre as interações entre clima/tempo, solos e plantas, de modo a integrar fatores ambientais e ecológicos (WEILER, 2016).

Os modelos computacionais são ferramentas que possibilitam simulações de estoque de carbono superando problemas de ordem temporal, espacial e de quantidade de dados à disposição deles.

Neste trabalho avaliaram-se os resultados estimados por modelos em relação a observações de campo em trabalhos realizados no Brasil, buscando apresentar a importância da compreensão do comportamento do carbono em seis Biomas e diferentes cenários do uso agrícola dos solos.

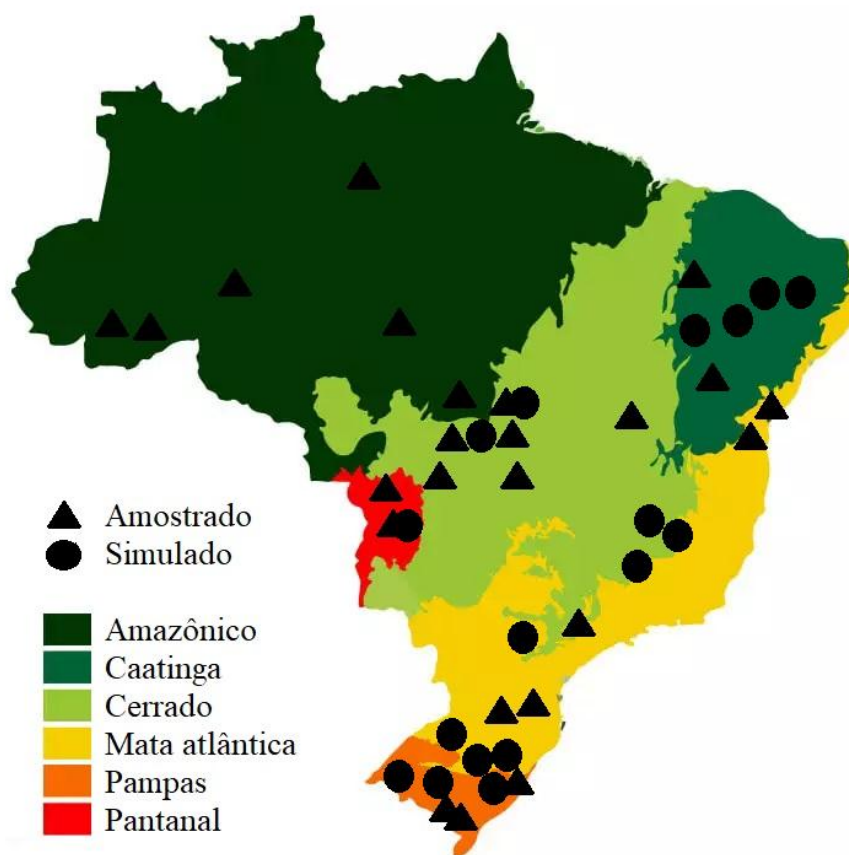
Assim, o objetivou-se com esse trabalho compilar e avaliar informações de dados amostrais e de resultados de simulações de estoque de carbono no solo, com os modelos CENTURY e CQESTR, em seis biomas brasileiros e verificar a contribuição dos fatores Bioma, Sistemas de uso do solo, Profundidade amostrada e o Tipo de dado (amostrado ou simulado) sobre o estoque de carbono dos solos.

2.2 Material e Métodos

Este trabalho envolveu os biomas Cerrado, Amazônia, Pantanal, Caatinga, Mata-atlântica e Pampas, sendo encontrados na análise dos artigos científicos os modelos CENTURY e CQESTR (Figura 1).

Na Amazônia foram avaliados seis trabalhos, em solos que variaram entre Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Espodossolos, nas camadas de 0 a 2,0 m, sob cultivo convencional, cultivo mínimo, pastagem, agrofloresta e manutenção de floresta nativas (Apêndice I, Tabela 1).

Figura 1 – Biomas e indicação dos locais onde foram realizadas as pesquisas que abordaram o estoque de carbono dos solos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Caatinga foram avaliados seis trabalhos englobando Latossolos, Plintossolos, Argissolos, Cambissolos, Neossolos e Luvisolos, em camadas que variaram de 0 a 0,40 m de profundidade, com uso e ocupação como Caatinga preservada, Caatinga pastejada, reflorestamento e cultivo convencional (Apêndice I, Tabela 2).

No Cerrado foram avaliados oito trabalhos envolvendo Latossolos, Gleissolos e Plintossolos, nas camadas de 0 a 0,60 m, com uso e ocupação do solo na forma de lavoura-pecuária-floresta, plantio direto, plantio convencional e pastagem (Apêndice I, Tabela 3).

Na Mata-atlântica foram avaliados onze trabalhos em Latossolos, Organossolos, Nitossolos, Neossolos e Chernossolos, na camada de solo 0 a 1,0 m, com uso e ocupação de sistemas agroflorestais, floresta nativa, floresta plantada, cultivo convencional, pastagem, lavoura-pecuária, plantio direto, sendo o solo predominante encontrado no bioma o Latossolo. (Apêndice I, Tabela 4).

No Pampa foram avaliados cinco trabalhos em Argissolos, Cambissolos e Chernossolos na camada de solo de 0 a 1,0 m, com sistema de campos naturais, floresta plantada e pastagens (Apêndice I, Tabela 5).

No Pantanal foram avaliados cinco trabalhos em Argissolos, Gleissolos, Neossolos e Espodosolos na camada de solo de 0 a 0,40 m, sob campos naturais, floresta plantada e pastagens (Apêndice I, Tabela 6).

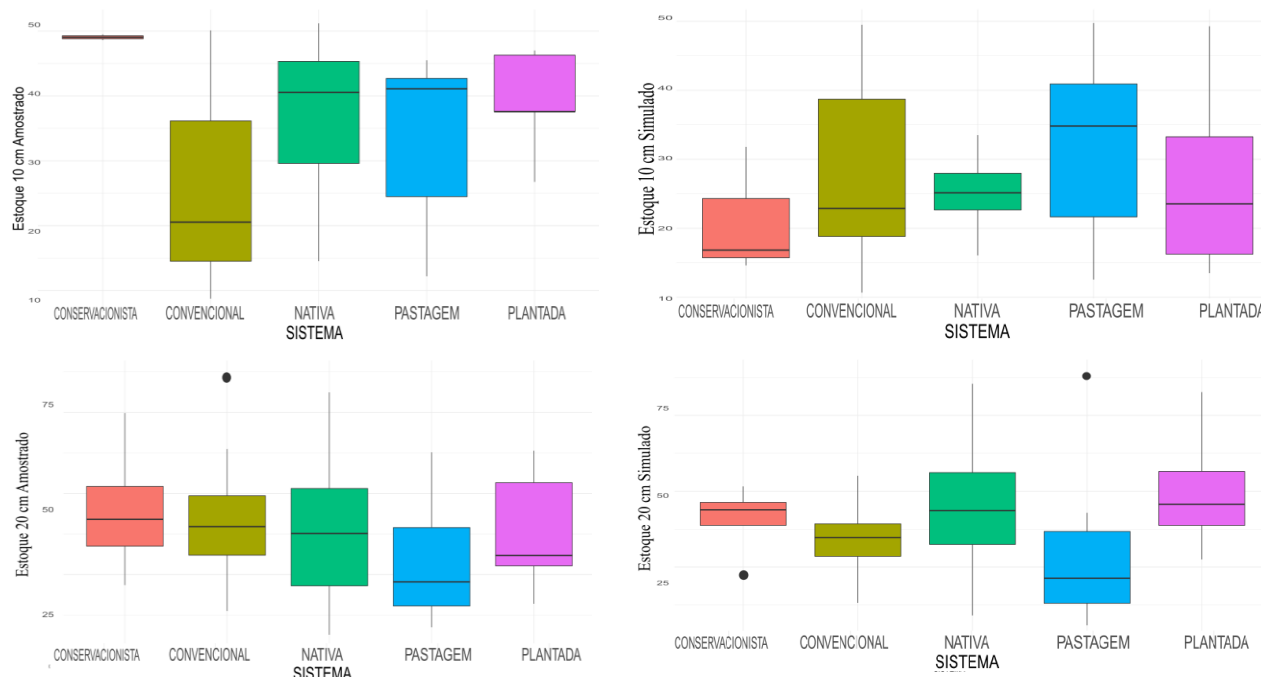
Os dados analisados neste trabalho ficaram restritos à camada de 0 a 0,20 m de profundidade, devido a existência de dados obtidos tanto por coleta amostral quanto por simulações em modelos, deste modo, a pesquisa ficou reduzida a 42 experimentos, do inicialmente levantado (Apêndice II). Assim, foram avaliados os estoques de carbono do solo (EstC) oriundos desses trabalhos científicos, separados por coleta, pelas camadas de 0 - 0,10 m e 0 - 0,20 m, nos biomas brasileiros.

Como fator de análise, os trabalhos foram filtrados para garantir condições semelhantes e práticas de manejo comumente usadas, com os seguintes sistemas agrícolas: vegetação nativa (VN) com a particularidade do cenário dos pampas, onde pastagem natural foi considerada VN; vegetação plantada (VP) sendo abordados trabalhos com eucalipto, pinus e cacau; plantio convencional (PC), práticas conservacionistas (PCS) tendo sido consideradas nesse cenário os dados obtidos no sistema plantio direto ou cultivo mínimo e pastagem (PAS).

Inicialmente, os dados coletados foram submetidos à análise exploratória descritiva (Tabelas 2 a 4) e gráfica por boxplot (Figura 2). Testes de aderência foram realizados para testar a hipótese da normalidade, sendo aceita ($P > 0,05$) por meio do teste de Shapiro-Wilk.

As diferenças entre variáveis analisadas ocorreram apenas quanto ao número de níveis dos fatores empregados. Para a camada de 0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, na coleta por amostra, sendo utilizado o esquema fatorial 5 x 2 incompleto, sendo 5 sistemas (Plantada, Nativa, Conservacionista, Convencional e Pastagem) e 2 biomas (Amazonas e Caatinga). Para a camada 0 - 0,20 m na coleta por amostra, o esquema fatorial utilizado foi 5 x 4 incompleto, sendo 5 sistemas (Plantada, Nativa, Conservacionista, Convencional e Pastagem) e 4 biomas (Mata-atlântica, Cerrado, Pampas e Pantanal), na coleta por simulação, o esquema foi o 5 x 5 sendo 5 sistemas de uso do solo (Plantada, Nativa, Conservacionista, Convencional e Pastagem) e 5 biomas (Mata-atlântica, Cerrado, Pampas, Pantanal e Caatinga).

Figura 2 – Gráfico de Boxplot do estoque de carbono do solo (Estoque), nas camadas de 0,0 - 0,10 e 0,0 - 0,20 m, por sistema de uso do solo (SISTEMA), amostrados e simulados.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O foco deste trabalho esteve voltado à avaliação de resultados obtidos por meio de amostragem ou simulação com nível de informações dos Biomas, específicas dos Sistemas de uso, envolvendo literaturas que estivessem sob mesmas condições, para uma comparação mais fidedigna.

Em todas as situações foram realizadas a análise de variância (ANOVA) aplicando-se o teste F a 5% de probabilidade para detectar as diferenças dos fatores e a interação entre eles e também para detectar as diferenças entre as médias dos fatores com apenas dois níveis, quando encontradas diferenças significativas ($P < 0,05$). Para os demais fatores acima de dois níveis foi utilizado o teste de Scott-Knott a 5% para detectar diferenças entre as médias.

Complementar a análise de variância foi realizada a análise de componentes principais, com o intuito de verificar a contribuição do fator de estudo analisado na variável resposta EstC (Figura 3, Tabela 5). As análises estatísticas e os gráficos ilustrativos foram realizados com o auxílio do *software* R (R CORE TEAM, 2019) versão 3.6.2.

2.3 Resultados e Discussão

A análise de variância (Tabela 1) mostra diferenças significativas ($P < 0,05$) entre biomas na camada 0 - 0,20 m em material amostrado. Nas camadas de 0 - 0,10 m e 0 - 0,20 m simulados, entre sistemas, foram encontradas diferenças significativas ($P < 0,05$) na camada 0 - 0,10 m quando as amostras foram coletadas e de 0 - 0,20 m quando ocorreu simulação. Houve interação significativa ($P < 0,05$) apenas na camada amostrada de 0 - 0,10 m, nas demais variáveis a interação não significativa.

Tabela 1 – Quadrado médio (QM) e coeficiente de variação (CV) obtidos na análise de variância do estoque de carbono do solo nas camadas de 0 - 0,10 m e 0 - 0,20 m, para dados amostrados (Amostrado) e dados obtidos por simulação (Simulado).

FV	Amostrado		Simulado	
	0 - 0,10 m	0 - 0,20 m	0 - 0,10 m	0 - 0,20 m
Biomass (B)	52,21 ^{ns}	2940,48 ^{**}	2247,15 ^{**}	1348,55 ^{**}
Sistema (S)	544,32 ^{**}	3,05 [*]	87,06 ^{ns}	2931,07 ^{**}
B*S	477,25 [*]	0,52 ^{ns}	181,9 ^{ns}	396,83 ^{ns}
CV	35,05	43,44	34,96	41,23
Média geral	31,73	36,96	27,43	37,49

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. FV: Fontes de variação

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Amazônia e a Caatinga apresentam características climáticas distintas, isto pode ter influenciado diretamente o comportamento do EstC. Nesse trabalho são considerados apenas os valores do estoque, independente do que amplia ou diminui o estoque ao longo do tempo. Para dados amostrados na Amazônia, na camada de 0 - 0,10 m, pelo teste de Scott-Knott, o sistema convencional se mostrou como o pior cenário para o EstC, enquanto para dados na camada de 0,10 - 0,20 m, o pior cenário foi na pastagem. Para os demais sistemas não houve diferença ($P > 0,05$) estatística entre as médias (Tabela 2).

O uso de uma agricultura com prática convencional não amplia a capacidade do solo em estocar carbono, representando quase a metade dos valores das outras práticas (Tabela 2) que pode ser explicada pela constante movimentação do solo e por consequência oxidação da matéria orgânica. Já a pastagem nesse cenário manteve os estoques bem próximos aos sistemas de vegetação nativa e práticas conservacionistas devido provavelmente ao aporte de

massa vegetal (raízes e parte aérea) além da baixa mobilização do solo, resultados similares foram encontrados em outros trabalhos no bioma (ARAÚJO *et al.*, 2011; BELANGER *et al.*, 2017).

Tabela 2 – Média do estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}) obtido no desdobramento dos sistemas de Uso da terra o bioma para dados amostrados na profundidade 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m

0 – 0,10			0,10 – 0,20		
Sistema	Biomias		Sistema	Biomias	
	Amazônico*	Caatinga ^{ns}		Amazônico**	Caatinga ^{ns}
Plantada	-	39,04 aA	Plantada ^{ns}	24,75 aA	27,84 aA
Nativa ^{ns}	45,35 aA	35,25 aA	Nativa	25,14 a	-
Conservacionista	49,05 a	-	Conservacionista	21,08 a	-
Convencional ^{ns}	22,63 aA	28,68 aA	Convencional ^{**}	22,63 aA	34,76 bA
Pastagem*	43,10 aA	18,33 aB	Pastagem ^{**}	19,92 bB	41,23 aA

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott e F a 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As boas práticas agrícolas como o cultivo mínimo e o plantio direto, são benéficas ao solo, e essa premissa pode ser aplicada ao incremento no EstC, pois as práticas conservacionistas geram menor emissão de CO_2 do solo para a atmosfera, em relação ao sistema convencional, reduzindo os impactos da atividade agrícola no ambiente e o efeito estufa (BURTAN *et al.*, 2017; HAQUE *et al.*, 2016; RODRIGUES *et al.*, 2017).

Na Caatinga não foi encontrada diferença significativa ($P > 0,05$) entre os sistemas para nenhuma das variáveis avaliadas podendo ser explicada pelo baixo aporte de matéria orgânica oriunda da vegetação. Neste Bioma os estoques de carbono estão em torno de 30 Mg ha^{-1} (ALTHOFF, 2015), valor inferior as médias encontradas para outros Sistemas neste trabalho.

Na camada de 0 - 0,20 m, para dados amostrados, não foram encontradas diferenças significativas ($P > 0,05$) entre os sistemas nos biomas Mata-atlântica e Cerrado. Enquanto, nos Pampas e Pantanal houve diferenças significativas ($P < 0,05$), sendo o sistema pastagem no pantanal obtendo o pior EstC nas duas situações encontradas (Tabela 3)

Tabela 3 – Média do estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}) obtidos no desdobramento dos sistemas de uso do solo (Sistema) dentro do bioma para dados amostrados na profundidade de 0,0 – 0,20 m

Sistema	Biomas				Média
	Mata Atlântica ^{ns}	Cerrado ^{ns}	Pampas [*]	Pantanal [*]	
Plantada ^{ns}	32,20 aA	41,05 aA	-	-	38,13 a
Nativa ^{**}	41,45 aA	44,67 aA	49,70 aA	29,74 aB	37,12 a
Conservacionista ^{ns}	44,35 aA	31,59 aA	49,11 aA	-	43,42 a
Convencional ^{ns}	45,32 aA	37,64 aA	39,08 aA	-	40,17 a
Pastagem ^{**}	49,25 aA	38,11 aA	20,28 bB	14,75 bB	26,88 b
Média	42,39 A	39,58 A	44,39 A	24,37 B	

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott e F a 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para dados simulados na mesma camada (Tabela 4), Mata-atlântica e Pantanal foram os únicos que apresentaram diferença significativa ($P < 0,01$) entre sistemas, onde na Mata-atlântica os sistemas Plantado e Nativa formaram um grupo superior aos sistemas convencional e pastagem, no que diz respeito ao EstC onde o maior aporte de material vegetal pode ser uma possível explicação.

Tabela 4 – Média dos estoques de carbono do solo obtidos no desdobramento dos sistemas dentro de Bioma para dados simulados na profundidade de 0 – 0,20 m.

Sistema	Biomas					Média
	Mata-atlantica ^{**}	Cerrado ^{ns}	Pampas ^{ns}	Pantanal ^{**}	Caatinga ^{ns}	
Plantada ^{**}	59,32 aA	-	29,98 aB	-	40,67 aB	
Nativa ^{ns}	50,63 aA	37,17 aA	46,70 aA	43,14 aA	37,91 aA	43,53 a
Conservacionista	-	39,27 aA	-	-	-	39,27 a
Convencional ^{ns}	25,66 bA	32,07 aA	45,42 aA	-	38,49 aA	34,26 a
Pastagem ^{**}	37,67 bA	29,67 aA	-	12,67 bB	29,87 aA	21,40 b
Média	45,31 A	34,3 B	42,90 A	29,21 B	36,97 B	

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 1%, 5% e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. Médias seguidas pela mesma letra minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott e F a 5%, respectivamente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nesse cenário, a pastagem proporcionou diferença significativa dos demais sistemas, tanto na Mata-Atlântica, quanto no Pantanal, embora, a pastagem quando bem conduzida tenha a capacidade de sequestrar carbono para o solo. No entanto, nesse conjunto de dados não foi possível verificar esse comportamento podendo ser um resultado obtido devido a mineralogia dos solos estudados, pelo manejo adotado ou pela qualidade da pastagem (COUTO; OLIVEIRA, 2011).

No Pantanal especificamente, Cardoso *et al.* (2010), informam que menor EstC se deve ao menor aporte de resíduos orgânicos nas pastagens, determinado pela marcante extração de biomassa na aérea desse ecossistema, e pela pressão de pastejo.

O comportamento das médias simuladas na profundidade de 0 – 0,10 m do bioma Amazônico e da Caatinga (Tabela 4), apresentou diferenças significativas na interação dos sistemas estudados. Na Amazônia houve possível superestimação da média da pastagem, enquanto na Caatinga, como sugere Althoff (2015), a média dos estoques de carbono giram em torno de 30 Mg ha⁻¹ com valores simulados com o modelo Century na ordem de 29,5 Mg ha⁻¹.

No Pantanal, os modelos para determinar o estoque do carbono devem levar em consideração os efeitos sazonais da hidrologia característica da região, na qual ocorre período de anaerobiose que favorece o acúmulo de matéria orgânica no solo, portanto, sem essa informação, os modelos podem subestimar os valores de carbono nesse bioma (MELLO *et al.* 2015).

O sistema de manejo pastagem na Amazônia apresentou EstC maior que os demais sistemas abordados, comportamento também observado por Campos *et al.* (2016), os quais explicam os altos valores de EstC em área sob pastagem na Amazônia devido à presença das gramíneas que exibem efeito rizosférico (SOUZA *et al.*, 2012) ou maior densidade de raízes devido ao seu comportamento fasciculado e teores de carbono orgânico altos nessas áreas (SALIMON *et al.*, 2007; BALIN *et al.*, 2017) dependem da relação entre as adições de carbono (C) pelas plantas e as perdas para a atmosfera, resultantes da oxidação microbiana do C orgânico a CO₂ (COSTA *et al.*, 2018).

A técnica dos componentes principais (ACP), mostra que os dois primeiros ACP foram responsáveis por 64,21% da variação total, sobre o EstC, sendo o PC1 responsável por 35,10% e o PC2, por 29,11% das variações dos dados (Tabela 5). Esses componentes foram escolhidos por apresentarem autovalores superiores a 1, de acordo com o Critério de Kaiser (JOHNSON; WICHERN, 2002).

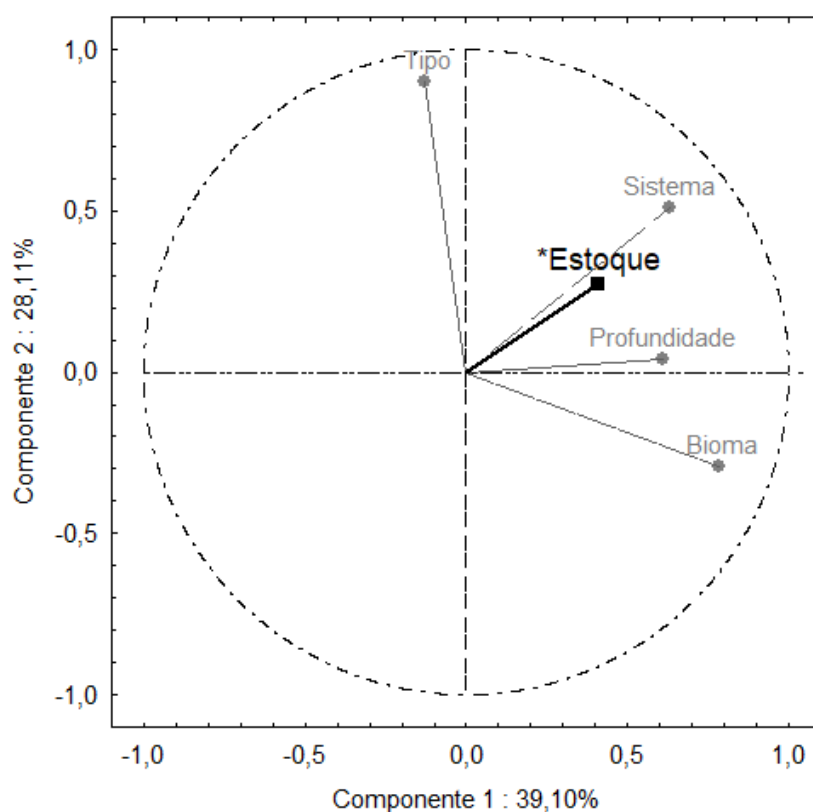
Tabela 5 – Autovalores e percentual da variância explicada de cada componente.

Número de componentes	Autovalores	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância explicada acumulada
PC1	1,40	35,10	1,40	35,10
PC2	1,16	29,11	2,57	64,21
PC3	0,86	21,60	3,43	85,81
PC4	0,57	14,19	4,00	100,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O diagrama de vetores (Figura 3) mostra a sensibilidade dos indicadores numa correlação bidimensional entre os fatores nas componentes 1 e 2. O comprimento dos vetores e direcionamento correspondem a sensibilidade do fator na componente. Assim, é possível observar a variabilidade de um indicador numa relação multivariada. O fator Tipo se aproximou do comprimento de círculo +1, mas não está no mesmo quadrante que o EstC. O fator Sistema se aproximou do comprimento de círculo +0,7 e o fator Profundidade +0,64, ambos no mesmo quadrante, mostrando que além de afetaram positivamente o estoque de carbono, demonstram maior sensibilidade (Figura 3). Neste sentido, o Sistema além de apresentar maior comprimento de vetor e estar no mesmo quadrante está mais próximo à variável resposta, o que permite concluir que este é o fator com maior contribuição para EstC.

Figura 3. Projeção dos fatores tipo (amostrado ou simulado), sistema de manejo (Sistema), profundidades (Profundidade) e biomas (Bioma) nas componentes principais e sua contribuição na variável estoque de carbono do solo (*Estoque).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os valores de EstC estão mais correlacionados com os Sistemas de manejo do solo, seguidos da Profundidade (camada amostrada do solo) como pode ser verificada na análise de componentes principais (Figura 3). Deste modo, o manejo inadequado do solo, ou a alteração

da cobertura vegetal nativa, podem levar a grandes perdas do carbono estocado (DENARDIN *et al.*, 2014).

O conjunto de dados representou os EstC em todos os Biomas e Sistemas pré-estabelecidos, corroborando com dados de outras pesquisas (SANTOS, 2019; JOVANOVIĆ, 2017; ROCHA *et al.*, 2014) nas mesmas áreas que não atenderam os critérios de homogeneidade dos dados.

Apesar de algumas diferenças nos resultados de carbono do solo, na Caatinga valores amostrados e simulados podem ser usados para comparar com eficácia os EstC nos biomas realizando comparação cruzada de um mesmo sistema agrícola em diferentes fitofisionomias (COSTA *et al.*, 2018).

2.4 Conclusões

O sistema de uso do solo é o fator de maior interferência para a o estoque de carbono no solo.

Com a análise dos componentes principais ficou evidenciado que os sistemas de uso é o fator que mais influencia o estoque de carbono nos diferentes biomas, tanto para dados amostrados como simulados.

As profundidades de 0,0 - 0,10 ou 0,0 - 0,20 m não evidenciaram diferenças na contribuição de estoque de carbono, no conjunto de dados avaliados.

Para os dados amostrados, os sistemas convencional e pastagem apresentaram os menores valores de estoque de carbono do solo, nos biomas Caatinga, Cerrado, Pampas e Pantanal

Para os dados simulados, os menores estoques de carbono ocorreram no sistema convencional e na pastagem do bioma Mata-Atlântica.

A utilização do sistema convencional no bioma Amazônico pode comprometer o estoque de carbono no solo.

Os sistemas de vegetação nativa e práticas agrícolas conservacionista apresentam-se como melhores alternativas para manutenção ou ampliação dos estoques de carbono do solo nos biomas brasileiros.

REFERÊNCIAS

- ALTHOFF, T. D. **Adaptação do modelo Century para simulação da produtividade de biomassa e ciclagem do carbono e nitrogênio em áreas de caatinga**. 2015. 217 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- ARAÚJO, E. A. de. *et al.* Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 41, n. 1, p. 103-114, 2011.
- BALIN, N. M. *et al.* Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 3, p. 85-94, 2017.
- BATALHA, M. A. O cerrado não é um bioma. **Biota Neotropical**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 1-4, 2011.
- BELANGER, E. *et al.* Altered nature of terrestrial organic matter transferred to aquatic systems following deforestation in the Amazon. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 87, p. 136-145, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.016>. 2017.
- BERSELI, C. *et al.* Economic injury level of canjiqueira in native pastures in pantanal of Nhecolândia. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 37, p. e019177106, 2019. Epub November DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582019370100112>. 2019
- BONILLA-BEDOYA, S. *et al.* Effects of land use change on soil quality indicators in forest landscapes of the Western Amazon. **Soil Science**, Philadelphia, v. 182, n. 4, p. 128-136, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/SS.0000000000000203>. 2017.
- BRITO, M. R. *et al.* Estoque de carbono no solo sob diferentes condições de cerrado. DESAFIOS - **Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 5 n. Especial; p. 114-124, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2018vol5nEspecialp114>.
- BURTAN, L. *et al.* Economic analysis between minimum tillage and conventional system. **Journal of Environmental Protection and Ecology**, Sofia, v. 18, n. 3, p. 1289-1294, 2017.
- CARDOSO, A. da S. *et al.* Simulação das emissões de gases de efeito estufa em diferentes cenários de intensificação de uso das pastagens no bioma Cerrado. In: SEMANA CIENTÍFICA JOHANNA DOBEREINER, 2010, Seropédica. **Anais [...]** Seropédica: [s. n.], 2010.
- CERRI, C. E. P. *et al.* R. Reducing Amazon Deforestation through Agricultural Intensification in the Cerrado for Advancing Food Security and Mitigating Climate Change. **Sustainability**, New Rochelle, v. 10, p. 989. <https://doi.org/10.3390/su10040989>

COSTA CAMPOS, M. C. *et al.* Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas Ambiente & Água. **An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 339-349, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1819>

COSTA, T. G. A. *et al.* Dinâmica de Carbono do Solo em Unidade de Conservação do Cerrado Brasileiro sob diferentes fitofisionomias. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 306-323, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e42018306-323>.

COUTINHO, L. M. **Biomass brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A. The Soil diversity of the Pantanal In: Junk W; Da Silva CJ; demais editores (ed.). **The Pantanal of Mato Grosso: Ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland**. Sofia: Pensoft, 2011. p. 71-102.

DENARDIN, R. B. N. *et al.* Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó – SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n.1, p. 59-69, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509813323>.

HAQUE, M. E. *et al.* Minimum tillage unpuddled transplanting: an alternative crop establishment strategy for rice in conservation agriculture cropping systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 185, p. 31-39, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.018>.

JALANE, O. I. Regiões de altos níveis de desmatamento e a dinâmica do carbono. **Revista Tocantinense de Geografia**, Palmas, v. 8, n. 16, p. 162-176, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.20873/uft.2317-9430.2019v8n16p162>.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 2002. v. 5, n. 8.

JOVANOVIC, B. **Dinâmica da matéria orgânica na fase inicial de implementação de um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária,. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

MASCARENHAS, A. *et al.* Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 89, p. 19-27, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2017.pfb.37.89.1295>. 2017.

MELLO, J. M.; *et al.* Dinâmica dos atributos físico-químicos e variação sazonal dos estoques de carbono no solo em diferentes fitofisionomias do pantanal norte mato-grossense. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 2, p. 325-336. 2015.

MURPHY, S. R.; BOSCHMA, S. P.; HARDEN, S. Soil water dynamics and dry matter production of old man saltbush, native grass and lucerne based pastures in a variable summer

dominant rainfall environment, Australia. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 72, n. 2, p. 290-307. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/gfs.12239>. 2017.

OELKERS, E. H.; COLE, D. R. Carbon dioxide sequestration: a solution to the global problem. **Elements**, Quebec, v. 4, p. 305-310, 2008.

PARRON, L. M.; RACHWAL, M. F. G.; MAIA, C. M. B. de F. Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica. In: PARRON, L. M.; RACHWAL, M. F. G.; MAIA, C. M. B. de F. **Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap. 7, p. 92-100.

R DEVELOPMENT CORE TEAM R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

RIBEIRO, J. M. *et al.* Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 913-923, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509825310>.

ROCHA, G. P. *et al.* Caracterização e estoques de carbono de sistemas agroflorestais no Cerrado de Minas Gerais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, p. 1197-1203. 2014.

RODRIGUES, M. *et al.* Changes in chemical properties by use and management of an Oxisol in the Amazon biome. **Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 278-286, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n202rc>.

SALIMON, C. I.; WADT, P. G. S.; DE MELO, A. W. F. Dinâmica do carbono na conversão de floresta para pastagens em Argissolos da formação geológica Solimões, no sudoeste da Amazônia. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 29-38, 2007.

SANTOS, T. C. dos. **Impactos das mudanças de uso da terra e manejo nos estoques de carbono do solo em diferentes biomas brasileiros**. 2019. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Rio Largo, 2019.

SILVA, V. P. DA; FRANÇA G. L. dos S. Percepções de mudanças do clima, impactos e adaptação para sertanejos do semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 22, p. 229-248, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55958>.

SOARES, G. J. **Influência da rochagem no desenvolvimento de sistemas agroflorestais e na captura de dióxido de carbono atmosférico**. 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SOUZA, A. M. *et al.* **Introdução a projetos de experimentos**: caderno didático. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Estatística, 2002.

WEILER, D. A. **Biomassa, estoques de carbono e gases de efeito estufa em sistemas de manejo e cenários climáticos futuros**. 2016. 125 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

3 **CAPÍTULO 2: ESTOQUE DE CARBONO NO CULTIVO DE EUCALIPTO EM COMPARAÇÃO COM PASTAGEM E CERRADO NATURAL, NO SUDESTE DO MATO GROSSO DO SUL**

Resumo – Extensas áreas do Mato Grosso do Sul eram cobertas pelo Cerrado, bioma considerado limitante para várias culturas e que foram transformadas em pastagem, que com inadequado manejo houve degradação da pastagem e do solo. Essas mesmas áreas têm se mostrado promissoras sendo utilizadas para plantio de eucalipto utilizadas para tal fim por diversas indústrias de celulose. Objetivou-se com este trabalho verificar o estoque de carbono no solo (EstC) em áreas de cerrado natural, pastagem e cultivo de eucalipto em estádios de desenvolvimento, definindo diante desses usos do solo, qual seria o mais adequado para a manutenção ou ampliação do estoque de carbono ao longo do perfil do solo. Para isto, em 7 áreas, sendo 5 áreas de plantio de eucalipto em estádios de desenvolvimento (3, 5 e 7 anos do primeiro ciclo, e 10 e 14 anos do segundo ciclo de cultivo) com coletas realizadas em duas posições (nas linhas e entrelinhas de plantio), uma área de pastagem degradada e uma de cerrado nativo, divididas em 4 conglomerados, foram coletadas amostras indeformadas de solo, com o auxílio de anéis volumétricos (100 cm³), nas profundidades 0,0 – 0,10, 0,10 – 0,30, 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m. Todas as áreas selecionadas estão localizadas no Sudeste do Mato Grosso do Sul, em solos de textura arenosa e clima do tipo Aw (verão chuvoso e inverno seco). Os dados obtidos foram analisados quanto a estatística descritiva, depois procedeu-se a análise de variância, que seguiu o delineamento em blocos, sendo cada bloco composto por um conglomerado (*clusters*) em esquema fatorial (5 x 2 + 2) x 4, sendo cinco idades das plantas pós plantio do eucalipto (3, 5, 7, 10 e 14 anos), duas posições (linha e entrelinha) e dois tratamentos adicionais (cerrado e pastagem) em quatro profundidades (0,0 – 0,10, 0,10 – 0,30, 0,30 – 0,60, 0,60 – 1,00 m). O teste F foi utilizado para detectar as diferenças dos fatores e das interações, o teste de Tukey para detectar as diferenças entre as médias dos anos de cultivo, e o teste de Dunnett para comparações entre essas médias com as médias das testemunhas e entre testemunhas. Ao analisar o teor de umidade do solo foram verificadas diferenças significativas em profundidade e tempo de cultivo do eucalipto, na profundidade 0,0 – 0,10 m e no ano 14 (eucalipto 4,1%; Cerrado 6,5% e pastagem 8,1%) e na profundidade 0,10 – 0,30 m e no ano 14 (eucalipto 4,6%, Cerrado 6,7% e pastagem 8,8%). Na resistência do solo à penetração (RP) diferenças foram registradas na profundidade de 0,10 – 0,30 m e no ano 14, na entrelinha (eucalipto 4,01 MPa, Cerrado 1,01 MPa e pastagem 2,04 MPa), e na profundidade de 0,30 – 0,60 m e no ano 14, na entrelinha (eucalipto 4,09 MPa,

Cerrado 1,50 MPa e pastagem 2,24 MPa). Na análise do estoque de carbono (EstC) as diferenças significativas de destaque foram constatadas na profundidade de 0,30 – 0,60 m e no ano 14, na entrelinha (eucalipto 10,0 Mg ha⁻¹, Cerrado 9,89 Mg ha⁻¹ e pastagem 10,96 Mg ha⁻¹) e na profundidade de 0,60 – 1,00 m, no ano 14, na linha (eucalipto 11,05 Mg ha⁻¹, Cerrado 14,47 Mg ha⁻¹ e pastagem 15,20 Mg ha⁻¹). A preservação do Cerrado mantém o EstC, condição estatisticamente semelhante ao EstC verificado na conclusão dos ciclos do eucalipto, isto é, 7 e 14 anos. O EstC na pastagem degradada mostra a importância da gramínea na manutenção do carbono orgânico no solo, e consequentemente do EstC.

Palavras-chave: resistência do solo à penetração; teor de umidade; ANOVA; teste de Dunnett.

Carbon stock under eucalyptus cultivation compared to pasture and natural Cerrado, in southeastern Mato Grosso do Sul

Abstract – Extensive areas of Mato Grosso do Sul were covered by Cerrado, a biome considered limiting for several cultures, and which were transformed into pasture, which with inadequate management resulted in pasture and soil degradation. These same areas have shown to be promising for planting eucalyptus and have been used for this purpose by several pulp industries. This work aimed to verify the soil carbon stock (EstC) in areas of natural cerrado, pasture and eucalyptus cultivation, defining in view of these land uses, which is the most suitable for the maintenance or expansion of the carbon stock along the profile of the ground. For this, in 7 areas, being 5 areas of eucalyptus plantation in different stages of development (3, 5 and 7 years of the first cycle, and 10 and 14 years of the second cycle of cultivation) with collections carried out in the lines and between the planting lines. , a degraded pasture area and a native Cerrado area, divided into 4 conglomerates, undisturbed soil samples were collected, with the aid of volumetric rings (100 cm³), at depths 0.0 – 0.10, 0.10 – 0.30, 0.30 - 0.60 and 0.60 - 1.00 m. All selected areas are located in the Southeast of Mato Grosso do Sul, in sandy textured soils and Aw-type climate (rainy summer and dry winter). The data obtained were analyzed in terms of descriptive statistics, then the analysis of variance was carried out, which followed the design in blocks, with each block composed of a conglomerate (clusters) in a factorial scheme (5 x 2 + 2) x 4, being five ages of eucalyptus plants after planting (3, 5, 7, 10 and 14 years), two positions (row and between rows) and two additional treatments (Cerrado and pasture) at four depths (0.0 – 0.10, 0.10 - 0.30, 0.30 -

0.60, 0.60 - 1.00 m). The F test was used to detect differences in factors and interactions, Tukey's test to detect differences between the averages of the years of cultivation, and Dunnett's test for comparisons between these averages with the averages of the controls and between controls. When analyzing the soil moisture content, significant differences were observed in depth and time of eucalyptus cultivation, at depth 0.0 - 0.10 m and in year 14 (eucalyptus 4.1%; Cerrado 6.5% and pasture 8, 1%) and at depth 0.10 – 0.30 m and in year 14 (eucalyptus 4.6%, Cerrado 6.7% and pasture 8.8%). In soil penetration resistance (RP) differences were recorded at the depth of 0.10 – 0.30 m and at year 14, between the rows (eucalyptus 4.01 MPa, Cerrado 1.01 MPa and pasture 2.04 MPa), and at a depth of 0.30 – 0.60 m and in year 14, between the rows (eucalyptus 4.09 MPa, Cerrado 1.50 MPa and pasture 2.24 MPa). In the analysis of carbon stock (EstC) the significant differences were observed at the depth of 0.30 – 0.60 m and in year 14, between the rows (Eucalyptus 10.0 Mg ha⁻¹, Cerrado 9.89 Mg ha⁻¹).¹ and pasture 10.96 Mg ha⁻¹) and at a depth of 0.60 – 1.00 m, in year 14, in the row (eucalyptus 11.05 Mg ha⁻¹, Cerrado 14.47 Mg ha⁻¹ and pasture 15.20 Mg ha⁻¹). Based on the data analysis, it is evident that the preservation of the Cerrado maintains the EstC, a condition statistically similar to the EstC verified at the conclusion of the eucalyptus cycles, that is, 7 and 14 years. The behavior of EstC in degraded pasture shows the importance of grass in the maintenance of organic carbon in the soil, and consequently of EstC.

Keywords: soil resistance to penetration; moisture content; ANOVA; Dunnett's test.

3.1 Introdução

O eucalipto é oriundo da Austrália e ao chegar ao Brasil, adaptou-se muito bem às condições climáticas e aos solos aqui existentes, fatores favoráveis ao seu estabelecimento e desenvolvimento. Desta maneira, ao longo do tempo o eucalipto se propagou para diversos estados brasileiros devido à rápida produção de madeira e a qualidade da celulose, o que agrega alto valor econômico à cultura (VECHI; MAGAHÃES, 2018).

Segundo dados do IBGE disponibilizados no PEVS (2020), o eucalipto ocupa 99,72% da área de florestas plantadas no Mato Grosso do Sul, com 1,13 milhões de hectares, atrás apenas de Minas Gerais (1,7 milhões de hectares). No sudeste do Mato Grosso do Sul, o cultivo do eucalipto ocupa extensas áreas e continua em franca expansão, com destaque para

os municípios de Três Lagoas, Brasilândia, Selvíria e Água Clara, onde é comumente implantado em áreas de pastagens degradadas. Estima-se que 80% dos 50 a 60 milhões de hectares de pastagens cultivadas no Brasil Central encontram-se com alguma degradação, ou seja, em processo evolutivo de perda de vigor, sem possibilidade de recuperação natural (CARVALHO *et al.*, 2017), tornando-se assim áreas atrativas para reflorestamentos.

As características de um solo, bem como sua qualidade, são determinadas, em grande parte, pelos organismos nele presente. A relação pode ser direta, como na fragmentação de material orgânico, ou indireta como na sua estruturação, podendo interferir em suas propriedades químicas, físicas e biológicas, e neste sentido, a ocorrência da grama batatais (*Paspalus notatum*) é um dos sinais de degradação das pastagens (KRYCKI, 2019).

Antes de serem transformadas em pastagem e seguir assim até sua degradação, extensas áreas do Mato Grosso do Sul eram cobertas pelo Cerrado, bioma que ocorre em condições edafoclimáticas consideradas limitantes para várias culturas, cujo solo era visto como terra improdutiva. O Cerrado é um dos biomas mais importantes do mundo para a conservação da biodiversidade, pois sua vegetação exerce proteção eficaz aos recursos hídricos e florestais, com a vantagem de consumir relativamente menor quantidade de água para sua própria sobrevivência (DURIGAN *et al.*, 2011), além de se encontrar em região de clima tropical com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A vegetação deste bioma é caracterizada como aberta ou floresta semidecidual, possuindo habitats xerofíticos, méxicos e enclaves com regiões úmidas, caracterizadas por árvores de médio porte, galhos e troncos retorcidos, raízes densas já adaptadas ao ambiente de reduzida pluviosidade, durante parte do ano (CONCEIÇÃO, 2012; MENDES *et al.*, 2012; ALMEIDA JÚNIOR *et al.*, 2014).

O Cerrado natural, em equilíbrio com o ambiente, é limitado pela capacidade de suporte do meio, e em áreas de solos muito arenosos em regiões com estação seca prolongada, a vegetação tende a ser campestre, mesmo protegida, com arbustos esparsos e árvores pequenas (DURIGAN *et al.* 2003). O solo sob Cerrado, quando conservado com vegetação nativa em equilíbrio, apresenta características físicas, químicas e biológicas adequadas à manutenção da vegetação, mas qualquer alteração em uma dessas características pode repercutir em todo o conjunto.

A introdução da silvicultura, em áreas de Cerrado, coloca a vegetação e o solo em contato com as operações do manejo silvicultural, como o tráfego intenso de máquinas agrícolas ou pisoteio de animais, perda de matéria orgânica, alteração na estrutura do solo, podendo causar efeitos negativos como compactação e erosão (PETEAN, 2011; KRAMER, 2012; MONCADA *et al.*, 2014).

A compactação é uma das principais causas da degradação do solo (RALISCH *et al.*, 2008) e os solos mais susceptíveis são os de textura média à moderadamente grosseira (francos, franco arenosos e franco siltosos), devido a maior facilidade de reorganização de suas partículas (RICHART *et al.*, 2005). Assim, um parâmetro bastante utilizado para avaliar a compactação do solo é a resistência do solo à penetração (RP), considerado indicador do grau de compactação, sendo útil para localizar camadas de solo compactadas e de maior densidade (MOLIN *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2013).

A densidade é uma propriedade física que juntamente com os teores de carbono é utilizada para quantificar o estoque de carbono do solo. O carbono orgânico (CO) do solo é reconhecido como um dos significantes indicadores universais da segurança do solo, estando ligado não apenas à mitigação da mudança do clima, mas também à capacidade do solo em prover alimentos, fibra, água e biodiversidade (KOCH *et al.*, 2013).

Nos mais diversos estudos na literatura (REGO, 2021; REBELO, 2019; MIRANDA *et al.*, 2021) observa-se que muitas variáveis podem controlar os estoques de C no solo. Em escala regional, as variáveis climáticas, como temperatura e precipitação pluvial, exercem grande importância. Na esfera local, as propriedades do solo, como densidade e fertilidade natural, ganham destaque (BRITO *et al.*, 2018).

Segundo destacaram Ivo, Santos e Albuquerque (2018) a supressão da vegetação do Cerrado para uso do solo em outros sistemas de cultivo pode em alguns casos aumentar o CO no solo, mas não se pode negligenciar a perda do CO armazenado na vegetação nativa, indicando que mudanças no uso do solo podem, também, promover a emissão de carbono para a atmosfera.

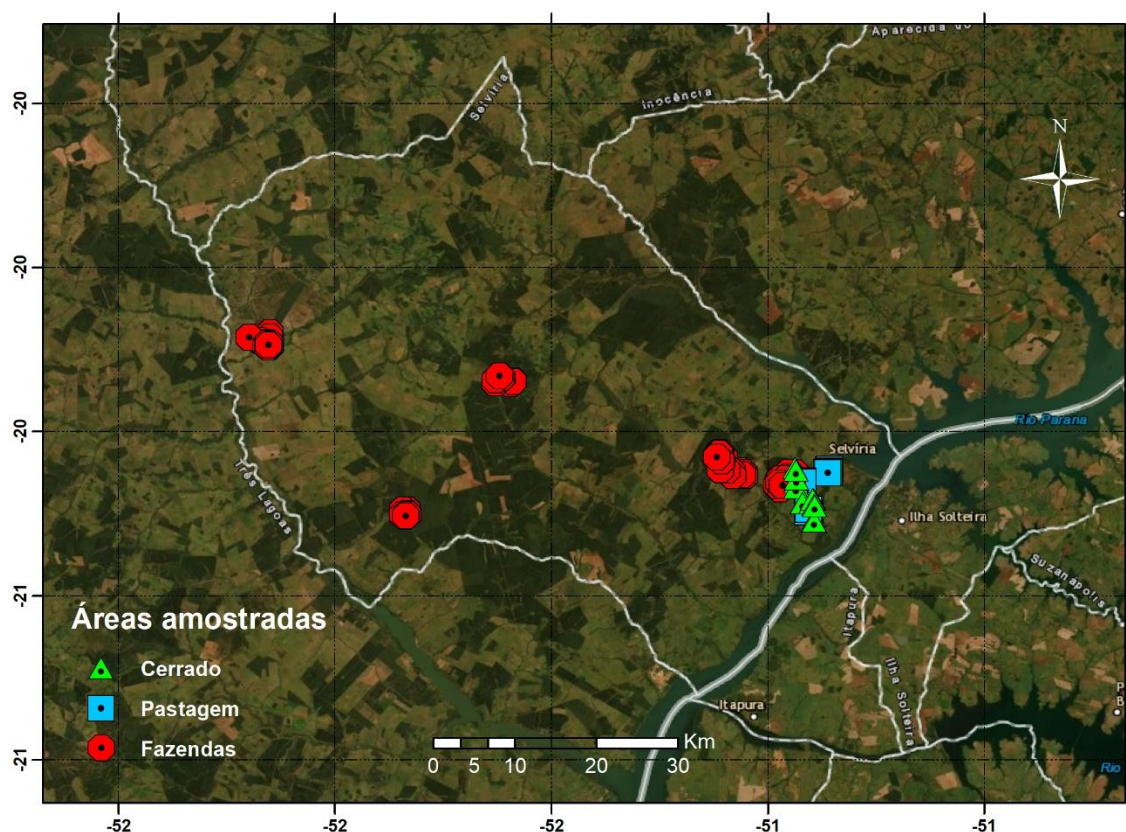
O processo de substituição de áreas de Cerrado nativo por áreas com diferentes usos, tem se intensificado nos últimos anos, como consequência ocorre uma aceleração dos processos de degradação ambiental desse bioma. Diante desse contexto, objetiva-se neste trabalho avaliar os estoques de carbono do solo em três sistemas distintos: Cerrado nativo, pastagem degradada e cultivo de eucalipto, definindo diante desses usos do solo, qual o mais adequado para a manutenção ou ampliação do estoque de carbono ao longo do perfil do solo.

3.2 Material e Métodos

As áreas selecionadas para desenvolvimento deste trabalho localizam-se na região sudeste do Estado do Mato Grosso do Sul (Figura 1). O clima na região, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo Aw (tropical úmido, com verão chuvoso e

inverno seco), em que a estação chuvosa se estende de meados de setembro até o final de abril, concentrando 90% dos valores pluviométricos, restando para o período de final de abril a final de agosto apenas 10% das chuvas (ALVAREZ *et al.*, 2013). As médias anuais de precipitação e temperatura são respectivamente de 1600 mm e de 23°C (FIBRACON, 2017).

Figura 1 – Áreas abordadas no estudo



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na região investigada predominam solos classificados como Latossolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênicos, de textura média e arenosa, em relevo plano a suave ondulado, onde os solos são geralmente ácidos e de baixa fertilidade natural (SALTON *et al.*, 2013).

Amostras foram coletadas em cinco áreas de plantio de eucalipto (com espaçamento de 3,0 m X 2,5 m) em diferentes estádios de desenvolvimento (3, 5 e 7 anos de plantio em primeiro ciclo, e 10 e 14 anos de plantio, em segundo ciclo), em uma área de Cerrado e uma área de pastagem. Cada uma destas áreas foi dividida em 4 conglomerados, sendo coletada uma amostra de solo em cada conglomerado, constituindo quatro repetições por área amostral. As amostras indeformadas foram coletadas com cilindros volumétricos (100 cm³), nas profundidades 0,0 – 0,10, 0,10 – 0,30, 0,30 – 0,60, 0,60 – 1,00 m, mesmo local e

profundidade onde foram coletadas amostras deformadas para determinação do carbono orgânico pelo método da perda de massa por ignição (BEN-DOR e; BANIN, 1989).

Na determinação do teor de carbono total do solo pelo método da perda de massa por ignição (PMI), utilizaram-se cápsulas de alumínio (24 cm³), sendo as pesagens efetuadas em balança analítica (quatro dígitos decimais). As capsulas foram aquecidas em estufa (105 ± 2 °C, 24 h) com circulação de ar e deixadas esfriar, em dessecador, para pesagem. Na sequência, foram usados cadinhos de porcelana pesados antes do procedimento e depois junto com o solo (TFSA), após isso as amostras foram calcinadas em mufla (400 ± 2 °C, 4 h), resfriadas em dessecador, e pesadas novamente.

A densidade do solo (Ds) foi determinada a partir de amostras de solo coletadas em cilindro volumétrico e calculada pela relação entre a massa seca e fresca a 105°C durante 24 h (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O estoque de carbono (EstC) foi calculado segundo Veldkamp (1994), pela equação 1:

$$EstC = (CO \times Ds \times e)/10 \quad \text{Equação 1.}$$

Onde:

EstC = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹);

CO = teor de carbono orgânico na profundidade amostrada (g kg⁻¹);

Ds = densidade do solo da profundidade (kg dm⁻³);

e = espessura da camada considerada (cm).

Como análise inicial dos dados procedeu-se com a estatística descritiva e verificada a existência de *outliers*, eles foram eliminados e substituídos pela média, permitindo que a análise estatística fosse calculada com maior rigor possível, evitando-se desta forma alterar a amplitude do desvio padrão, o que afetaria o rigor do critério de exatidão, penalizando ou favorecendo tratamentos.

A escolha da média foi por essa estatística ser mais abrangente, mais adequada para este conjunto de dados. Quando o conjunto de dados não apresenta distribuição normal, a mediana torna-se uma estimativa pouco confiável, sendo a média a mais indicada, e mesmo nos casos em que o conjunto de dados apresenta distribuição normal, a média estima melhor o valor a ser substituído (GRIEBELER *et al.*, 2016). Na análise amostral, o processo de repetição, leva a formação da curva da distribuição normal ou distribuição de Gauss, que se

trata de uma curva simétrica com resultados acima e abaixo do valor da média, de modo que 68,26% dos dados estão em torno da média $\pm$ o desvio padrão.

Após verificação da normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk (1965), procedeu-se a análise de variância, que seguiu o delineamento em blocos, onde cada conglomerado foi considerado bloco, em esquema fatorial com tratamentos adicionais e em parcela subdividida $(5 \times 2 + 2) \times 4$ (Tabela 1), sendo cinco momentos pós plantio de eucalipto (3, 5, 7 do primeiro ciclo, 3 e 7 anos do segundo ciclo ou 10 e 14 anos de cultivo do eucalipto), duas posições de coleta de solo (linha e entrelinha do eucalipto) e dois tratamentos adicionais ou testemunhas (Cerrado e pastagem) na parcela, avaliados em quatro profundidades (0,0 – 0,10, 0,10 – 0,30, 0,30 – 0,60, 0,60 – 1,00 m) nas subparcelas (com quatro repetições por talhão, sendo a coleta de amostras do solo de forma deformada com o uso de furadeira de solo a gasolina com broca de área útil de 1,0 m e coletor de solo modelo Saci).

O teste F foi utilizado para detectar as diferenças dos fatores e suas interações, e uma vez encontradas diferenças significativas, este teste foi utilizado para a comparação entre posições. O teste de Tukey foi utilizado para comparar as médias entre anos de cultivo e o teste de Dunnett foi utilizado para comparação das combinações dos fatores (ano x posição) com as testemunhas, Cerrado e pastagem, e entre elas. Todos os testes estatísticos foram realizados a 5% de probabilidade e a análise dos dados foi conduzida com o auxílio do *software R* (R CORE TEAM, 2019) versão 3.6.2.

3.3 Resultados e Discussão

Independente da profundidade do solo estudada, a interação Testemunhas (Test) x Eucaliptos (EUCP), para o Teor de Umidade (TU), a Resistência do Solo à Penetração (RP) e o Estoque de carbono (EstC) apresentaram diferenças significativas de acordo com o cultivo realizado. Apenas para o EstC não houve diferenças significativas entre Cerrado e pastagem (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo da Análise de variância para as variáveis teor de umidade (TU), resistência do solo à penetração (RP) e estoque de carbono (EstC), analisados nas testemunhas (Cerrado e pastagem) e eucaliptos (3, 5, 7, 10 e 14 anos de cultivo nas linhas e entrelinhas (posição), nas profundidades do solo (0,0 – 0,10; 0,10 – 0,30; 0,30 – 0,60; 0,60 – 1,00 m).

FV	GL	QM		
		TU	RP	EstC
Conglomerados	15	199,5989 **	54,0429 ns	130,0398 ns
Testemunhas (Test)	1	116,9497 **	21,1032 **	28,2666 ns
Testemunhas x Eucaliptos	1	1863,6737 **	68,3722 **	955,9918 **
Eucaliptos = Fatorial	9	36,9107 **	44,1789 **	60,6047 **
Anos (Acult)	4	74,1958 **	64,3408 **	133,6610 **
Posição (Pos)	1	16,0483 ns	109,0123 **	0,0003 ns
Acult*Pos	4	4,8413 ns	7,8086 **	2,6996 ns
Profundidade (Prof)	3	68,5767 **	57,5441 **	1957,6092 **
Prof x Test	33	1,6647 **	2,6101 **	14,6960 **
Prof x Acult	12	1,2370 ns	3,8376 **	9,7403 **
Prof x Pos	3	1,0354 ns	5,0447 **	0,9691 ns
Prof x Acult x Pos	12	1,7791 **	1,1975 **	8,2543 **
Média		4,19	2,32	6,60
CV parcela		54,44	53,26	43,91
CV subparcela		20,01	44,36	21,91

Nota: **, * e ns, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. GL – Graus de Liberdade. QM – Quadrados Médio.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O Cerrado é um ambiente onde a vegetação se encontra em equilíbrio (COSTA, 2020; COSTA *et al.*, 2018) e a pastagem, embora degradada, está ocupada por uma gramínea, (*Paspalum notatum*) grama batatais, com sistema radicular fasciculado que passa por frequente renovação, o que contribui para deixar no solo resíduo orgânico (NADAL-ROMERO *et al.*, 2016; NELSON *et al.*, 2017; RAMALHO *et al.*, 2019; SANTOS, 2021), justificando o comportamento similar entre as testemunhas para o EstC.

Independente da camada de solo (profundidade), na área de cultivo de eucalipto, TU e EstC tiveram influência apenas dos anos de cultivo (Acult), enquanto para RP pode-se verificar efeito dos Acult, da posição de coleta (Pos) e da interação dessas fontes de variação (Acult x Pos) (Tabela 1).

Os O TU e o EstC são influenciados pelos teores de matéria orgânica presente nos solos (SOUZA, 2018; REGO, 2021; SILVA *et al.*, 2019), ondesendo que maiores teores de matéria orgânica podem influenciar positivamente o EstC, como relatado por Tavanti *et al.* (2020) em trabalho com compartimentos de carbono orgânico em área de Cerrado. De acordo com os autores, o mesmo comportamento explica as variações nos TU, isto é, com maiores

teores de matéria orgânica no solo, ocorre maior umidade, e em solos arenosos estes efeitos podem ser mais explícitos do que em solos argilosos (CRUZ, 2021; MARTELOCIO, 2019).

Em todas as variáveis avaliadas foi constatado efeito da profundidade (Prof) para as testemunhas e para as combinações dos fatores Acult x Pos, Prof x Test e Prof x Acult x Pos, respectivamente. Comportamento aceito, uma vez que os teores de matéria orgânica diminuem em profundidade e com isto reduz também o EstC.

Para Umidade (U) o TU no comportamento entre os tratamentos testemunhas (Cerradocerrado e pastagem) e os eucaliptos foi distinto nas profundidades do solo avaliadas, conforme verificado em Prof x Test e Prof x Acult x Pos (Tabela 1). Verifica-se comportamento crescente nos tratamentos avaliados (pastagem e eucaliptos) à medida que a profundidade aumenta (Tabela 2), apenas no Cerrado não foi encontrada diferença entre as profundidades.

Segundo Valente *et al.* (2019), a RP é mais influenciada pela variação nos teores de umidade do solo e justificam, pois, os teores de umidade estão diretamente relacionados à capacidade do solo para suportar e permitir o trabalho do maquinário agrícola e, ou, o pisoteio animal o que corrobora na situação encontrada no estudo.

O comportamento crescente do TU também foi verificado no eucalipto ao longo dos anos, independentemente da posição (linha ou entrelinha) amostrada, com exceção do ano 10, ano de rebrota da cultura, embora a profundidade 0,60 a 1,00 m, na linha, não tenha sido afetada (Tabela 2).

Os valores da umidade do solo, no sistema silvopastoril e no eucalipto não apresentaram diferenças entre si, mas ao comparar com o solo da mata nativa (Cerrado) o eucalipto apresentou os menores valores, esse comportamento foi observado no trabalho de Silva (2021). Embora crescente, para TU ao longo da profundidade, o eucalipto proporcionou valores menores que o cerrado (Tabela 2), um fator que pode ter influenciado os menores valores da umidade do solo para a área de eucalipto, são os sistemas radiculares característicos da planta, onde a mudança na dinâmica das raízes finas pelas raízes de sustentação, ocasiona maior taxa de renovação das raízes finas, influenciando diretamente na maior necessidade de absorção de água do solo (AGUIAR JUNIOR *et al.*, 2021).

Os TU no Cerrado e na pastagem foram superiores ao eucalipto, pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade em relação ao eucalipto, em todas as combinações dos fatores, exceto para idade de 14 anos pós plantio (7 anos do segundo ciclo) na linha, quando apresentou média semelhante à pastagem. Os TU na pastagem não superaram o cerrado apenas na

profundidade de 0,30 – 0,60 m (Tabela 2) o que pode indicar a estabilização do carbono ao final dos ciclos.

Tabela 2 – Valores médios para teor de umidade (TU) das testemunhas (Cerrado e pastagem) e eucaliptos (aos 3, 5, 7, 10 e 14 anos de cultivo, nas linhas e entre linhas (posição), nas profundidades do solo (0,0 – 0,10; 0,10 – 0,30; 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m).

Profundidades (m)	Posição																	
	**																	
	**																	
	**																	
	**																	
	**																	
	**																	
X ^{ai}																		
Y ^{bi}			**								**							
0,0 – 0,10	3	NS	1,407	±	0,144	a1	b1	c1	#	*	1,522	±	0,170	a1	b1	c1	#	*
	5	NS	2,389	±	0,193	a1a2	b1	c1	#	*	2,895	±	0,179	a2a3	b1	c1	#	*
	7	*	2,695	±	0,070	a2	b1	c1	#	*	3,472	±	0,356	a3a4	b2	c1	#	*
	10	NS	2,054	±	0,117	a1a2	b1	c1	#	*	2,216	±	0,087	a1a2	b1	c1	#	*
	14	**	2,972	±	0,301	a2	b1	c1	#	*	4,082	±	0,333	a4	b2	c1	#	*
	Cerrado		6,469	±	0,484			c1	#									
	Pastagem		8,119	±	0,532			c1										
			**								**							
0,10 – 0,30	3	NS	2,167	±	0,153	a1	b1	c2	#	*	2,826	±	0,377	a1	b1	c2	#	*
	5	NS	3,467	±	0,241	a2a3	b1	c2	#	*	3,165	±	0,184	a1	b1	c1	#	*
	7	NS	4,011	±	0,202	a2a3	b1	c2	#	*	4,191	±	0,227	a2	b1	c1c2	#	*
	10	NS	3,026	±	0,127	a1a2	b1	c2	#	*	3,032	±	0,127	a1	b1	c2	#	*
	14	NS	4,167	±	0,489	a3	b1	c2	#	*	4,636	±	0,421	a2	b1	c1c2	#	*
	Cerrado		6,719	±	0,575			c1	#									
	Pastagem		8,784	±	0,629			c1c2										
			**								**							
0,30 – 0,60	3	**	2,603	±	0,233	a1a2	b1	c2c3	#	*	3,561	±	0,309	a1a2	b2	c2	#	*
	5	NS	3,947	±	0,227	a2a3	b1	c2c3	#	*	3,529	±	0,196	a1	b1	c1c2	#	*
	7	NS	4,186	±	0,197	a2a3	b1	c2c3	#	*	4,523	±	0,206	a2a3	b1	c2	#	*
	10	NS	3,553	±	0,218	a1a2	b1	c2	#	*	3,525	±	0,224	a1	b1	c2c3	#	*
	14	*	4,545	±	0,553	a3	b1	c2	#	*	5,410	±	0,534	a3	b2	c3	#	ns
	Cerrado		7,002	±	0,567			c1	ns									
	Pastagem		8,750	±	0,594			c1c2										
			**								**							
0,60 – 1,00	3	NS	2,445	±	0,082	a1a2	b1	c3	#	*	2,970	±	0,448	a1	b1	c2	#	*
	5	NS	4,583	±	0,230	a3	b1	c3	#	*	4,141	±	0,157	a2a3	b1	c2	#	*
	7	*	4,906	±	0,081	a3	b2	c3	#	*	4,065	±	0,230	a2a3	b1	c1c2	#	*
	10	*	3,473	±	0,173	a2	b1	c2	#	*	4,287	±	0,336	a2a3	b2	c3	#	*
	14	*	4,249	±	0,449	a2a3	b1	c2	#	*	5,131	±	0,410	a3	b2	c2c3	#	*
	Cerrado		6,708	±	0,623			c1	#									
	Pastagem		8,893	±	0,744			c2										

Nota: **, * e NS, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F.

X^{ai}, Y^{bi}, Z^{ci} diferenças dos desdobramentos da interação tripla. X diferença entre Acult na mesma Pos na mesma Prof, Y diferença entre Pos para mesmo Acult na mesma Prof e Z diferença entre Prof para o mesmo Acult e mesma Pos. ai, bi e ci com códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%. ai, compara as médias do EstC entre anos de cultivo, na coluna, dentro de cada Prof, e mesma Pos.

bi, compara as médias de TU entre Pos, na linha, para o mesmo ano e a mesma profundidade. ci, compara as médias de TU entre profundidades, na coluna a cada oito linhas, para o mesmo Acult e mesma Pos. #, * e ns, compara as médias de TU entre anos de cultivo e as testemunhas. #, * significativo a 5% pelo teste de Dunnett para pastagem e Cerrado respectivamente, e, “ns” não-significativo a 5% pelo teste de Dunnett.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os teores de umidade não variaram significativamente nas posições linha e entrelinhas no eucalipto na maioria das combinações ano x profundidade. No entanto, algumas médias foram superiores, o que ocorreu nas amostras coletadas na linha na profundidade de 0,0 a 0,10 m nos eucaliptos de 7 e 10 anos, na profundidade de 0,30 – 0,60 m aos 3 e 14 anos de cultivo, na profundidade de 0,60 – 1,00 m nos anos 0,10 e 0,14, e situação contrária, com maiores médias nas entrelinhas, na profundidade de 0,60 – 1,00 m no ano 7 do eucalipto (Tabela 2).

O comportamento da RP nos tratamentos pastagem e eucalipto foi distinto para as profundidades avaliadas (Tabela 1), não tendo variado em profundidade apenas no Cerrado (Tabela 3). A RP foi crescente para pastagem e eucalipto, com exceção para o eucalipto de 7 e 14 anos, na linha, onde a RP ficou entorno de 2 e 3 MPa.

No trabalho, realizado por Freitas *et al.* (2012), ao estudarem diferentes formas de manejo: floresta nativa, agroflorestal, pastagem e outra área recentemente convertida para uso agrícola, foram observados valores de RP superiores a 4 MPa em áreas de pastagem. Quando comparado às áreas com sistemas agroflorestais, os valores foram menores que 1 MPa; enquanto em uma área de mata nativa cortada, os valores ficaram entre 2 e 3 MPa na camada superficial (0,0 a 0,20 m), valores semelhantes ao encontrados na linha do eucalipto nos anos de 7 e 14 desse estudo.

Independente da profundidade e da posição, no eucalipto ao longo dos anos, a menor média para RP foi obtida aos 5 anos, apresentando diferença significativa entre os demais, com exceção da composição profundidade 0,0 – 0,10 m na Linha, em que os valores não diferiram estatisticamente (Tabela 3).

No estudo de Serpa *et al.* (2020), mesmo não havendo diferenças entre as profundidades para RP, os menores valores ocorreram na camada 0 – 0,10 m. Esse resultado foi justificado pelo preparo do solo na área e o tipo de sistema radicular das culturas avaliadas, Cerrado Nativo, Cerrado em Regeneração, eucalipto e Cana-de-açúcar. O preparo convencional mantém a baixa densidade do solo e aumento da porosidade total, principalmente na camada superficial, favorecendo a desagregação da estrutura física do solo e a menor RP (MARASCA *et al.*, 2015).

Para a RP, o eucalipto ao longo dos 5 anos não apresentou diferenças das testemunhas (Cerrado e pastagem) pelo teste de Dunnett a 5%, em todas as combinações dos fatores, com

exceção da amostra retirada na linha nas profundidades 0,10 a 0,30 e 0,60 a 1,00 m, nestas as médias foram inferiores à pastagem. No ano 14 e na linha de plantio, todas as médias foram semelhantes à pastagem, independente da profundidade. A pastagem foi superior ao Cerrado, com maior resistência, apenas na profundidade de 0,10 a 0,30 m (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores médios para variável Resistência à penetração (RP) das testemunhas (Cerrado e pastagem) e eucaliptos (aos 3, 5, 7, 10 e 14 anos de cultivo, nas linhas e entrelinhas (posição), nas profundidades do solo (0,0 – 0,10; 0,10 – 0,30; 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m).

Profundidade (m)	Posição																	
	Ano		Entrelinha		Z ^{ci}		X ^{ai}								Z ^{ci}		NS	
							Linha											
	Y ^{bi}		**		**								**		**			
					**													
	**		**		**								**		**			
					**													
	**		**		**								**		**			
**																		
X ^{ai}																		
Y ^{bi}																		
**																		
NS																		
0,0 – 0,10	3	NS	1,904	±	0,288	a1a2	b1	c1	ns	*	1,312	±	0,189	a1	b1	c1	ns	ns
	5	NS	0,974	±	0,166	a1	b1	c1	ns	ns	0,689	±	0,160	a1	b1	c1	ns	ns
	7	NS	2,127	±	0,275	a2	b1	c1	ns	*	1,600	±	0,406	a1	b1	c1	ns	ns
	10	NS	1,023	±	0,200	a1	b1	c1	ns	ns	1,246	±	0,194	a1	b1	c1	ns	ns
	14	*	2,409	±	0,353	a2	b2	c1	ns	*	1,493	±	0,354	a1	b1	c1	ns	ns
	Cerrado		0,817	±	0,116			c1	ns									
	Pastagem		1,532	±	0,116			c1										
**																		
**																		
0,10 – 0,30	3	**	3,751	±	0,369	a2	b2	c1c2	#	*	2,1424	±	0,346	a2a3	b1	c2	ns	*
	5	NS	1,458	±	0,099	a1	b1	c2	ns	ns	1,0761	±	0,156	a1	b1	c1	#	ns
	7	*	3,924	±	0,316	a2	b2	c2	#	*	2,9369	±	0,300	a3	b1	c1c2	ns	*
	10	**	3,255	±	0,285	a2	b2	c2	#	*	1,7965	±	0,275	a1a2	b1	c2	ns	ns
	14	**	4,016	±	0,495	a2	b2	c2	#	*	2,0233	±	0,308	a1a2a3	b1	c1c2	ns	*
	Cerrado		1,011	±	0,099			c1	#									
	Pastagem		2,040	±	0,185			c1c2										
**																		
**																		
0,30 – 0,60	3	NS	3,541	±	0,216	a2	b1	c2	#	*	3,448	±	0,371	a3	b1	c2	#	*
	5	NS	1,154	±	0,056	a1	b1	c2c3	ns	ns	1,160	±	0,041	a1	b1	c1c2	ns	ns
	7	*	3,479	±	0,325	a2	b2	c2c3	#	*	2,544	±	0,292	a2a3	b1	c2	#	*
	10	**	4,009	±	0,333	a2	b2	c2	#	*	2,926	±	0,324	a2a3	b1	c2c3	#	*
	14	**	4,086	±	0,275	a2	b2	c2	#	*	2,177	±	0,221	a1a2	b1	c3	ns	*
	Cerrado		1,496	±	0,175			c1	ns									
	Pastagem		2,244	±	0,188			c1c2										
**																		
**																		
0,60 – 1,00	3	NS	2,999	±	0,245	a2	b1	c2	#	*	2,301	±	0,230	a2	b1	c2	ns	*
	5	NS	1,154	±	0,066	a1	b1	c3	ns	ns	1,004	±	0,114	a1a2	b1	c2	#	ns
	7	*	3,177	±	0,254	a2	b2	c3	#	*	2,360	±	0,297	a2	b1	c1c2	ns	*
	10	**	2,763	±	0,214	a2	b2	c2	ns	*	1,989	±	0,194	a1a2	b1	c3	ns	*
	14	**	3,504	±	0,295	a2	b2	c2	#	*	1,975	±	0,281	a1a2	b1	c2c3	ns	*
	Cerrado		1,140	±	0,095			c1	ns									

Pastagem 1,896 ± 0,097 c2

Nota: **, * e ^{NS}, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F.

X^{ai}, Y^{bi}, Z^{ci} diferenças dos desdobramentos da interação tripla. X diferença entre Acult na mesma Pos na mesma Prof, Y diferença entre Pos para mesmo Acult na mesma Prof e Z diferença entre Prof para o mesmo Acult e mesma Pos. ai, bi e ci com códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%. ai, compara as médias de RP entre anos de cultivo, na coluna, dentro de cada Prof, e mesma Pos. bi, compara as médias de RP entre Pos, na linha, para o mesmo ano e a mesma profundidade. ci, compara as médias de RP entre profundidades, na coluna a cada oito linhas, para o mesmo Acult e mesma Pos.

#, * e ns, compara as médias de RP entre anos de cultivo e as testemunhas. #, * significativo a 5% pelo teste de Dunnett para pastagem e Cerrado respectivamente, e, “ns” não-significativo a 5% pelo teste de Dunnett.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na profundidade de 0,0 – 0,10 m, todos os eucaliptos foram semelhantes à pastagem pelo teste de Dunnett a 5% (Tabela 3) quanto a RP. Para Cerrado foram verificadas médias superiores e distintas para os anos 3, 7 e 14 na entrelinha. Nas demais profundidades, o eucalipto aos 3, 7, 10 e 14 anos, amostrados na entrelinha, apresentaram médias superiores e distintas das Testemunhas, com exceção do eucalipto aos 10 anos na profundidade 0,60 a 1,00 m que não diferiu da pastagem, independentemente da posição, apesar de apresentar maior e menor valor do que a média para pastagem na linha e entrelinha, respectivamente (Tabela 3).

Na linha, o comportamento do eucalipto em relação às testemunhas foi distinto quanto a RP. Houve diferença significativa da pastagem pelo teste de Dunnett a 5%, sendo que foram constatadas médias menores para o eucalipto de 5 anos nas profundidades 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m e médias maiores no eucalipto aos 7 e 10 anos, na profundidade 0,30 a 0,60 m, e nos demais tratamentos não houve diferenças significativas em relação à pastagem (Tabela 3). Em relação ao Cerrado, o eucalipto aos 3, 7, 10 e 14 anos foram significativos e superiores para RP, com exceção do eucalipto aos 10 anos na profundidade de 0,10 a 0,30 m que assim como os demais (mencionados anteriormente) não apresentou diferenças em relação ao Cerrado.

Para o EstC, os tratamentos pastagem e eucaliptos apresentaram comportamento crescente e distinto a partir das profundidades, onde nos tratamentos eucalipto aos 7 anos na linha e eucalipto aos 14 anos na entrelinha, o comportamento foi crescente e distinto da profundidade de 0,0 a 0,10 m, até a profundidade de 0,30 a 0,60 m, mas não apresentou diferenças entre a profundidade de 0,30 a 0,60 m e de 0,60 a 1,00 m (Tabela 4).

Coser *et al.* (2018), avaliando a transição de uma pastagem degradada para um sistema de agrofloresta com *Panicum maximum* e *Gliricidia sepium* no Distrito Federal - BR, verificaram para o sistema agroflorestal, o aumento do estoque de C na camada superficial de 5,26 a 6,65 Mg ha⁻¹ no decorrer de 4 anos do sistema, além de proporcionar a qualidade da matéria orgânica do solo, confirmando seu potencial para ser usado como prática agrícola em termos de melhoria do solo e sequestro de C de curto prazo. O que se assemelha ao comportamento deste estudo, que foi verificado crescimento de EstC na profundidade 0,0 de

0,10 m no sétimo ano dos dois ciclos do eucalipto devido a incorporação da matéria orgânica no período e a pouca movimentação de maquinário no interior dos talhões.

A maior média do eucalipto ao longo dos anos para o EstC, independente das profundidades e das posições, foi obtida aos 14 anos, com exceção da profundidade 0,60 – 1,00 m na entrelinha, apresentando diferença significativa entre os demais (Tabela 2) isso se deve ao acúmulo de resíduos, raízes na linha e depois entrelinhas com a inversão de entrelinha para linha no 2º ciclo.

Na profundidade de 0,0 – 0,10 m, as médias para EstC aos 3 e 10 anos na entrelinha e 3, 5 e 10 na linha do eucalipto, diferiram estatisticamente das médias da pastagem (sendo observado valores menores de EstC no eucalipto) pelo teste de Dunnet a 5% (Tabela 2). O eucalipto com 10 anos na Entrelinha e 3 anos na Linha apresentaram médias inferiores e distintas do Cerrado na mesma profundidade, para os demais não houve diferenças entre as testemunhas.

Na profundidade de 0,10 a 0,30 m para EstC (Tabela 4), o eucalipto aos 14 anos na Entrelinha e aos 7 anos na Linha não diferem da pastagem, e o eucalipto aos 5, 7 e 14 anos na Entrelinha e aos 7 e 14 anos na Linha não diferem do Cerrado.

No trabalho de Pegoraro *et al.* (2011) foi avaliado taxa de ciclagem de C nas linhas e entrelinhas no cultivo de eucalipto e foi verificado aumento na entrelinha, em comparação ao solo da linha de cultivo, e concomitantemente, houve o incremento do estoque de C orgânico na camada superficial (0-0,20 m), mesmo ao serem consideradas as perdas de carbono pela substituição de cultivos (pastagem por eucalipto). Após 28 anos de cultivo, verificaram-se estoques médios de 11,0 e 5,5 Mg ha⁻¹ de carbono derivado, respectivamente, de eucalipto na entrelinha e linha, correspondendo à taxa média de acúmulo de C orgânico no solo de 0,39 e 0,20 Mg ha⁻¹ano⁻¹, características próximas ao obtido neste trabalho na profundidade de 0,0 – 0,10 m e de 0,10 – 0,30 m, nos anos 7 e 14, ou seja, final do primeiro e segundo ciclos da cultura que é justificado pela maior deposição de resíduos da colheita.

No estudo de Voigtlaender *et al.* (2012), em plantios de seis anos de eucalipto, foi verificado para o EstC, nas camadas de 0,0 – 0,15 m de profundidade, valores de 2,13 Mg ha⁻¹ no monocultivo de acácia, 2,28 Mg ha⁻¹ no plantio misto *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* e 2,19 Mg ha⁻¹ no monocultivo de eucalipto, valores não distantes aos constatados na Tabela 4, em um período de anos similar.

Na profundidade de 0,30 – 0,60 m para EstC (Tabela 4), os tratamentos eucalipto diferiram das testemunhas (Cerrado e pastagem) pelo teste de Dunnett a 5%, independentemente da posição de coleta do solo, com exceção do eucalipto aos 3 anos na

Linha. As médias de Cerrado e pastagem foram distintas apenas nas profundidades de 0,30 – 0,60 m e 0,60 – 1,00 m. Na profundidade de 0,60 – 1,00 m, os tratamentos eucalipto aos 3, 5 e 10 anos na Entrelinha e eucalipto aos 3, 5 e 7 anos não diferem da pastagem, enquanto para Cerrado, apenas o eucalipto aos 3 anos na entrelinha não apresentou diferenças significativas pelo teste de Dunnett a 5% (Tabela 4) para EstC.

Tabela 4 – Valores médios de Estoque (EstC) para das testemunhas (Cerrado e pastagem) e eucaliptos (aos 3, 5, 7, 10 e 14 anos de cultivo, nas linhas e entrelinhas (posição), nas profundidades do solo (0,0 – 0,10; 0,10 – 0,30; 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m).

Profundidade (m)	Posição																	
	Ano	Entrelinha	Z ^{ci}	X ^{ai}														
				Linha							Z ^{ci}							
Y ^{bi}																		
0,0 – 0,10	3	NS	2,256 ± 0,095	a1	b1	c1	#	ns	2,066 ± 0,132	a1	b1	c1	#	*				
	5	NS	2,712 ± 0,205	a1a2	b1	c1	ns	ns	2,383 ± 0,083	a2a3	b1	c1	#	ns				
	7	*	2,979 ± 0,107	a2	b1	c1	ns	ns	2,792 ± 0,066	a3a4	b2	c1	ns	ns				
	10	NS	1,941 ± 0,075	a1a2	b1	c1	#	*	2,252 ± 0,031	a1a2	b1	c1	#	ns				
	14	**	3,636 ± 0,288	a2	b1	c1	ns	ns	3,428 ± 0,227	a4	b2	c1	ns	ns				
	Cerrado		3,696 ± 0,238			c1	ns											
	Pastagem		4,149 ± 0,351			c1												
0,10 – 0,30	3	NS	3,849 ± 0,160	a1	b1	c2	#	*	3,750 ± 0,347	a1	b1	c2	#	*				
	5	NS	4,867 ± 0,373	a2a3	b1	c2	#	ns	4,606 ± 0,252	a1	b1	c2	#	*				
	7	NS	6,025 ± 0,207	a2a3	b1	c2	#	ns	6,454 ± 0,221	a2	b1	c2	ns	ns				
	10	NS	4,256 ± 0,095	a1a2	b1	c2	#	*	4,350 ± 0,106	a1	b1	c2	#	*				
	14	NS	6,523 ± 0,583	a3	b1	c2	ns	ns	5,637 ± 0,459	a2	b1	c2	#	ns				
	Cerrado		6,439 ± 0,482			c2	ns											
	Pastagem		7,948 ± 0,644			c2												
0,30 – 0,60	3	**	5,738 ± 0,368	a1a2	b1	c3	#	*	5,588 ± 0,255	a1a2	b2	c3	ns	*				
	5	NS	6,385 ± 0,353	a2a3		c3	#	*	6,426 ± 0,383	a1	b1	c3	#	*				
	7	NS	8,061 ± 0,282	a2a3		c3	#	*	9,000 ± 0,312	a2a3	b1	c3	#	*				
	10	NS	6,250 ± 0,087	a1a2	b1	c3	#	*	7,099 ± 0,134	a1	b1	c3	#	*				
	14	*	9,996 ± 0,893	a3		c3	#	*	9,107 ± 0,720	a3	b2	c3	#	*				
	Cerrado		9,888 ± 0,624			c3	#											
	Pastagem		10,961 ± 0,875			c3												
0,60 – 1,00	3	NS	7,663 ± 0,592	a1a2	b1	c4	ns	ns	9,158 ± 0,392	a1	b1	c4	ns	*				
	5	NS	8,426 ± 0,408	a2	b1	c4	ns	*	8,195 ± 0,281	a2a3	b1	c4	ns	*				
	7	*	11,538 ± 0,792	a3	b2	c4	#	*	9,153 ± 0,849	a2a3	b1	c3	ns	*				
	10	*	9,368 ± 0,825	a2	b1	c4	ns	*	9,533 ± 0,719	a2a3	b2	c4	#	*				
	14	*	9,531 ± 0,817	a2a3	b1	c3	#	*	11,048 ± 0,969	a3	b2	c4	#	*				
	Cerrado		14,473 ± 0,602			c4	#											
	Pastagem		15,197 ± 1,379			c4												

Nota: **, * e NS, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F.

X^{ai} , Y^{bi} , Z^{ci} diferenças dos desdobramentos da interação tripla. X diferença entre Acult na mesma Pos na mesma Prof, Y a diferença entre Pos para o mesmo Acult na mesma Prof e Z diferença entre Prof para o mesmo Acult e mesma Pos.

ai, bi e ci com códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%.

ai, compara as médias do EstC entre anos de cultivo, na coluna, dentro de cada Prof, e mesma Pos. bi, compara as médias de EstC entre Pos, na linha, para o mesmo ano e a mesma profundidade. ci, compara as médias do EstC entre profundidades, na coluna a cada oito linhas, para o mesmo Acult e mesma Pos.

#, * e ns, compara as médias do EstC entre anos de cultivo e as testemunhas. #, * significativo a 5% pelo teste de Dunnett para pastagem e Cerrado respectivamente, e, “ns” não-significativo a 5% pelo teste de Dunnett.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.4 Conclusões

O cultivo de eucalipto apresentou-se com os maiores ganhos no EstC até 0,30 m de profundidade, em comparação ao Cerrado Nativo. Entretanto, esse ganho de carbono pode indicar uma melhoria no EstC de curto prazo e em camadas superficiais do solo, não migrando para camadas inferiores, como verificado no Cerrado Nativo.

A conversão do Cerrado natural em cultivo de eucalipto não alterou os EstC do solo, mantendo os índices semelhantes em ambos os usos principalmente ao final do ciclo do eucalipto (aos 7 e 14 anos).

Com base nos EstC, conclui-se que o cultivo de eucalipto é sustentável em solos arenosos do cerrado, uma vez que não reduziu a quantidade de carbono orgânico no solo, e quando se compara com a pastagem degradada nas profundidades 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR JUNIOR, A. L. *et al.* Ideótipo arbóreo para Sistemas Agroflorestais. **Advances in Forestry Science**, Sinop, v.8, n.1, p.1349-1362, 2021.
- ALMEIDA JÚNIOR, E. B., CHAVES, L. J., SOARES, T. N. Caracterização genética de uma coleção de germoplasma de cagaiteira, uma espécie nativa do cerrado. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 3, p. 246-252, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0075>.
- ALVAREZ, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711- 728, 2013. Doi. Org/10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. Determination of organic matter content in arid-zone soils using a simple "loss-on-ignition" method. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 20, p. 1675-1695, 1989.
- BRITO, M. R. *et al.* Estoque de carbono no solo sob diferentes condições de cerrado. **Desafios**, Palmas, v. 5, n. esp., p. 114-124, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20873/uft.2359-3652.2018vol5nEspecialp114>. 2018.
- CARVALHO, W. T. V. *et al.* Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **Pubvet**, Maringá, v. 11, p. 947-1073, 2017.
- CONCEIÇÃO, G. M. **Caracterização botânica e fitossociologia de uma área de Cerrado, no Maranhão, sob pastejo por bovinos** (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal. 2012.
- COSER, T. R. *et al.* Shortterm buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 166, p. 1-12, 2018.
- COSTA, A. H. D. **Um olhar geográfico sobre o Cerrado e os perigos de sua degradação**. 2020. 44 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC Goiás, Goiânia, 2020.
- COSTA, T. G. A. *et al.* Atributos de qualidade do solo sob fitofisionomias de cerrado sensu stricto e cerradão no Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 5, n. 10, p. 625-642, 2018.
- CRUZ, J. D. N. **Avaliação da compactação do solo e resistência à penetração em diferentes usos dos solos na região Oeste da Bahia**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Graduação - Engenharia Agrônoma) - Universidade do Estado da Bahia, Salvador, 2021.
- DE SOUZA ALMEIDA, L. L. **Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no norte de Minas Gerais**. 2018. Dissertação (Mestrado em) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

DURIGAN, G. **Bases e diretrizes para a restauração da vegetação de cerrado.** In: KAGEYAMA, D.Y. *et al* (ed.) **Restauração ecológica de ecossistemas naturais.** Botucatu: FEPAG, 2003.

DURIGAN, G. *et al.* **Manual para recuperação da vegetação de cerrado.** 3. ed. São Paulo: SMA, 2011.

FIBRACON Consultoria Perícias e Projetos Ambientais. Encarte II. **Revisão do Plano de Manejo do Monumento Natural da Serra do Bom Jardim, Alcínópolis, MS.** 2017. p. 186.

FREITAS, I. C. D. *et al.* Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v. 6, n. 12, p. 1275-1281, 2012.

GRIEBELER, G. *et al.* Avaliação de um programa interlaboratorial de controle de qualidade de resultados de análise de solo. **Revista Ceres,** Viçosa, MG, v. 63, n. 3, p. 371-379, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS.** Sistema IBGE de Recuperação Automática de dados –SIDRA. Brasília, DF: IBGE-PEVS, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/tabelas/brasil/2020>. Acesso em: 27 jul. 2022.

IVO, W.; SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, P. Estoques de carbono do solo em razão da conversão de cana-de-açúcar em pastagem e eucalipto. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA - CONTECC'2018, 2018, [s. l.]. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2018. p. 1-5.

KRAMER, L. F. M. **Atributos químicos e físicos de um Latossolo sob plantio direto em zonas de manejo com diferentes produtividades.** 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2012.

KOCH, A.B. *et al.* Soil security: solving the global soil crisis Glob. **Global Policy,** Chichester, v. 4, n. 4, p. 434-441, 2013.

KRYCKI, K. C. **Análises reprodutivas e avaliações agronômicas de híbridos intraespecíficos de *paspalum notatum*.** 2019. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do sul – UFRGS, Porto Alegre, 2019.

LIMA, R. P.; DE LEÓN, M. J.; DA SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres,** Viçosa, MG, v. 60, n.1, p. 016-020, jan/fev, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2013000100003>.

MARASCA, I. *et al.* Soil compaction curve of an Oxisol under sugarcane planted after in-row deep tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, MG, v. 39, n. 5, p. 1490-1497, 2015.

MARTELÓCIO JUNIOR, W. **Densidade do solo e teor de matéria orgânica em solo sob uso em sistema agrícola convencional e vegetação nativa no noroeste do Paraná.** 2019. 17 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Unicesumar, Maringá, 2019.

MENDES, M. R. A. *et al.* Vegetation and soil relationship in moist grassland in the National Park of Sete Cidades, Piauí, Brazil. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 4, p. 971-984, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S2175-78602012000400014>.

MIRANDA, F. S. de M.; AVELAR, A. de S.; KAH, M. Dissolved organic carbon from the forest floor with different decomposition rates in a rainforest in south-eastern Brazil. **Soil Research**, Rome, v. 60, n. 1, p. 50-64, 2021.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 584–590, 2012.

MONCADA, M. P. *et al.* Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 20–28, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.009>.

NADAL-ROMERO, E. *et al.* Science of the Total Environment How do soil organic carbon stocks change after cropland abandonment in Mediterranean humid mountain areas. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 566–567, p. 741–752, 2016.

NELSON, L. *et al.* Soil Biology & Biochemistry Digging into the roots of belowground carbon cycling following seven years of Prairie Heating and CO₂ Enrichment (PHACE), Wyoming USA. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 115, p. 169–177, 2017.

PEGORARO, R. F. *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em Argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, p. 261-273, 2011.

PETEAN, L. P. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico sob integração lavoura-pecuária**. 2011. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá, 2011.

RAIJ, B. VAN *et al.* (ed.). **Análise química para a avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RALISCH, R. *et al.* Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Viçosa, MG, v. 12, n. 4, p. 381–384, 2008.

RAMALHO, I. O. *et al.* Deposition and decomposition of litter in periods of grazing and rest of a tropical pasture under rotational grazing. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 12, p. 1–8, 2019.

REBELO, A. G. de M. **Variação espacial das concentrações de metais-traço no solo e liteira de uma área de floresta natural**. 2019. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, 2019.

REGO, C. A. R. D. M. **Alterações nos atributos edáficos, nos estoques de carbono e nitrogênio e nas frações da matéria orgânica após substituição da vegetação natural por**

pastagens na Amazônia maranhense. 2021. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2021.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-343, 2005.

SALTON, J. C. *et al.* **Sistema São Mateus:** Sistema de Integração Lavoura-Pecuária para a região do Bolsão Sul-Mato Grossense Dourados-MS. Dourados: [s. n.], 2013. (COMUNICADO TECNICO, 186)

SANTOS, P. C. da S. **Decomposição da biomassa de raízes em pastos de capim Mulato II em resposta ao método de pastejo.** 2021. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

SERPA, K. M. *et al.* Atributos físicos e teor de matéria orgânica em área de Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 9, n. 3, p. e131932399-e131932399, 2020.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA, B. D. O. **Emissão de CO₂, estoque e humificação do carbono do solo em áreas convertidas do Bioma Cerrado.** Brasil Central, 2021.

SILVA, F. W. A. *et al.* Matéria orgânica e suas inter-relações com os atributos físicos do solo. **Habitats Urbanos e Rurais**, 255, 2019.

TAVANTI, R. F. R. *et al.* Qual é o impacto da reforma de pastagens nos compartimentos de carbono orgânico e nas emissões de CO₂ no Cerrado brasileiro? **Catena**, Amsterdam, v. 194, p. 104702. 2020.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VALENTE, G. F. *et al.* Resistência mecânica à penetração em sistemas de manejo do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 140-145, 2019.

VECHI, A.; JÚNIOR, C. A. D. O. M. Aspectos positivos e negativos da cultura do eucalipto e os efeitos ambientais do seu cultivo. **Revista Valore**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 495-507, 2018.

VELDKAMP E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 175-180, 1994.

VOIGTLAENDER, M. *et al.* Introducing Acacia mangium trees in Eucalyptus grandis plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 111, p. 352-99, 2012.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Philadelphia, v. 37, n. 2, p. 29-38, 1934.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, n. 13, p. 1467. 1988

4 **CAPÍTULO 3: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM SOLOS DO CERRADO**

Resumo – A resistência do solo à penetração (RP) é um importante atributo do solo a ser analisado quanto da avaliação de sua qualidade física. Considerando a possibilidade do uso de distintos equipamentos, objetivou-se neste trabalho avaliar a medição da resistência do solo à penetração (RP) por três metodologias, utilizando dois equipamentos, penetrógrafo e penetrômetro de bancada, sendo este último em duas alturas de colunas d'água, de acordo com a sugestão do manual (100 cm.c.a.) ou utilizando 60 cm.c.a. O trabalho foi realizado com dados coletados em 7 áreas, 5 destas com plantio de eucalipto em diferentes estádios (aos 3, 5 e 7 anos em primeiro ciclo e 3 e 7 anos em segundo ciclo de plantio) com coleta realizada nas linhas e entrelinhas de plantas, uma área com pastagem degradada e outra em Cerrado nativo. As amostras indeformadas de solo foram coletadas com anéis volumétricos, nas profundidades de 0 – 0,10; 0,10 – 0,30; 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m, com 4 repetições em cada área amostral. Todas as áreas estão localizadas no sudeste do estado do Mato Grosso do Sul, em solos de textura arenosa. O penetrômetro estático de bancada (PEB) e o penetrógrafo manual de molas (SC-60) foram utilizados para determinação da resistência do solo à penetração (RP) seguindo as indicações do manual com extração em mesa de tensão a 100 cm.c.a (c.a.= coluna d'água) e com uso da mesa a 60 cm.c.a. Os valores de RP ficaram acima de 1,9 MPa com o uso do SC-60 no eucalipto e na pastagem. Foram obtidos valores de RP superiores para Pastagem nas profundidades de 0,10 – 0,30 m (1,50 MPa), no SC60 em cultivo de Eucalipto e Pastagem (1,90 Mpa) e SC60 a partir da profundidade de 0,10 – 0,30 m de 1,75 a 2,07 Mpa, valores considerados impeditivos ao desenvolvimento radicular. O SC60 apresentou os maiores valores de RP (1,16 a 2,07 MPa) independente do Cultivo e profundidade do solo. No conjunto dos dados obtidos nesse trabalho não foram encontradas variações significativas na RP em relação às colunas d'água utilizadas (0,6 e 1,0 m) indicando que, para amostras de Latossolos oriundas do cerrado Sul Mato-Grossense, é indiferente usar a mesa de tensão seguindo a sugestão do manual de 100 cm.c.a. ou utilizando 60 cm.c.a.

Palavras-chave: solos arenosos; anel volumétrico; penetrógrafo; penetrômetro.

Comparative analysis between methods for obtaining penetration resistance in Cerrado soils

Abstract – Soil penetration resistance (RP) is an important soil attribute to be analyzed when evaluating its physical quality. Considering the possibility of using different equipment, the objective of this work was to evaluate the measurement of soil penetration resistance (RP) by three methodologies, using two equipment, penetrometer and bench penetrometer, the latter being in two columns of water, of according to the manual's suggestion (100 cm.c.a.) or using 60 cm.c.a. The work was carried out with data collected in 7 areas, 5 of these with eucalyptus plantations at different stages (3, 5 and 7 years in the first cycle and 3 and 7 years in the second planting cycle) with collection carried out in the lines and between the planting lines, one with degraded pasture and another in native Cerrado. The undisturbed samples were collected with rings, at depths of 0 - 0.10, 0.10 - 0.30, 0.30 - 0.60 and 0.60 - 1.00 m, with 4 repetitions in each sample area. All areas are located in the southeast of the state of Mato Grosso do Sul, Brazil, in sandy textured soils. A benchtop static penetrometer (PEB) and a manual spring penetrometer (SC-60) were used to determine the soil penetration resistance (RP) following the instructions in the manual with extraction in a tension table at 100 cm.w.c (w.c. = water column) and using the table at 60 cm.w.c., RP values above 1.9 MPa were found with the use of SC-60 in eucalyptus and pasture. Higher RP values were found for Pasture at depths of 0.10 - 0.30 m (1.50 MPa), in SC60 in Eucalyptus and Pasture cultivation (1.90 MPa) and SC60 from a depth of 0.10 - 0.30 m (1.75 to 2.07 MPa), values considered to impede root development. The SC60 showed the highest values of RP (1.16 to 2.07 MPa) regardless of Cultivation and depth. In the set of data obtained in this work, no significant variations were found in the RP in relation to the water columns used (0.6 and 1.0 m) indicating that, for samples of latosols from the southern cerrado of Mato Grosso, it is indifferent to use the tension table following the manual suggestion of 100 cm.c.a. or using 60 cm.w.c.

Keywords: sandy soils; ring cylinder; penetrometer.

4.1 Introdução

A compactação e o adensamento do solo acarretam uma série de problemas que afetam direta ou indiretamente a produção agrícola ao causarem restrição ao crescimento radicular e redução na condutividade hidráulica do solo (REZENDE, 2015).

A avaliação de atributos físicos, tais como porosidade, densidade do solo, infiltração de água e resistência do solo à penetração torna possível identificar o nível de compactação do solo (MONTANARI *et al.* 2010).

A determinação da resistência à penetração (RP) em campo tem sido efetuada, normalmente, com penetrômetros e penetrógrafos, instrumentos de fácil manuseio e que não requerem muito tempo para a tomada das medições (ANDRADE *et al.* 2013; BAESSO *et al.* 2020; DEXTER, CZYZ, GATE, 2007).

A mensuração da resistência do solo à inserção de um equipamento para medição é, assim como a infiltração da água, um método secundário na avaliação da compactação. Entretanto, o uso deste equipamento é uma maneira rápida e fácil de medir a resistência à penetração ao longo da profundidade do solo.

Os modelos de equipamentos que utilizam de esforço manual, no qual o operador aplica uma força constante, permitem que o aparelho registre o perfil da resistência mecânica à penetração em toda a extensão da profundidade desejada. Neste tipo, chamado penetrógrafo, podem ocorrer erros decorrentes do operador, que podem ser corrigidos pela mecanização da inserção do instrumento no solo por meio da utilização do hidráulico de tratores ou outros meios de controle hidráulico (MORAES *et al.*, 2014).

Existem modelos cuja entrada do cone no solo ocorre em velocidade constante, os quais são conhecidos como penetrômetros estáticos, providos de dispositivo que registra, em papel ou eletronicamente, as informações de profundidade de penetração e respectiva carga (FURRIEL, 2016).

Os penetrômetros estáticos têm ganhado espaço na realização desta medida, particularmente os de bancada, cujo uso tem se ampliado em laboratórios, principalmente quando se busca determinar a resistência à penetração em um intervalo hídrico ótimo a partir de amostras de solo com estrutura indeformada (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Qualquer que seja o tipo de ensaio de resistência à penetração, seus resultados serão influenciados pelas características físicas dos solos. Dentre estas, são de especial interesse à agricultura e pecuária aquelas relacionadas com a densidade e a umidade.

Os solos argilosos são mais suscetíveis à compactação quando comparados aos de textura arenosa, estes por sua vez, no passado eram considerados de pouca relevância para a agricultura, decorrente das suas limitações de manejo, com deficiência em fertilidade, alta susceptibilidade à erosão, maior **possibilidade** de contaminação das águas subterrâneas e deficiência hídrica quando em sequeiro, fato que vem mudando ao longo do tempo, sendo considerados como novas fronteiras agrícolas (CENTENO *et al.*, 2017).

Os dados de resistência à penetração, associados a outras ferramentas tecnológicas e observações de campo, podem contribuir para formação de um cenário realista das condições em que se encontra, momentaneamente, a área onde se pretende implementar planos de produção agropecuária, no que se refere à mobilização do solo, para implantação de culturas e operações com vistas à recuperação física e de fertilidade do solo.

Nesta pesquisa, parte-se do pressuposto que a determinação da resistência do solo à penetração pode ser conduzida em campo ou laboratório, produzindo resultados semelhantes e igualmente considerados no momento de sua utilização, e que cultivos sucessivos de eucalipto podem compactar o solo, gerando densidade elevada como em pastagem degradada, quando comparado ao solo sob vegetação natural. Deste modo, objetivou-se com este trabalho mensurar a resistência do solo à penetração (RP) por três metodologias: utilizando dois equipamentos, penetrógrafo e penetrômetro de bancada, sendo este último em duas colunas d'água, de acordo com a sugestão do manual (100 cm.c.a.) ou utilizando 60 cm.c.a., em solo cultivado com eucalipto em diferentes fases de desenvolvimento da cultura, comparado com uma pastagem degradada e o Cerrado nativo.

4.2 Material e Métodos

A região escolhida para coleta experimental fica no sudeste do Estado do Mato Grosso do Sul, onde o clima, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo Aw, clima tropical com inverno seco. A estação chuvosa (setembro a abril) concentra 90% dos valores pluviométricos, restando apenas 10% das chuvas distribuídos desde o final do mês de abril até o final de agosto (ALVARES *et al.*, 2013). Na região, as médias anuais de precipitação e temperatura são, respectivamente, 1600 mm e 23°C (FIBRACON, 2017).

Na região predominam Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Neossolos Quartzarênicos, com textura média e arenosa, topografia plana a suavemente ondulada, geralmente ácidos e com baixa fertilidade natural (SALTON *et al.*, 2013).

As amostras de solo foram coletadas sob três diferentes vegetações (VEGT), eucalipto (EUCP), pastagem (PAST) e Cerrado conservado (CERC). Sob EUCP foram selecionadas cinco diferentes idades de cultivo (aos 3, 5, 7, 10 (3 anos em segundo ciclo) e 14 (7 anos em segundo ciclo) anos de plantio). Em cada uma destas situações foram demarcadas em campo 4 áreas amostrais de 20 x 30 m. Estas áreas foram divididas em 4 conglomerados, sendo retirada uma amostra de cada, constituindo quatro repetições por área. As amostras de solo foram coletadas em quatro profundidades (0 – 0,10; 0,10 – 0,30; 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m).

A determinação da resistência do solo à penetração foi realizada em campo (CMP) e na bancada em amostras indeformadas, após passar por mesa de tensão a 60 cm de coluna de água (cm.c.a) e com 100 cm.c.a. ambas pelo período de 24 horas.

Para a obtenção das medidas da RP pelo penetrômetro estático de bancada (PEB), foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros com altura e diâmetro de cinco centímetros (volume nominal de 100 cm³), a partir da superfície até 1,00 m de profundidade, nos locais acima descritos.

A RP foi determinada em campo, com penetrógrafo de mola, cone e haste padrão ASAE (Sociedade Americana de Engenharia Agrícola), marca Soil Control modelo Penetrographer SC-60 (SC-60), com diâmetro da base do cone de 12,8 mm e ângulo de 30°, além de registro contínuo da pressão em Mpa e no laboratório com penetrômetro de solos eletrônico e de bancada, da marca Solotest (Solotest 1.212.230), cujo penetrador tem ponta cônica de diâmetro 4 mm, com ângulo de 30° e comprimento de 80 mm, com curso útil de penetração de 50 mm a 90% da velocidade máxima, com anéis passando pelos processos de retirada de umidade a 60 cm.c.a (B60) e 100 cm.c.a (B100), com três repetições para cada anel a 60 cm.c.a e duas repetições para 100 cm.c.a.

O penetrógrafo SC-60 tem haste de 0,60 m, permitindo obtenção de dados contínuos até a profundidade de 0,60 m. Sendo adotada para a profundidade de 0,60 – 1,00 m no SC-60, o valor médio dos tratamentos da bancada para não desbalancear a análise fatorial.

Como a RP varia em função da umidade, a comparação de medidas da RP em períodos diferentes pode ser mascarada pela umidade do solo, gerando interpretações errôneas. Assim, uma alternativa é corrigir os valores de resistência medidos a uma umidade qualquer para um valor de referência.

O modelo escolhido para correção calcula a $dC/d\theta$ como descrito em Busscher *et al.* (1997) e em conformidade com a literatura científica (LIMA, 2019).

$$RP = \alpha \exp(b\theta_m) \quad \text{Equação 1.}$$

Onde:

α e b : são parâmetros empíricos

Θ_m : umidade medida

Os parâmetros a e b foram calculados para cada intervalo de profundidade pelo método dos mínimos quadrados.

A proposta de Busscher *et al.* (1997) foi corrigir a resistência utilizando a expressão:

$$RP_c = RP_m + \frac{dC}{d\theta} \times (\theta_{ref} - \theta_m) \quad \text{Equação 2.}$$

Onde:

RP_c : resistência à penetração corrigida;

RP_m : resistência à penetração medida;

$dC/d\theta$: derivada do modelo de RP (Θ_m);

θ_{ref} : umidade a base de massa de referência;

Θ_m : umidade medida

Os dados obtidos a partir da leitura da célula de carga do penetrógrafo foram lançados automaticamente em planilha e a força exercida pela célula de carga dada em Kgf. Para converter em MPa foi dividido o valor em Kgf pela área da base do cone da haste (0,1256 cm²) e multiplicado por 0,0981 conforme manual do equipamento Solotest.

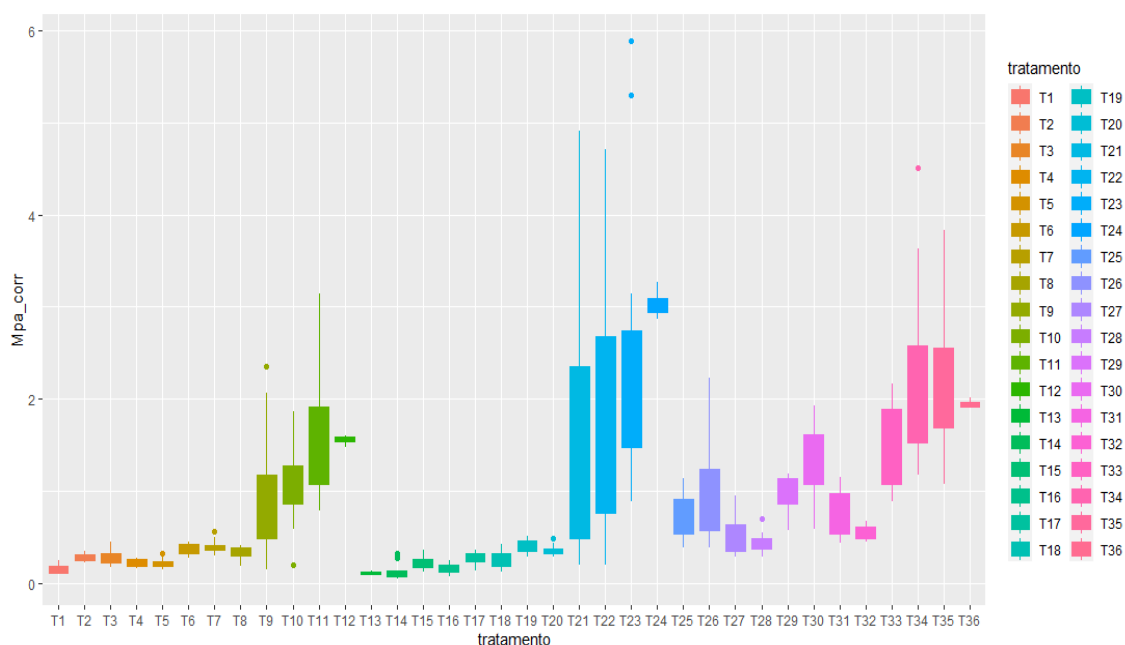
Os dados obtidos a partir dos dois equipamentos foram convertidos para MPa (para resistência do solo à penetração) e analisados quanto a estatística descritiva, e após verificação da presença de outliers, eles foram tratados como parcela perdida, o que ocorreu nos tratamentos CERC na profundidade de 0 - 0,10 m, EUCP na profundidade de 0,30 - 0,60 m e na PAST na profundidade de 0,10 - 0,30 m.

Removidos os outliers, a hipótese da normalidade foi testada por meio do teste de Shapiro-Wilk (1965). Verificada a normalidade dos dados, a análise de variância foi conduzida em modelo fatorial 3 x 3 x 3, sendo 3 áreas de cultivo (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado - CERC), 3 metodologias de determinação da resistência do solo à penetração (SC60, PEB60 e PEB100) dispostos na parcela, em 3 profundidades (0 - 0,10; 0,10 - 0,30 e 0,30 - 0,60 m) avaliadas na subparcela. O teste F foi utilizado para detectar as diferenças dos fatores e as interações. Quando encontradas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Todos os testes estatísticos foram realizados a 5% de probabilidade e a análise dos dados foi conduzida com o auxílio do *software R* (R CORE TEAM, 2019) versão 3.6.2.

4.3 Resultados e Discussão

A estatística descritiva dos dados, por meio dos gráficos Boxplot (Figura 1), explicita que As medidas de RP realizadas com o penetrógrafo SC60 em campo apresentaram maior variabilidade do que as medidas realizadas com o penetrógrafo estático tanto com 60 ou com 100 cm c.a.

Figura 1 – Gráfico de Boxplot para os tratamentos formados pelas combinações dos fatores cultivo - Cult (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado – CERC), métodos para determinação da resistência do solo à penetração - Met (SC60, PEB60 e PEB100) em 3 profundidades do solo - Prof (0 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m).

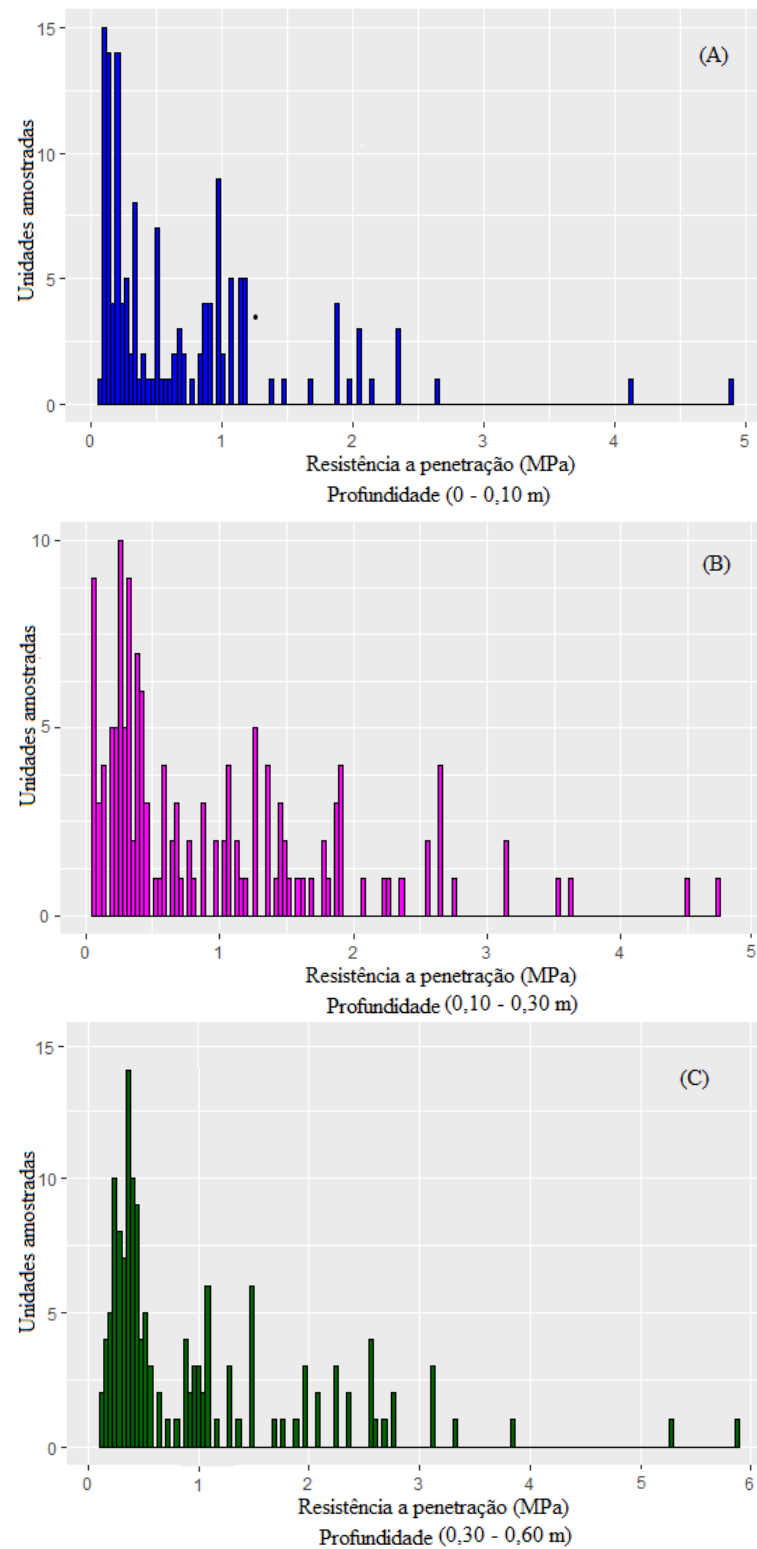


Nota: Cerrado na profundidade 0 – 0,10 m (T1, T5, T9); Eucalipto na profundidade 0 – 0,10 m (T13, T17, T21); Pastagem na profundidade 0 – 0,10 m (T25, T29, T33); Cerrado na profundidade 0,10 – 0,30 m (T2, T6, T10); Eucalipto na profundidade 0,10 – 0,30 m (T14, T18, T22); Pastagem na profundidade 0,10 – 0,30 m (T26, T30, T34); Cerrado na profundidade 0,30 – 0,60 m (T3, T7, T11); Eucalipto na profundidade 0,30 – 0,60 m (T15, T19, T23); Pastagem na profundidade 0,30 – 0,60 m (T27, T31, T35); Cerrado na profundidade 0,60 – 1,00 m (T4, T8, T12); Eucalipto na profundidade 0,60 – 1,00 m (T16, T20, T24); Pastagem na profundidade 0,60 – 1,00 m (T28, T32, T36), onde os primeiros elementos é bancada 60 cm.c.a o segundo elemento bancada 100 cm.c.a e o elemento 3 é o penetrógrafo SC-60 (Bancada 60, Bancada 100, Penetrógrafo).

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os histogramas de distribuição dos dados coletados (Figuras 2 A, B e C) para análises, nas profundidades de 0 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m, permitem inferir a incerteza estatística ou aleatória associada ao procedimento de medida. Verifica-se nesses histogramas que as medidas estão dispersas, demonstrando grande aleatoriedade dos valores, o que é comum ocorrer em dados de solos quando não agrupados em classes.

Figura 2 – Histogramas dos dados nas profundidades analisadas do solo (A) 0 – 0,10 m (B) 0,10 – 0,30 m e (C) 0,30 – 0,60 m

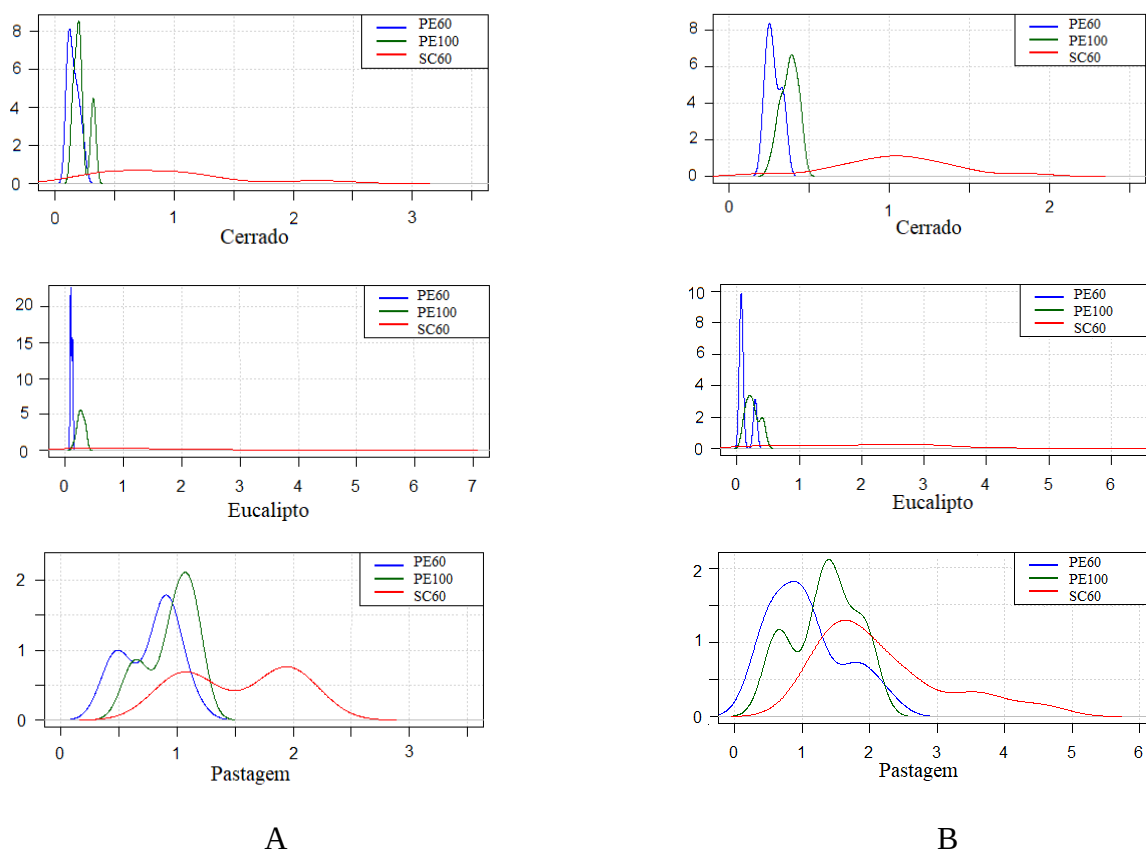


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A análise das curvas de densidade dos valores obtidos nas metodologias (SC60, PEB60 e PEB100), descreve o padrão geral da distribuição na proporção de todas as observações que se enquadram naquele intervalo. Em todos os cenários, verificou-se maior concentração dos dados nos tratamentos PEB60 e PEB100 em relação ao SC60. A amplitude dessa curva está em torno de 0,5 unidade adimensional, tanto para Cerrado quanto para Eucalipto (Figura 3), nas duas profundidades avaliadas (0 – 0,10 e 0,10 – 0,30 m), com exceção do PEB60 na profundidade 0 - 0,10 m no Eucalipto. Amplitudes menores mostram que esses dados estão com um grau de dispersão menor em relação ao SC60, dando a ideia de que nesses tratamentos (PEB60 e PEB100) a estimativa do erro será menor em relação ao tratamento SC60. Pode-se verificar que o aspecto da curva relativa a este equipamento em relação aos demais aproxima-se de uma linha.

Na pastagem também foi verificada maior dispersão no SC60 e maior proximidade entre PEB60 e PEB100 com menores dispersões, mas nesta vegetação, os dados relativos ao SC60 formam uma curva em relação aos demais, e esse comportamento da curva nesta vegetação mostrou-se distinto nas duas profundidades avaliadas (Figura 3).

Figura 3 – Curva de densidade entre metodologias para mensuração da RP nas profundidades A: 0-0,10 e B: 0,10 – 0,30 m para cada cultivo: Cerrado, Eucalipto e Pastagem.

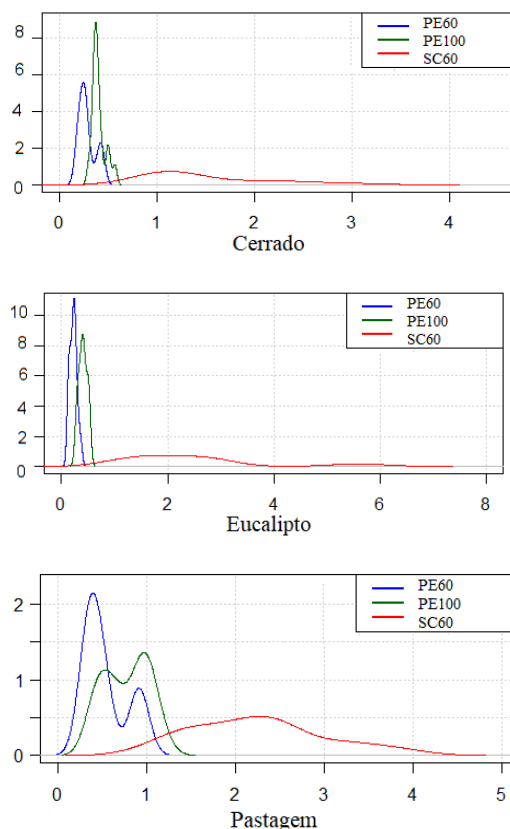


Fonte: Elaboração do próprio autor.

O mesmo comportamento aqui obtido foi verificado na profundidade de 0,30 a 0,60 m, com menor amplitude em PEB60 e PEB100 para todas as vegetações, destacando o comportamento diferente do equipamento SC60, onde se coletou os dados diretamente em campo (Figura 4).

Pode-se perceber que o comportamento dos dados de acordo com os equipamentos é distinto em relação à área de cultivo (Figuras 3 e 4). O padrão da curva apresenta menores mudanças na área de pastagem, sendo observado apenas uma espécie de gramínea na área, ou seja, pouca variabilidade de raízes explorando o solo sugerindo que possivelmente nesta área em relação às de CER o que explica uma maior uniformidade ao longo da área em relação à resistência à penetração.

Figura 4 – Curva de densidade entre metodologias para mensuração da RP, na profundidade 0,30 – 0,60 m para cada cultivo: Cerrado, Eucalipto e Pastagem.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ressalta-se que a umidade pode alterar os dados da RP, como afirmam Duarte *et al.* (2019), uma vez que a umidade interfere na coesão entre as partículas do solo. Em épocas secas, a umidade nas camadas superficiais tende a ser menor, e em camadas mais profundas, a umidade é maior e mais homogeneizada, ou seja, igual ou semelhante as amostras do seu entorno. Com menor umidade, as partículas do solo apresentam-se mais próximas e difíceis de serem separadas, aumentando a RP. Em solos mais arenosos, como os avaliados neste trabalho, a granulometria da areia (fina, média e grossa) também pode alterar a RP, bem como influenciar na homogeneidade da umidade em maiores profundidades, e este fato pode ter causado redução da variação da RP nas camadas de 0,30 – 0,60 m, quando das medidas com uso do equipamento SC60 (Figura 4).

A RP, como revelado pelo teste de F, tem influência das fontes de variação: cultivo (Cult), método (Met), profundidade (Prof), bem como nas interações: Cult x Prof e Met x Prof (Tabela 1). Demonstrando que apesar da profundidade causar efeito na resistência à penetração, o cultivo tem um peso maior nestes resultados.

Tabela 1 – Resumo da análise de variância para cultivo - Cult (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado – CERC), métodos para determinação da resistência do solo à penetração - Met (SC60, PEB60 e PEB100) em 3 profundidades do solo - Prof (0 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m).

Fontes de variação	GL	QM
Conglomerado (Cong)	3	0,2092 ^{ns}
Cultivo (Cult)	2	18,8667 ^{**}
Método (Met)	2	105,3182 ^{**}
Cult x Met	4	4,2417 ^{ns}
Profundidade (Prof)	3	2,3943 ^{**}
Cult x Prof	6	1,1423 ^{**}
Met x Prof	6	1,5425 ^{**}
Cult x Met x Prof	12	0,1872 ^{ns}
Média	0,865	
CV ₁	173,58	
CV ₂	54,85	

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. GL – Graus de Liberdade. QM – Quadrados Médios.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O desdobramento da interação Cult e Met (Tabela 2) mostrou ausência de diferenças significativas de RP entre as médias PEB60 e PEB100, operados com colunas de água de 0,6 e 1,0 m, no entanto, ambos diferem com valores menores aos que foram obtidos com o uso do SC60.

Existe diferença significativa nos valores de resistência à penetração para uma mesma faixa de umidade quando comparado aos valores obtidos pelo uso do penetrômetro eletrônico à velocidade constante ou com o penetrômetro eletrônico com operação manual (LIMA, 2019).

O penetrômetro eletrônico à velocidade constante apresenta melhor resolução dos dados comparados ao penetrômetro eletrônico com operação manual (LIMA, 2019). Salientado que neste trabalho ocorreu semelhante diferenciação dos valores obtidos no Cerrado quando comparados com o Eucalipto e a Pastagem quando foi utilizado o SC60 operado manualmente.

Tabela 2 – Valores médios para resistência do solo à penetração (RP) para o desdobramento da interação entre cultivo – Cult (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado – CERC) e método para determinação da resistência do solo à penetração – Met (SC60, PEB60 e PEB100).

Cultivo	Método						Média
	PEB 60 ^{ns}		PEB 100 ^{ns}		SC60 [*]		
Cerrado ^{ns}	0,232	a1 b1	0,3296	a1 b1	1,162	a1 b2	0,575 a1
Eucalipto ^{ns}	0,152	a1 b1	0,3218	a1 b1	1,993	a2 b2	0,822 a1a2
Pastagem ^{ns}	0,702	a1 b1	0,9001	a1 b1	1,990	a2 b2	1,197 a2
Média	0,362 b1		0,517 b1		1,715 b2		-

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. ai bi, Códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%. ai, compara Cult dentro de cada nível de Met. bi, compara Met dentro de cada nível de Cult.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Esses resultados podem ser explicados, principalmente pelo modo de operação dos equipamentos em relação ao penetrógrafo, uma vez que os penetrômetros de bancada têm a inserção da haste em velocidade constante, enquanto o penetrógrafo é manual e a inserção da haste vai variar em função de seu operador. Beckett *et al.* (2018) tiveram resultados compatíveis ao deste estudo ao utilizarem os penetrômetros de impacto PANDA 2, anel dinamométrico e estático eletrônico, evidenciando que no geral, a resistência à penetração aumentou com a profundidade do solo. No entanto, os desvios em relação à média também aumentaram com a profundidade e nos testes de laboratório demonstraram que, para a faixa de profundidades investigadas, a precisão do dispositivo diminuiu com o aumento da profundidade, o que corrobora com o que é apresentado nessa pesquisa.

Nos estudos de Betioli Junior *et al.* (2019), verificou-se que um mesmo solo trabalhado em sistemas de cultivo distintos apresenta valores diferentes para RP, apresentando valores mais elevados de RP até 0,40 m de profundidade sob plantio direto, comparado a solos sob sistema convencional. Como pode ser verificado na Tabela 3, a resistência vai aumentando à medida que se aprofunda no solo, semelhante ao que Betioli e seus colaboradores obtiveram em seu trabalho, entretanto, neste mesmo trabalho foram avaliadas menores profundidades que as do presente estudo, onde houve aumento de RP nas camadas de 0 – 0,10 e 0,30 – 0,60 m, reduzindo a RP na camada de 0,60 – 1,00 m, nos três cultivos (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado – CERC).

Tabela 3 – Valores médios para resistência do solo à penetração (RP) para o desdobramento da interação entre cultivo – Cult (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado – CERC) e Profundidade do solo – Prof (0 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m).

Profundidade	Cultivo						Média
	Cerrado *		Eucalipto **		Pastagem **		
0,00 - 0,10 **	0,433	a1 c1	0,621	a1 c1	1,086	a2 c1	0,713 c1
0,10 - 0,30 **	0,561	a1 c1c2	0,800	a1 c1c2	1,529	a2 c2	0,963 c2
0,30 - 0,60 *	0,731	a1 c2	1,030	a1a2 c2	1,179	a2 c1	0,980 c2
0,60 - 1,00 ^{ns}	0,573	a1 c1c2	0,838	a2 c1c2	0,996	a2 c1	0,802 c1
Média	0,575	a1	0,822	a1a2	1,197	a2	-

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F. ai ci, Códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%. ai, compara Cult dentro de cada nível de Prof. ci, compara Prof dentro de cada nível de Cult.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A RP teve comportamento semelhante em maiores profundidades no estudo de Gomes et al (2005), com eucalipto em espaçamento de 12 x 2,5 m, onde os valores de resistência à penetração foram crescentes para as profundidades de 0,0 – 0,05 até 0,40 – 0,45 m, diminuindo a partir desta camada. Os menores valores foram constatados na camada de 0,55 – 0,60 e 0,60 – 0,65 m. Na avaliação dos dados de Gomes e seus colaboradores nestas camadas, foram encontradas variações de 2,16 a 2,15 MPa respectivamente, enquanto as demais variaram de 2,29 a 3,11 MPa. Os resultados dos autores supracitados corroboram com o que foi avaliado neste trabalho, que em profundidades superiores a 0,60 m pode ocorrer uma redução a RP.

Em relação a profundidade, os valores de RP podem estar associados a diversos fatores, desde adensamento natural, menor atividade radicular, menor teor de carbono nas camadas do solo e formação de adensamento mecânico pela movimentação das máquinas agrícolas. Tormena *et al.* (1998) e Dalchiavon *et al.* (2011) indicam que valores de RP acima de 1,0 MPa muito embora, esses valores não se mostrem como impeditivo para a grama batatais nem para o eucalipto, podem prejudicar o bom desenvolvimento do sistema radicular e em outros fatores edáficos ligados ao desenvolvimento das culturas. Todavia, ainda assim, é importante observar que a magnitude do grau de RP foi amplamente afetada pela técnica utilizada para sua quantificação, sugerindo que, valores limites devem ser estabelecidos conforme a técnica utilizada (SILVA *et al.* 2020) e até mesmo a cultura.

Na Tabela 4 verifica-se que a técnica de obtenção dos dados de RP, quando obtida de forma manual, com o uso do Penetrógrafo SC60, gera valores maiores do que com o uso dos anéis em penetrômetro de bancada (PEB 60 e PEB 100), não mostrando diferenças

significativas entre as metodologias de normatizar as umidades (PEB 60 e PEB 100) nos anéis volumétricos.

Tabela 4 – Valores médios para resistência do solo à penetração (RP) para o desdobramento da interação entre método para determinação da resistência do solo à penetração – Met (SC60, PEB60 e PEB100) e Profundidade do solo – Prof (0,00 – 0,10; 0,10 – 0,30 e 0,30 – 0,60 m).

Profundidade	Método						Média
	PEB 60 ^{ns}		PEB 100 ^{ns}		SC 60 ^{**}		
0,00 - 0,10 ^{**}	0,343	b1 c1	0,479	b1 c1	1,319	b2 c1	0,713 c1
0,10 - 0,30 ^{**}	0,488	b1 c1	0,651	b1 c1	1,751	b2 c2	0,963 c2
0,30 - 0,60 ^{**}	0,343	b1 c1	0,521	b1 c1	2,076	b2 c3	0,980 c2
0,60 - 1,00 ^{**}	0,275	b1 c1	0,416	b1 c1	-		0,354 c1
Média	0,362 b1		0,5172 b1		1,7156 b2		-

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F.

bi ci, Códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%.

bi, compara Met dentro de cada nível de Prof. ci, compara cada profundidades dentro de cada nível de Met.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Segundo Beutler *et al.* (2007), em seu estudo, o penetrômetro de impacto determinou valores superiores de RP em relação aos penetrômetros de anel dinamométrico e ao eletrônico. Os resultados obtidos com os penetrômetros de anel dinamométrico e eletrônico foram semelhantes, e de acordo com os autores, a diferenciação quanto ao penetrômetro de impacto pode ter ocorrido por comportamentos vários no decaimento do martelo.

No trabalho de Vogel *et al.* (2017), ao compararem dois penetrômetros, observaram que os valores obtidos divergiram significativamente, sendo que o penetrômetro de impacto apresentou valores superiores de RP quando comparado com o penetrômetro eletrônico.

Os trabalhos destes autores corroboram com Leite *et al.* (2010) que verificaram os comportamentos do penetrômetro eletrônico e do penetrômetro manual em resistência mecânica à penetração conhecida. Os pesquisadores observaram que a resistência do solo à penetração teve maior precisão para o penetrômetro eletrônico, demonstrando a eficácia e a maior sensibilidade do equipamento para detectar a real resistência oferecida.

O que fica evidente na análise dos trabalhos de Beutler *et al.* (2007), Leite *et al.* (2010) e Vogel *et al.* (2017) é que a discrepância dos dados pode ser causada pela operação manual, conforme ocorre nas medições pelo penetrógrafo SC60, o que pode ser a resposta para as diferenças encontradas nesse estudo quando comparado ao método de bancada.

Na interação tripla como pode ser visualizado na Tabela 5, verifica-se que na profundidade inicial de 0 - 0,10 m houve diferenças significativas na metodologia de determinação da RP para os três cultivos: Cerrado, Eucalipto e Pastagem.

Tabela 5 – Valores médios para resistência a penetração (RP) para o desdobramento triplo ente cultivo – Cult (eucalipto - EUCP, pastagem - PAST e Cerrado conservado – CERC), métodos (SC60, PEB60 e PEB100) nas profundidades do solo - Prof (0,0 – 0,10, 0,10 – 0,30, 0,30 – 0,60, 0,60 – 1,00 m).

Profundidade (m)	Cultivo	Método								
		Z ^{cl}			Z ^{cl}		Z ^{cl}			
		PEB 60	ns		PEB 100	ns		SC 60	**	
			ns			ns			**	
			**			**			**	
		X ^{ai}								
0,0 – 0,10	Y ^{bi}	ns			*		ns			
	Cerrado	*	0,151	a1 b1 c1	0,217	a1 b1b2 c1	0,931	a1 b2 c1		
	Eucalipto	**	0,104	a1 b1 c1	0,267	a1 b1 c1	1,492	a1 b2 c1		
	Pastagem	*	0,773	a1 b1 c1	0,952	a2 b1 c1	1,532	a1 b1 c1		
0,10 – 0,30		*			**		**			
	Cerrado	*	0,275	a1 b1 c1	0,372	a1 b1 c1	1,036	a1 b2 c1		
	Eucalipto	**	0,124	a1 b1 c1	0,254	a1 b1 c1	2,023	a2 b2 c2		
	Pastagem	**	1,064	a2 b1 c1	1,327	a2 b1 c1	2,194	a2 b2 c2		
0,30 – 0,60		ns			ns		*			
	Cerrado	**	0,279	a1 b1 c1	0,395	a1 b1 c1	1,520	a1 b2 c1c2		
	Eucalipto	**	0,222	a1 b1 c1	0,405	a1 b1 c1	2,464	a2 b2 c2		
	Pastagem	*	0,529	a1 b1 c1c2	0,764	a1 b1 c1c2	2,244	a1a2 b2 c2		
0,60 – 1,00		ns			ns		-			
	Cerrado	*	0,224	a1 b1 c1	0,332	a1 b1 c1	-			
	Eucalipto	**	0,160	a1 b1 c1	0,359	a1 b1 c1	-			
	Pastagem	**	0,442	a1 b1 c2	0,556	a1 b1 c2	-			

Nota: **, * e ^{ns}, significativo a 0,01, 0,05 e não-significativo, respectivamente, pelo Teste F.

X^{ai}, Y^{bi}, Z^{ci} diferenças dos desdobramentos da interação tripla. X diferença entre Cult no mesmo Met na mesma Prof, Y a diferença entre Met para o mesmo Cult na mesma Prof e Z diferença entre Prof para o mesmo Cult e mesma Met.

ai, bi e ci com códigos distintos demonstram diferença significativa entre médias pelo teste de Tukey a 5%.

ai, compara as médias da RP entre Cult, na coluna, dentro de cada Prof, e mesmo Met. bi, compara as médias de RP entre Met, na linha, para o mesmo Cult e a mesma Prof. ci, compara as médias da RP entre profundidades, na coluna a cada 3 linhas, para o mesmo Cult e o mesmo Met.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na profundidade de 0,10 – 0,30 m houve diferenças para RP nos cultivos (Cult), bem como nos três métodos (Met) de obtenção da resistência. Em todas as interações é facilmente observado que os maiores valores de RP estão na pastagem, independentemente do método utilizado.

A RP de um solo sob mata natural tende a ser baixa, se comparada àquela do mesmo solo, após cultivo intensivo. Sempre que possível, deve-se obter o valor sob mata, com intuito

de comparar, depois, à RP após anos de uso agrícola (CAMARGO e ALLEONI, 2006). Esse comportamento é constatado no trabalho de Furquim *et al.* (2020), no qual os maiores valores de resistência à penetração foram verificados em pastagens degradadas, quando em comparação com outros sistemas, como constatado neste presente estudo.

4.4 Conclusões

As resistências a penetração do solo foram superiores à referência de 1 MPa, para Pastagem nas profundidades de 0,10 – 0,30 m (1,50 MPa), quando medidas pelo penetrógrafo (método SC60), e em cultivo de Eucalipto e Pastagem (1,90 MPa) a partir da profundidade de 0,10 – 0,30 m (1,75 a 2,07 MPa), fator que pode gerar condições restritivas ao crescimento do sistema radicular das plantas.

Independente do sistema de cultivo e profundidade do solo, o penetrógrafo (método SC60) apresentou os maiores valores de RP (1,16 a 2,07 Mpa), chegando a 2,46 Mpa na profundidade de 0,30 – 0,60 no cultivo de eucalipto.

No conjunto dos dados abordados nesse estudo não se encontrou variações significativas de RP em relação aos penetrômetros de bancada (PEB 60 e PEB 100). Isso pode indicar, que para amostras de Latossolos arenosos oriundas do cerrado Sul Mato-Grossense é indiferente usar a extração de água do anel a 100 cm.c.a (como estabelece o manual do penetrômetro Solotest) ou a 60 cm.c.a

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; GODOY, S. G. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Viçosa, MG, v. 17, p. 932-937, 2013.
- BAESSO, M. M. *et al.* Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração em um latossolo vermelho eutroférico. **BIOENG**, [s. l.], v.14, n. 2, p. 101-110, 2020.
- BETIOLI JÚNIOR, E. *et al.* Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 971-982, 2012.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 146-151, jan./abr. 2007.
- BUSSCHER, W. J. *et al.* Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.
- BECKETT, C. T. S. *et al.* Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, n. 1, p. 150-157, 2018.
- CAMARGO DE, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Reconhecimento e medida da compactação do solo**. [S. l.], 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/C6/Index.htm. Acesso em: 24 jan. 2022.
- CENTENO, L.N. *et al.* Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.
- DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; GATE, O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 412-419, 2007.
- DUARTE, M. L. *et al.* Avaliação da variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água de um solo de Terra Preta Arqueológica. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 4, n. 3, p. 200-208, 2019.
- FIBRACON. **Consultoria Perícias e Projetos Ambientais**. Encarte II. Revisão do Plano de Manejo do Monumento Natural da Serra do Bom Jardim, Alcinópolis, MS. p. 186. 2017
- FURQUIM, L. C. *et al.* Infiltração de água e resistência do solo à penetração em sistemas de cultivos integrados e em área de pastagem degradada. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 16, n. 5, p. 82-95, 2020.

FURRIEL, G. P. **Desenvolvimento e validação de aparelho automático para medição da compactação do solo**. 110 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

GOMES, J. E. *et al.* Resistência à penetração do solo em sistemas de plantio *de tectona grandis* L. (teca) no cerrado do estado de minas gerais. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Paracatu, v. 1, n. 3, p. 1-18, 2005.

LEITE, F.; SANTOS, J. E. G.; LANÇAS, K. P. Comparação da resistência do solo à penetração entre penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual. **Cultivando o Saber**, [s. l.], v. 3, p. 32-39, 2010.

LIMA, K. E. A. de. **Resistência mecânica de um latossolo vermelho à penetração: comparação de penetrômetros, ajustes de modelos e correção da umidade**. 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Rondonópolis, 2019.

MONTANARI, R. *et al.* Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1811-1822, 2010.

MORAES, M. T. *et al.* of penetrometers in agriculture: A review. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 179-193, 2014.

REZENDE, J. O.; SHIBATA, R. T.; SOUZA, L. S. **Justificativa e recomendações técnicas para o "plantio direto" dos citros nos Tabuleiros Costeiros: ênfase na citricultura dos Estados da Bahia e Sergipe**. Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2015. v. 1. 240 p.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SALTON, J. C. *et al.* **Sistema São Mateus**: Sistema de Integração Lavoura-Pecuária para a região do Bolsão Sul-Mato Grossense. Dourados, 2013. (COMUNICADO TECNICO, 186) .

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, Great Britain, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965.

SILVA, L. I. *et al.* Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 40, p. 40-48, 2020.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 573-581, 1998.

VOGEL, G. F. *et al.* Avaliação dos penetrômetros de impacto e eletrônico na determinação da resistência mecânica a penetração do solo. **Revista Scientia Agrária**, Curitiba, v. 18, n. 3, p. 30-36, 2017.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo 1 fica evidenciado que o sistema de uso do solo é o fator de maior interferência para a variável estoque de carbono, influenciando de forma relevante nos seus valores nos biomas, tanto para dados amostrados quanto simulados.

Para os dados amostrados, os sistemas convencional e pastagem apresentaram os menores resultados para estoque de carbono, nos biomas Caatinga, Cerrado, Pampas e Pantanal. Enquanto nos dados simulados, os menores estoques são encontrados no sistema convencional e na pastagem do bioma Mata-Atlântica.

A utilização do sistema convencional no bioma Amazônico pode comprometer o estoque de C e os sistemas de vegetação nativa e práticas agrícolas conservacionistas apresentam-se como melhores alternativas para manutenção ou ampliação dos estoques de carbono nos biomas estudados.

No capítulo 2, os sistemas abordados para o Bioma Cerrado (pastagem degradada e cultivo de eucalipto) causaram alterações significativas para o aumento do estoque de carbono, quando comparados ao ambiente natural.

A conversão do Cerrado para o cultivo de Eucalipto não alterou os estoques de carbono do solo, mantendo os valores semelhantes em ambos os usos, principalmente ao final do ciclo do eucalipto (7 e 14 anos). Possivelmente, isso se deva às condições favoráveis à estabilização do carbono do solo, devido à pouca movimentação do solo por práticas agrícolas durante o ciclo do eucalipto.

Com base nos estoques de carbono no solo, conclui-se que o cultivo de eucalipto é sustentável em termos de estoque, uma vez que não reduziu a quantidade de carbono orgânico no solo, e quando se compara com a pastagem degradada nas profundidades de 0,30 – 0,60 e 0,60 – 1,00 m foram encontrados os menores valores de estoque de C, o que pode indicar a baixa movimentação desse elemento nesse cenário ficando limitado a região das raízes da pastagem.

No capítulo 3, foram obtidos valores de Resistência a penetração do solo superiores à referência de 1 MPa. Os maiores valores foram obtidos na Pastagem nas profundidades de 0,10 – 0,30 m (1,50 MPa), quando do uso do penetrógrafo (método SC60), e em cultivo de Eucalipto e Pastagem (1,90 MPa) a partir da profundidade de 0,10 – 0,30 m (1,75 a 2,07 MPa). Independente do sistema e profundidade do solo, o penetrógrafo (método SC60)

apresentou os maiores valores de RP (1,16 a 2,07 MPa), fator que pode gerar condições restritivas ao crescimento do sistema radicular das plantas.

Em relação ao penetrômetro de bancada (PEB60 e PEB100) não foram verificadas variações significativas de RP em relação às extrações de água do anel, indicando que, para amostras de Latossolos arenosos oriundas do cerrado Sul Mato-Grossense é indiferente usar a extração de água do anel a 100 cm.c.a, como estabelece o manual do penetrômetro Solotest, ou a 60 cm.c.a como um dos tratamentos abordados nesse estudo.

APÊNDICES

Apêndice I

Tabela 1. Estoque de carbono do solo no Bioma Amazônico

Local	Referência	Tipo de solo	Modelo utilizado	Profundidade (cm)	Período analisado (anos)	Sistema de cultivo	Cultura	Estoque C Mg/ha
Humaitá – AM	Campos et al (2016)	Cambissolo	-	0 – 100	2010	Floresta nativa		44,72
						Agroflorestal		16,25
						Plantio convencional	Urochloa	21,72
							Cana-de-açúcar	22,83
Manaus – AM	Marques et.al (2016)	Latossolo	-	0 – 200	2005/2010	Floresta nativa	-	72,90
		Argissolo						56,98
		Espodossolo						54,52
Humaitá – AM Peixoto – AM	Salimon et al (2007)	Argissolo	-	0 – 55	2000/2001	Floresta primaria	-	45,06
						Floresta secundaria		44,09
						Pastagens		64,03
Manaus – AM	Freitas (2013)	Latossolo	-	0 – 100	-	Floresta nativa Platô	-	98,14
		Argissolo				Floresta nativa Vertente		92,64
		Espodossolo				Floresta nativa Baixio		65,52
Canutama – AM	Pinheiro (2019)	Argissolo	-	0 – 20	-	Floresta	Urucum Guaraná Cupuaçu	13,32
						Agroflorestal		8,08
								11,13
								9,4
Alta Floresta – MT	Rodrigues et al (2018)	Latossolo	-	0 – 40	-	Floresta nativa		46,92
						Pastagem		36,49
						Cultivo mínimo		50,05
						Cultivo convencional		40,12

Tabela 2. Estoque de carbono no bioma Caatinga

Local	Referência	Tipo de solo	Modelo utilizado	Profundidade (cm)	Período analisado (anos)	Sistema de cultivo	Cultura	Estoque C Mg/ha
Petrolina - PE	Leite et al (2010)	Argissolo Amarelo	CQESTR	0 – 20	-	Caatinga alterada	-	12,26
						Caatinga preservada		15,48
Serra Negra do Norte – RN	Althoff et al (2018)	Neossolo Litólico	Century	0 – 20	1965/1990	Caatinga alterada	-	21,7
						Caatinga preservada		31,7
Santa Teresinha – PB						Caatinga alterada		22,5
						Caatinga preservada		26,8
Maranhão	Mendes (2015)	Latossolo Plintossolo Argissolo Neossolo Luvissolo	-	0 – 30	2010/2030	Agrícola – (T10)	-	16,91
						(T30)		22,9
						Pecuária – (T10)		43,54
						(T30)		50,94
						Silvicultura – (T10/T30)		61,6
São João do Piauí-PI	Leite et al (2010)	Neossolo Flúvico	Century	0 - 20	-	Caatinga preservada	Soja, milho Soja, milho, mamona Mangueira	22,57
						Grãos		21,30
						Grãos + Mamona		31,50
						Fruticultura		19,7
Irecê - BA	Moreira (2013)	Cambissolo	-	0 – 40	-	Caatinga preservada	Mamona	54,06
						Caatinga pastejada		43,49
						Agropastoril		50,21
Santa Teresinha – PB	Althoff (2015)	Neossolo Litólico	Century	0 – 20	2010/2100	Caatinga preservada	-	29,5
						Caatinga corte raso		21,5
						Caatinga destoca e queima		23

Tabela 3. Valores encontrados de estoque de carbono em solos do bioma Cerrado

Local	Referência	Tipo de solo	Modelo utilizado	Profundidade (cm)	Período analisado (anos)	Sistema de cultivo	Cultura	Estoque C Mg/ha
Sete Lagoas – MG	Wendling et al (2014)	Latossolo Vermelho típico	Century	0 – 20	2000/2100	Plantio convencional	Milho Milho / Soja Pinus	79,3
						Plantio direto		98,21
						Pinus		83,32
Grão Mogol - MG	Rocha et al (2014)	Latossolo Vermelho Amarelo	-	0 – 40	2003	Sistema agroflorestal	-	50,93
						Cerrado nativo		54,08
Santo Antonio de Goiás – GO	Leite et al (2010)	Latossolo Vermelho	CQESTR	0 – 20	2000 / 2040	Lavoura-pecuária-floresta	Soja / Milho Arroz	39,0
						Plantio direto		32,5
						Plantio convencional		32,1
Senador Canedo - GO	Freitas et al (2000)	Latossolo Vermelho	-	0 – 20	-	Cerrado nativo	-	5120
						Pastagem		41,10
Morrinhos - GO	d'Andrea et al (2004)	Latossolo Vermelho	-	0 – 20	-	Cerrado nativo	-	37,80
						Pastagem		40,6
Rio Verde – GO Montividiu – GO	Corbeels et al (2006)	Latossolo Vermelho	-	0 – 20	-	Cerrado nativo	-	68,10
						Pastagem		54,90
Planaltina – DF	Marchão et al (2009)	Latossolo Vermelho	-	0 – 20	-	Cerrado nativo	-	39,50
						Pastagem		35,50
Planaltina – DF	Dias (2010)	Latossolo Vermelho	Century	0 – 20	2000/2050	Cerrado nativo	-	39,50
						Pastagem baixa produtividade		34,71
						Pastagem alta produtividade		38,91
						Lavoura-pecuária convencional		34,78
						Lavoura-pecuária plantio direto		38,58

Tabela 4. Valores encontrados de estoque de carbono em solos do bioma Mata Atlântica

Local	Referência	Tipo de solo	Modelo utilizado	Profundidade (cm)	Período analisado (anos)	Sistema de cultivo	Cultura	Estoque C Mg/ha
Itajuípe – BA	Gama Rodrigues et al (2010)	Latossolo	-	0 – 100	-	Sistema agroflorestal	Cacau	302
Itajuípe – BA	Barreto et al (2011)	Latossolo	-	0 – 50	-	Sistema agroflorestal	Cacau	94
Taperoá – BA	Frazão et al (2014)	Latossolo	-	0 – 30	-	Floresta nativa	-	54
						Sistema agroflorestal	Palma	67
Ponta Grossa – PR	Rachwal (2013)	Organossolo	-	0 – 100	-	Campo natural	-	581
Guariba – SP	Freitas et al (2018)	Latossolo	-	0 – 20	-	Mata nativa	-	20,65
						Reflorestamento	-	15,93
						Cultivo convencional	Cana-de-açúcar	13,71
São Paulo	Silveira et. al (2000)	-	Century	0 – 20	-	Floresta	-	61,5
						Cultivo convencional	Cana-de-açúcar	35,4
						pasto	-	47,0
Santa Catarina	Santos et al (2019)	Nitossolo Bruno	-	0 – 40	2012/2013	Floresta natural	-	121,5
						Floresta plantada	Pinus	113,8
						Pastagem	-	112,4
						Lavoura-pecuária	Milho / Soja	100,6
Arvorezinha – RS	Lopes et al (2008)	Latossolo	Century	0 – 20	1925/2004	Cultivo convencional	-	33
Ijuí – RS	Bortolon et al (2012)	Neossolo Regolítico	Century	0 – 20	1900/2007	Plantio convencional 1900-1994/	Trigo	71,6
		Chernossolo				Plantio direto 1995-2007	Milho	128,4
		Neossolo flúvico					Soja	115,56
Vacaria - RS	Lopes et al (2013)	Latossolo Bruno	Century	0 – 20	1992/2058	Cultivo convencional	-	110,72
Belo Oriente – MG	Lima et al 2011	Latossolo	Century	0 – 20	-	Floresta natural	-	53
Floresta plantada						41,55		
Pastagem						31,54		
Floresta natural						69,20		
Floresta plantada						69,72		
Pastagem						54,99		

Tabela 5. Valores encontrados de estoque de carbono em solos do Bioma Pampas

Local	Referência	Tipo de solo	Modelo utilizado	Profundidade (cm)	Período analisado (anos)	Sistema de cultivo	Cultura	Estoque C Mg/ha
Manoel Viana – RS	Wink et al (2015)	Argissolo	Century	0 – 20	-	Floresta plantada	Eucalyptus sp.	33,26
Santa Maria – RS						Campo natural	-	32,92
Triunfo – RS						Floresta plantada	Eucalyptus sp.	27,59
						Campo natural	-	30,82
						Floresta plantada	Eucalyptus sp.	29,80
	Campo natural	-	32,49					
Eldorado do Sul – RS	Schirmann (2016)	Argissolo	-	0 – 100	1986/2006	Pastagem	-	135,7
Piratini – RS	Pilon et al (2007)	Cambissolo	-	0 – 30	-	Campo natural	-	23,5
Hulha Negra – RS	Guterres et al (2006)	Chernossolo	-	0 – 40	-	Pastagem	-	154,8
Bagé – RS	Santos (2011)	Argissolo	Century	0 – 20	1990/2060	Campo natural		89,4

Tabela 6. Valores encontrados de estoque de carbono em solos do Bioma Pantanal

Local	Referência	Tipo de solo	Modelo utilizado	Profundidade (cm)	Período analisado (anos)	Sistema de cultivo	Cultura	Estoque C Mg/ha
Barão de Melgaço – MT	Mello et al (2015)	Gleissolo	-	0-20	-	Vegetação nativa	-	27,3
Nhecolândia - MS	Roscoe et al (2006)	Argissolo	Century	0 – 20	-	Vegetação nativa	-	18
Nhecolândia - MS	Cardoso et al (2010)	Neossolo	-	0 – 40	-	Vegetação nativa	-	61,72
						Pastagem	Urochloa	41,64
Nhecolândia - MS	Fernandes et al (2007)	Espodossolo	-	0 – 20	-	Pastagem	-	17,3
		Neossolo						
Nhecolândia - MS	Fernandes e Fernandes (2010)	Neossolo	Century	0 – 20	1940/2040	Pastagem	Urochloa	11,13

Apêndice II

Tabela 1 – Média e erro padrão dos tratamentos analisados

Bioma	Uso da terra	Profundidade	Média ± Desvio padrão
Amazônico	Conservacionista	0,0 – 0,10 m	49,05 ± 0,45
Amazônico	Convencional	0,0 – 0,10 m	22,63 ± 3,73
Amazônico	Nativa	0,0 – 0,10 m	45,35 ± 5,85
Amazônico	Pastagem	0,0 – 0,10 m	43,105 ± 1,28
Caatinga	Conservacionista	0,0 – 0,10 m	51,61 ± 0,00
Caatinga	Convencional	0,0 – 0,10 m	33,27 ± 6,05
Caatinga	Nativa	0,0 – 0,10 m	35,25 ± 4,37
Caatinga	Pastagem	0,0 – 0,10 m	18,33 ± 6,14
Caatinga	Plantada	0,0 – 0,10 m	39,04 ± 3,68
Amazônico	Conservacionista	0,10 – 0,20 m	21,08 ± 5,39
Amazônico	Convencional	0,10 – 0,20 m	19,74 ± 1,26
Amazônico	Nativa	0,10 – 0,20 m	25,14 ± 2,13
Amazônico	Nativa	0,10 – 0,20 m	19,92 ± 1,85
Amazônico	Plantada	0,10 – 0,20 m	24,75 ± 4,91
Caatinga	Convencional	0,10 – 0,20 m	34,76 ± 3,73
Caatinga	Nativa	0,10 – 0,20 m	16,12 ± 0,00
Caatinga	Pastagem	0,10 – 0,20 m	41,23 ± 2,34
Caatinga	Plantada	0,10 – 0,20 m	27,84 ± 6,92

Tabela 2 – Média e erro padrão dos tratamentos analisados de 0,0 – 0,20 m

Bioma	Uso da terra	Tipo	Média ± Desvio padrão
Mata Atlântica	Conservacionista	Amostrado	44,35 ± 12,65
Mata Atlântica	Convencional	Amostrado	45,32 ± 8,27
Mata Atlântica	Nativa	Amostrado	41,45 ± 3,91
Mata Atlântica	Pastagem	Amostrado	46,63 ± 6,01
Mata Atlântica	Plantada	Amostrado	39,89 ± 7,78
Cerrado	Conservacionista	Amostrado	31,59 ± 4,88
Cerrado	Convencional	Amostrado	37,65 ± 2,77
Cerrado	Nativa	Amostrado	44,68 ± 4,82
Cerrado	Pastagem	Amostrado	38,11 ± 3,79
Cerrado	Plantada	Amostrado	41,06 ± 7,93
Pampas	Conservacionista	Amostrado	49,11 ± 5,18
Pampas	Convencional	Amostrado	39,09 ± 5,11
Pampas	Nativa	Amostrado	49,7 ± 5,67
Pampas	Pastagem	Amostrado	20,28 ± 1,86
Pantanal	Nativa	Amostrado	27,82 ± 3,32
Pantanal	Pastagem	Amostrado	12,67 ± 1,89
Mata Atlântica	Conservacionista	Simulado	46,3 ± 0
Mata Atlântica	Convencional	Simulado	25,66 ± 3,09
Mata Atlântica	Nativa	Simulado	50,63 ± 5,41
Mata Atlântica	Pastagem	Simulado	37,67 ± 13,39
Mata Atlântica	Plantada	Simulado	59,33 ± 4,79
Caatinga	Convencional	Simulado	38,49 ± 0,77
Caatinga	Nativa	Simulado	37,91 ± 2,87
Caatinga	Pastagem	Simulado	29,87 ± 4,95
Caatinga	Plantada	Simulado	40,67 ± 0,02
Cerrado	Conservacionista	Simulado	39,27 ± 8,76
Cerrado	Convencional	Simulado	32,08 ± 2,85
Cerrado	Nativa	Simulado	37,18 ± 3,65
Cerrado	Pastagem	Simulado	29,68 ± 5,69
Cerrado	Plantada	Simulado	48,36 ± 0
Pampas	Conservacionista	Simulado	38,75 ± 0
Pampas	Convencional	Simulado	45,42 ± 3,35
Pampas	Nativa	Simulado	46,7 ± 3,83
Pampas	Pastagem	Simulado	40,06 ± 0
Pampas	Plantada	Simulado	29,98 ± 0,15
Pantanal	Nativa	Simulado	49,9 ± 10,42
Pantanal	Pastagem	Simulado	9,21 ± 1,54

ANEXO

Anexo I

- AGUIAR, M. C. de; **O mercado voluntário de carbono florestal: o caso do REDD+ no Brasil**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) UNB, 2018
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. D. M., & SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p.711-728, 2013.
- ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; PINTO, A. DE S.; PAREYN, F. G. C.; CARVALHO, A. L. DE; MARTIN, J. C. R.; CARVALHO, E. X. DE; SILVA, A. S. A. DA; DUTRA, E. D.; SAMPAIO, E. V. DE S. B.; Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 254, p. 26–34, 2018.
- ANDRADE, R.; BOLFE, É.; VICTORIA, D.; NOGUEIRA, S. - Avaliação das condições de pastagens no cerrado brasileiro por meio de geotecnologias. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**. v.7, n.?? ano?? - DOI - 10.21206/rbas.v7i1.376
- ARAÚJO, E. A. de; KER, J. C.; MENDONÇA, E. de S.; SILVA, I. R. da; OLIVEIRA, E. K.; Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Revista ACTA Amazonica**, v.41, n.1, p.103 – 114, 2011.
- B. WENDLING, I. JUCKSCH, E. S. MENDONÇA, J. C. L. NEVES, I. R. SILVA & L. M. COSTA; Organic- Matter Lability and Carbon- Management Indexes in Agrosylvopasture System on Brazilian Savannah, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 39:11-12, 1750-1772, 2008. DOI: 10.1080/00103620802073750
- BARRETO, P.A.B., GAMA-RODRIGUES, E.F., GAMA-RODRIGUES, A.C. *et al.* Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agroforest Syst** 81, 213–220, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9300-4>
- BERTOL I *et al.* 2004. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28: 155-163.
- BOLDRINI II. 2009. **Biodiversidade dos campos do planalto das araucárias**. Brasília: MMA. 240p.
- BORTOLON, E. S. O.; BORTOLON, L.; e LUCHIARI JUNIOR, A.; **Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais** / autores, Palmas, TO: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2017.

BORTOLON, E. S. O.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C.G.; LOPES, F.; GIASSON, E.; BERGAMASCHI, H.; Potencial de uso do modelo century e sig para avaliar o impacto da agricultura sobre estoques regionais de carbono orgânico do solo. **R. Bras. ci. solo**, 36:831-849, 2012

BORTOLON, E. S. O., MIELNICZUK, J., TORNQUIST, C. G., LOPES, F., & BERGAMASCHI, H. Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. **Geoderma**, 167, 156-166. 2011.

CARDOSO, A. DA S.; ALVES, B. J. R.; VAQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Simulação das emissões de gases de efeito estufa em diferentes cenários de intensificação de uso das pastagens no bioma Cerrado**. Anais: Semana científica Johanna Dobereiner. Seropédica, RJ, 2010

CALONEGO, J. C., DOS SANTOS, C. H., TIRITAN, C. S., & JÚNIOR, J. R. C. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga** 25: 128-135, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; NASCIMENTO, M. F.; SILVA, D. M. P.; Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas Ambiente & Água - An Interdisciplinary **Journal of Applied Science**, vol. 11, núm. 2, 2016, pp. 339-349

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SILVA, C. A.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F. de; Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.9, p.1028-1035, set. 2010

CASTRO, F. H.; **Desenvolvimento de software para simulação do sequestro de carbono no solo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2018

CIDIN, A. C. M.; **Estoque de Carbono em solos brasileiros e potencial de contribuição para mitigação de emissões de gases de efeito estufa**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2016.

CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CARDOSO, A.; BERNOUX, M.; DOUZET, J.-M.; SIQUEIRA NETO, M.; Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. **Global Change Biology** (2006) 12, 1773–1787, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, jan./ago. 2015

COSTA, F. de S. *et al.*; Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Rev. Bras.**

Ciênc. Solo, Viçosa, v.32, n.1, p.323-332, Feb. 2008. doi.org/10.1590/S0100-06832008000100030.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G.; Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.39, n.2, p.179-186, fev. 2004

DIAS, R. R. A.; **Modelagem dos estoques de carbono do solo sob diferentes coberturas na região do cerrado**. Dissertação (Mestrado) UNB Brasília- DF. 2010

DICK, D. P.; GOMES, J.; ROSINHA, P. B.; Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodo orgânico. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:603-611, 1998

EMBRAPA. 2004. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos (CD-Rom) (Boletim 46).

FERNANDES, F.A. & FERNANDES, A.H.B.M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal. (Comunicado Técnico, 69). 2009.

FERNANDES, R.; **A matéria orgânica do solo**. Dossier Técnico INIAV, I. P., Vida Rural, p 34 – 36. 2016.

FERNANDES, F. A.; CERRI, C. C.; FERNANDES, A. H. B. M. **¹³C e a Dinâmica do Carbono Orgânico do Solo em Pastagem Cultivada no Pantanal Sul-mato-grossense**. Corumbá: Embrapa Pantanal, (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 74), 2007.

FERNANDES, A. F.; FERNANDES, A. H. B. M. Mudança de uso do solo e estoques de carbono no Pantanal: simulação utilizando o modelo Century [recurso eletrônico]– **Dados eletrônicos**. – Corumbá: Embrapa Pantanal, 2010.

FILHO, R. N. de A.; FREIRE, M. B. G. DOS S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management** 407, 210–220. 2018

FRANÇA, A. M. da S. **Função de pedotransferência para estimativa de estoques de carbono em solo de áreas de campo limpo úmido do distrito federal**. 144 f. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília-DF. 2011.

FRANÇA, A. M. da S.; PAIVA, R. J. de O.; Estimativa e modelagem dos estoques de carbono em solos sob áreas de campo limpo úmido do Distrito Federal. **Soc. & Nat.**, Uberlândia, 27 (1): 171-184, 2015 DOI: dx.doi.org/10.1590/1982-451320150112

FRAZÃO, L. A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil, **Biomass and Bioenergy**, Volume 62, 2014, Pages 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.031>.

FREITAS, A. C. A. de; **Estimativas para o estoque de carbono do solo ao longo de um gradiente topográfico na Amazônia Central**. 61 f. Dissertação (Mestrado) INPA, Manaus. 2013.

FREITAS, L. de *et al.* Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal** v. 28, n. 1, p. 228-239, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831575>.

FREITAS, P. L. de; BLANCANEUX, P.; GAVINELLI, E.; LARRÉ-LARROUY, M.-C.; FELLER, C. Nível e natureza do estoque orgânico de Latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.35, n.1, p.157-170, 2000.

FREITAS, L. de; OLIVEIRA, I. A. de; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P.; Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo **UNIMAR ciências**-ISSN 1415-1642, Marília-SP, v. 26 (1-2), p. 08 - 25, 2017.

FREITAS, S. M. de; RAMOS, R. C.; NACHILUK, K.; FAGUNDES, A.; SILVA, R. O. P.; FAGUNDES, P. R. S.; MIURA, M.; BUENO, C. R. F.; Contribuições do setor agropecuário para as emissões de gases de efeito estufa no Brasil, 2010-2014. **Informações Econômicas**, v. 46, n. 6, p. 27-43, 2016.

GAMA-RODRIGUES, E. F., RAMACHANDRAN NAIR, P. K., NAIR, V. D., GAMA-RODRIGUES, A. C., BALIGAR, V. C., & MACHADO, R. C. Carbon Storage in Soil Size Fractions Under Two Cacao Agroforestry Systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**. v. 45, n. 2, p. 274-283, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9420-7>

GARAY, I.; KINDEL, A.; CARNEIRO, R.; FRANCO, A. A.; BARROS, E.; ABBADIE, L.; Comparação da matéria orgânica e de outros atributos do solo entre plantações de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 27, p. 705-712, 2003.

GUTERRES, D.B.; BAYER, C.; CASTILHOS, Z.M.de S.; NABINGER, C. Carbono orgânico em Chernossolo sob pastagem nativa do RS **In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Ciência do solo**, 16, São Cristóvão, SE. Anais.... São Cristóvão: UFSE/SBSC. CD-ROM. 2006

HICKMANN, C., DA COSTA, L. M., SCHAEFER, C. E. G. R., FERNANDES, R. B. A., & ANDRADE, C. D. L. T. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um Argissolo após 23 anos de diferentes manejos. **Revista Caatinga**. v. 25, n. 1, p. 128-136, 2012.

JANEGITZ, M. C.; **Emissão de gases de efeito estufa e estoque de carbono no solo em função do manejo e correção de acidez**. 113 f. Tese (Doutorado), Botucatu-SP – 2016

KLUG, I. **Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude no Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Lages: UDESC. 2014, 80p.

KUNDE, R. J.; **Qualidade do Solo em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária no Bioma Pampa**. 131 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas-RS. 2016

LACERDA, K. A. P., CORDEIRO, M. A. S., VERGINASSI, A., SALGADO, F. H. M., PAULINO, H. B., & CARNEIRO, M. A. C. Carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 3, p. 249-254, 2013.

LEITE, L.; MENDONÇA, E.; MACHADO, P.; FERNANDES-FILHO, E.; NEVES, J. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the CENTURY model. **Geoderma**. 120, n. 3-4, p. 283-295, 2004. [10.1016/j.geoderma.2003.09.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.010). 2004

LEITE, L. F. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MADARI, B. E. *et al.* O potencial de sequestro de carbono em sistemas de produção integrados: a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA**, 12., 2010. Foz do Iguaçu. Anais... Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2010. p.69-76.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R. da; STAPE, J. L.; MENDONÇA, E. S.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; PAUL, K.; SCHULTHAIS, F. Modeling changes in organic carbon stocks for distinct soils in southeastern Brazil after four eucalyptus rotations using the century model. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 833-847, 2011. DOI:10.1590/s0100-06832011000300018

LIMA, J. P. DA C.; LEÃO, J. R. A. Dinâmica de crescimento e distribuição diamétrica de fragmentos de florestas nativa e plantada na Amazônia Sul Ocidental. **Floresta e Ambiente**, n 20, v. 1, p. 70 - 79, 2013
<https://floram.org/doi/10.4322/floram.2012.065>

LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília-DF: In: Embrapa Meio Ambiente 2012. 347 p.

LOPES, F. et al. Simulações espacialmente explícitas dos estoques de carbono orgânico de um LATOSSOLO BRUNO por meio da integração do modelo century com GIS. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 12, p. 2168 - 2174, 2013.
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001200008>.

MAFRA AL *et al.* Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, n. 32, p. 217-224, 2008.

MAGALHÃES, M. M. DE; BRAGA JÚNIOR, S. S. **Evolução recente e potencial da agricultura de baixo carbono**. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 8, p. 100-118, 2013.

MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; BROSSARD, M.; Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop–livestock management systems, **Soil and Tillage Research**, n. 103, v. 2, p. 442-450, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.11.002>.

MARQUES, J. D. de o.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; VITEL, C. M.; MARQUES, E. M. de A.; soil organic carbon, carbon stock and their relationships to physical attributes under forest soils in central Amazonia. **Revista Árvore**, n. 2, v. 40, p. 197-208, 201.

MARTINS, C. M. S.; **Estoques de carbono no solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola no brasil: uma meta-análise**. 90 f. Dissertação (Mestrado). Viçosa-MG 2017

MENDES, T. J.; **Estimativa da variação do estoque de carbono do solo em diferentes cenários de uso e manejo agropecuário no Estado do Maranhão**. 52 f. Tese (Doutorado) UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015.

MOREIRA, M. M.; **Estoque de carbono e nitrogênio em áreas de vegetação nativa e antropizada no município de Irecê-Ba**. 52 f. Dissertação (Mestrado). UFRB -CCAAB - Cruz das Almas, 2013.

NEVES, C. M. N. das; SILVA, M. L. N.; CURI, N; MACEDO, R. L. G.; TOKURA, A. M.; Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do estado de minas gerais. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 28, n. 5, p. 1038-1046, 2004

OLIVEIRA, E. S.; **Estoques de carbono no solo estimado por regressão geograficamente ponderada na Bacia do Sarandi - DF**. 92 f. Dissertação UNB Brasília – DF. 2015. <http://dx.doi.org/10.26512/2015.07.D.19879>

OLIVEIRA, M. E. D. de **Estimativas de emissões de N₂O e CH₄ na cultura de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo**. 112 f. Tese (Doutorado). Piracicaba- SP, 2014. <http://10.11606/T.11.2014.tde-17042014-165930>

PORTELA, M. G. T. LEITE, L. F. C.; BARBOSA, R. P.; NOLETO, D. H. **Emissões de ch₄ e n₂o em cultivo de cana-de-açúcar simuladas no modelo dndc**. In: Congresso Técnico Científico das Engenharias e da Agronomia, Fortaleza. 2015.

PILLON, C. N. *et al.* **Monitoramento do conteúdo de carbono orgânico em sistemas de manejo do solo na Serra do Sudeste, RS**. Embrapa Clima Temperado, 2007. 34 p. (Embrapa Clima Temperado Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 40).

- PINHEIRO, E. N.; **Estoque de carbono em áreas sob diferentes usos na região sul do Amazonas, Brasil** 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, 2019
- RACHWAL, M. F. G.; **Gases de efeito estufa em Organossolo natural e drenado – Paraná.** 157 f. Tese (doutorado) UFPR, Curitiba – PR, 2013
- RODRIGUES, M.; RABÊLO, F. H. S.; CASTRO, H. A. DE; ROBOREDO, D.; CARVALHO, M. A. C. DE; ROQUE, C. R.; Cultivo mínimo é o sistema recomendado para introdução da *Brachiaria brizantha* em Latossolo na Amazônia. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences** v. 61. 7 p. 2018 <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2808>
- ROSA, I. C.; **Viabilidade econômica da cana-de-açúcar irrigada no Cerrado brasileiro.** 33 f., (Monografia) - Universidade de Brasília, Planaltina-DF, 2016
- ROSCOE, R.; FERNANDES, F. A.; SCORZA JUNIOR, R. P.; MERCANTE, F. M.; **Partição do carbono decomposto do reservatório ativo no simulador century: análise de sensibilidade.** In: Reunião Brasileira De Fertilidade Do Solo E Nutrição De Plantas, 27. Reunião Brasileira Sobre Micorrizas, 11.; Simpósio Brasileiro De Microbiologia Do Solo, 9.; Reunião Brasileira de Biologia do Solo, 6., 2006
- SANTOS, F. J. dos; **Dinâmica espaço temporal do carbono do solo na Bacia do Arroio Piraizinho em Bagé.** 160 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2011.
- SANTOS, M. A. dos; **Impactos econômicos do Novo Código Florestal, no Brasil, 2010 a 2030: uma análise integrada com base nos modelos GLOBIOM-Brasil e TERM-BR.** 77 f. (Monografia) VI Prêmio Serviço Florestal Brasileiro em Estudos de Economia e Mercado Florestal. 2018
- SANTOS, T. C. dos. **Impactos das mudanças de uso da terra e manejo nos estoques de carbono do solo em diferentes biomas brasileiros.** 70 f. Dissertação (mestrado) UFAL, Alagoas. 2019
- SANTOS, K. F. dos; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; WERNER, R. de S.; WOLSCHICK, N. H.; MOTA, J. M. Teores e estoques de carbono orgânico do solo em diferentes usos da terra no Planalto Sul de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 2, p. 222-229, 2019. <https://doi.org/10.5965/223811711812019222>
- SCHIAVON, B.; SEGNINI, A.; PINTO, B. D. L.; POSADAS, A.; PRIMAVESI, O.; MILOR, D. M. B. P. **Uso da modelagem matemática para simulação da dinâmica da matéria orgânica em solos tropicais.** In: JORNADA CIENTÍFICA- EMBRAPA SÃO CARLOS, 2009, São Carlos, SP. Anais... São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009.

SCHOSSLER, D. S. **Identificação de Serviços Ecossistêmicos de Campos Naturais no Bioma Pampa e Valoração do estoque de carbono do solo utilizando a Metodologia TESSA**: 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

SCHIRMANN, J.; **Balanço de carbono e emissão de gases de efeito estufa em campo nativo do bioma Pampa**. 92 f. Tese (Doutorado) UFRGS, Porto Alegre – RS, 2016

SILVA-OLAYA, A.M., CERRI, C.E.P., WILLIAMS, S. *et al.* Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. **Plant Soil**, n. 410, p. 483–498, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11104-016-3030-y>

SILVA, K. C.; FARIAS, T. R. R.; CHAVEIRO JÚNIOR, I. R.; REZENDE, C. F. A.; SOUSA, C. N. A. de; Produtividade de sorgo consorciado com crotalária em plantio direto no Cerrado. Nota Técnica. **Revista Científica** n.5 v.1 p 76 - 81. 2017.
<https://doi.org/10.29247/2358-260X.2017v4i1.p76-81>

SILVEIRA, A.M., VICTORIA, R.L., BALLESTER, M.V., DE CAMARGO, P.B., MARTINELLI, L.A., DE CÁSSIA PICCOLO, M.; Simulation of the effects of land use changes in soil carbon dynamics in the Piracicaba river basin, São Paulo State, Brazil [Simulação dos efeitos das mudanças do uso da terra na dinâmica de carbono no solo na bacia do Rio Piracicaba]. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 35 (2), p. 389-399, 2000.

SOTERRONI, A. C.; RAMOS, F. M.; MOSNIER, A.; CARVALHO, A. X. Y. de; CÂMARA, G.; OBERSTEINER, M.; ANDRADE, P. R.; SOUZA, R. C.; PENA, M. G.; MANT, R.; PIRKER, J.; KRAXNER, F.; HAVLIK, P.; KAPOV, V.; **Modelagem de mudanças de uso da terra no Brasil: 2000-2050**. In: Agricultura, Transformação Produtiva e Sustentabilidade. Agricultura de baixo Carbono. Capítulo 11, 301-342. 2017.

SOUZA, A. S. de; **Fracionamento e estoque da matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo no solo no município de Igarapé-Açu, Nordeste do Pará**. 113 f. Tese (Doutorado) UFRAM. Belém - PA 2012

VILELA, E. F.; MENDONÇA, E. S.; Impacto de sistemas agroflorestais sobre a matéria orgânica do solo: modelagem de carbono e nitrogênio. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 354-363, 2013

WEBER, M. A.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST C. G.; Changes in Soil Organic Carbon and Nitrogen Stocks in Long-Term Experiments in Southern Brazil Simulated with Century 4.5. **Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]**. 2016, v. 40, n. 00 e0151115. Available from:
<<https://doi.org/10.1590/18069657rbc20151115>

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. de S.; ALMEIDA, R. F. de; ALVARENGA, R. C.; Simulação dos estoques de Carbono e Nitrogênio pelo Modelo Century em Latossolos, no Cerrado Brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2, p. 238-248, abr-jun, 2014.

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; SILVA, I. R.; Dinâmica do carbono e nitrogênio em plantações de eucalipto no Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 39, p. 1623-1632,