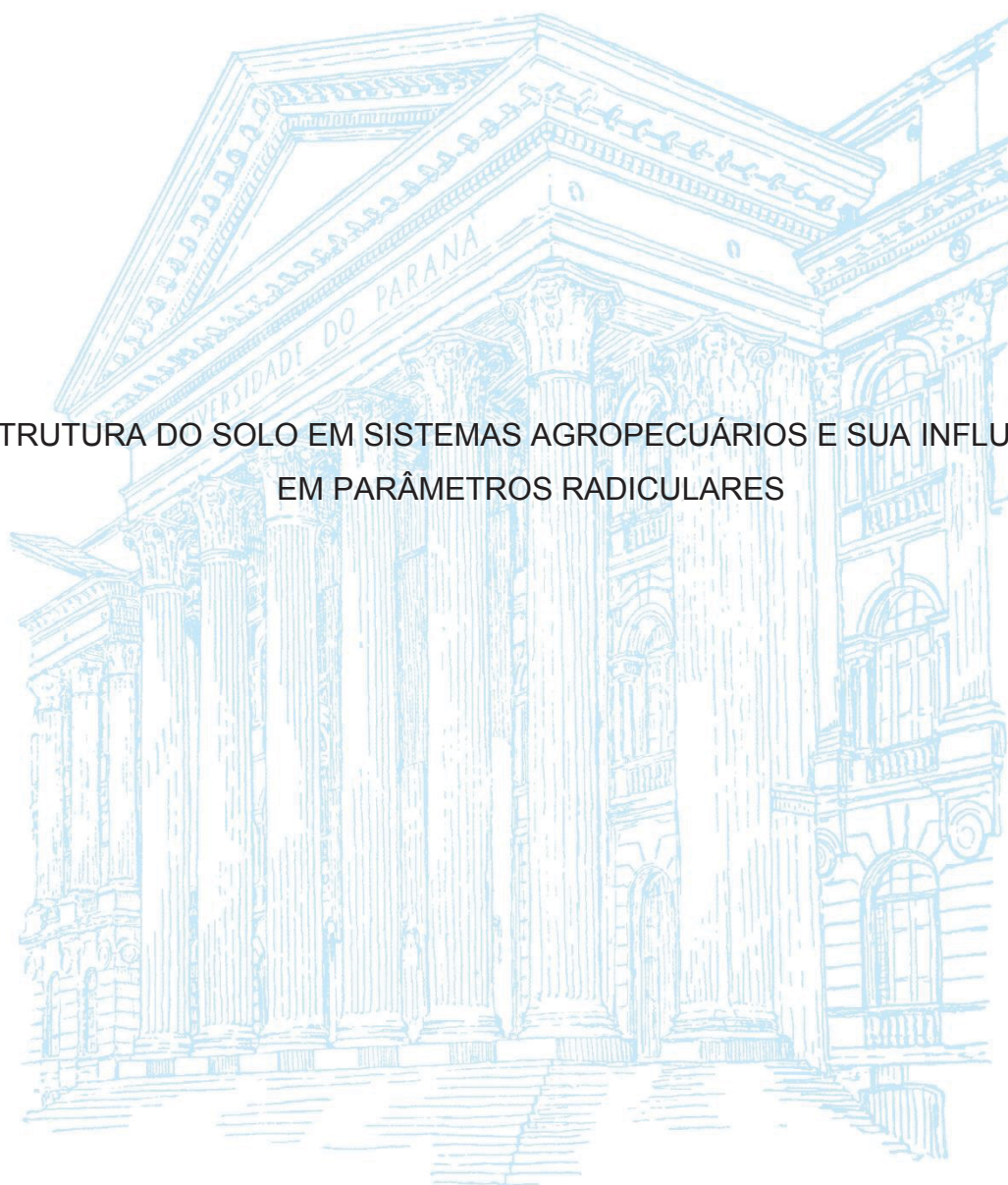


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELICIANO CANEQUETELA MARCOLINO

ESTRUTURA DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS E SUA INFLUÊNCIA
EM PARÂMETROS RADICULARES



CURITIBA

2021

FELICIANO CANEQUETELA MARCOLINO

ESTRUTURA DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS E SUA INFLUÊNCIA
EM PARÂMETROS RADICULARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Linha de Pesquisa em Qualidade, Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientadora: Prof^a Dr^a Karina Maria Vieira Cavalieri-Polizeli

Co-orientadora: Prof^a Dr^a Fabiane Machado Vezzani

CURITIBA

2021

Marcolino, Feliciano Canequetela

Estrutura do solo em sistemas agropecuários e sua relação em
parâmetros radiculares. - Curitiba, 2021.

58f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientação: Karina Maria Vieira Cavalieri-Polizeli

Orientação: Fabiane Machado Vezzani

1. Conservação do solo. 2. Qualidade do solo. 3. Solos – Teor de
carbono. I. Cavalieri-Polizeli, Karina Maria Vieira. II. Vezzani, Fabiane
Machado. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

Sistema de Bibliotecas/UFPR

Fernando Cavalcanti Moreira - CRB9/1665



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELICIANO CANEQUETELA MARCOLINO** intitulada: **ESTRUTURA DO SOLO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS E SUA INFLUÊNCIA EM PARÂMETROS RADICULARES**, sob orientação da Profa. Dra. KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Maio de 2021.

Assinatura Eletrônica
28/05/2021 17:38:37.0
KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
01/06/2021 12:31:12.0
CASSIO ANTONIO TORMENA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ)

Assinatura Eletrônica
28/05/2021 19:25:47.0
ANIBAL DE MORAES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ- DPTO
FITOTECNIA E FITOSSANITARISMO)

Assinatura Eletrônica
28/05/2021 17:42:55.0
BRUNO VIZIOLI
Avaliador Externo (CENTRO UNIVERSITÁRIO VALE DO IGUAÇU)

Dedico,

Aos meus amados pais, Elisa e Salvador. E aos meus irmãos, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus pelo dom da vida, da sabedoria, pelas bênçãos e por sempre me guiar pelos melhores caminhos.

A toda minha família, em especial meus pais pelo exemplo, incentivo, apoio e confiança.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade e ensinamentos e, aos demais servidores da UFPR por terem participado efetivamente nessa conquista.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

Em especial a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli que me recebeu de braços abertos desde o primeiro contato por e-mail, sempre esteve disposta a ensinar e partilhar o seu conhecimento, com dedicação e compreensão em todos os momentos, ajudando a me tornar uma pessoa melhor. Os seus ensinamentos ficarão para sempre e refletidos na minha vida profissional.

A minha co-orientadora Prof.^a Dr.^a Fabiane Machado Vezzani pelo auxílio da construção deste trabalho e pela disponibilização dos materiais para realização do presente estudo, além da amizade e ensinamentos.

Aos parceiros do grupo de pesquisa Anderson e Zieglenristen por auxiliarem nas atividades e pela troca de ideias.

A Bernalize do Rosário Vila Nova que sempre me apoiou, incentivou, esteve presente nas coletas e na minha vida, acompanhando todo o trajeto e me fortalecendo psicologicamente. Ela me enche de orgulho e alegria pela parceria e cumplicidade.

Ao Grupo de Pesquisa em Qualidade Física do Solo da UFPR, pela ajuda nas coletas e análise laboratorial.

Ao Núcleo de Inovação Tecnológica Agropecuária - NITA e em especial ao Professor Aníbal de Moraes pela disponibilização da área para condução do estudo.

Aos colegas de forma geral pela amizade e por todos os momentos compartilhados.

RESUMO

A falta de adoção de práticas conservacionistas e o uso de monocultivo influenciam negativamente na qualidade do solo, sendo assim os sistemas integrados de produção agropecuária vêm sendo adotados como parte da solução para produzir, recuperar e conservar os solos e os organismos vivos. Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivos i) determinar indicadores da qualidade estrutural do solo em sistemas de produção agropecuária; ii) avaliar o desenvolvimento de raízes em cada sistema e relacionar atributos de raízes com os indicadores de qualidade estrutural do solo. O estudo faz parte de um experimento de longa duração iniciado em 2012 e, foi desenvolvido na Fazenda Experimental Canguiri da Universidade Federal do Paraná, no município de Pinhais-PR. Os solos compreendem Latossolos e Cambissolos em menor proporção. Os tratamentos avaliados foram: Floresta plantada (F), Lavoura (L), Pecuária (P), Lavoura-Floresta (LF), Lavoura-Pecuária (LP), Pecuária-Floresta (PF), e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF). O delineamento experimental foi blocos ao acaso, estudando três camadas de solo 0 – 0,10, 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,30 m. Determinou-se a resistência do solo à penetração (RP), a Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) e parâmetros radiculares tais como: comprimento radicular (CR), volume radicular (VR), massa seca de raízes (MSR), área superficial específica (ASE), classes de diâmetros das raízes bem como o teor de carbono orgânico total (COT). Os resultados indicaram diferença estatística para os valores médios do VESS entre os tratamentos. O tratamento F apresentou a média maior (3,33), diferindo de todos os tratamentos, porém os resultados encontrados apontam para qualidade estrutural do solo ($Q_e < 3$) aceitável ($Q_e < 3$) da estrutura do solo. Similarmente, a RP apresentou diferenças estatísticas do tratamento F em relação aos demais, a maior média de RP foi de 3 MPa. As médias do COT variaram de 32 a 55 g kg⁻¹ não diferindo estatisticamente entre os sistemas de produção. A maior concentração de raízes foi observada na camada de 0 - 0,10 m, e essa concentração reduziu com o aumento da profundidade. Assim sendo, foram obtidas relações significativas entre as variáveis. A RP correlacionou positivamente com o VESS e ambas se correlacionaram negativamente com o COT e com as variáveis das raízes, sendo que o aumento do VESS explicou 89% da redução do VR, 82% do CR e cerca de 61 % da redução do COT. Enquanto a RP explicou em torno de 70 a redução do VR e CR. O aumento da RP foi positivamente correlacionado com o VESS ($R^2=0,84$). Entre os sistemas avaliados o F foi o que apresentou valores mais elevados tanto de RP quanto de VESS, porém, assim como todos os sistemas, apresentou qualidade de estrutura aceitável ($Q_e < 3$) para o desenvolvimento dos componentes produtivos. Assim, os diferentes sistemas de produção apresentaram adequada qualidade da estrutura do solo, indicando que manejo do solo praticado nos sistemas de produção agropecuária está sendo eficiente em proporcionar condições adequadas de solo para as culturas.

Palavras-chave: Integração lavoura-pecuária-floresta 1. Resistência do solo à Penetração 2. Carbono orgânico 3. Conservação do solo 4. Qualidade do solo 5.

ABSTRACT

The lack of adoption of conservation practices and the use of monoculture negatively influences soil quality, then integrated systems of agricultural production have been adopted as part of the solution to produce, recover and conserve soils and organisms. The present study aimed to determine soil penetration resistance (RP) and Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) as indicators of soil structural quality in integrated systems of agricultural production; to evaluate the development of roots in each system and to relate root attributes with soil total organic carbon, with PR and VESS. The study is part of a long-term experiment, started in 2012 and was carried out at the Canguiri farm experimental station belong to Federal University of Paraná, at the municipality of Pinhais. The soil is classified as an oxisol with the presence of Cambisol. The treatments evaluated are: Planted Forest (F), Tillage (T), Livestock (L), Till-Forest (TF), Livestock Crop (LC), Livestock-Forest (LF), and Crop-Livestock-Forest (CLF). The experimental design adopted was randomized blocks, in a split plot scheme with 4 replicates per experimental unit. PR, VESS and root parameters such as; root length (CR), root volume (VR), root dry mass (MSR), specific surface area (ASE), four classes of root diameters as well as total organic carbon content (COT). The samples were collected in the following layers: 0 - 0.10, 0.10 - 0.20 and 0.20 - 0.30 m. The samples were prepared and analyzed in the soil physics laboratory of UFPR. The data obtained were submitted to multivariate statistics. The VESS mean values differed statistically by treatment, the F treatment presented the highest mean (3.33), deferring from all treatments, but the results found pointed out to acceptable structure quality (Q_e) ($Q_e < 3$) of the soil structure. The RP showed statistical differences of treatment F with the other treatments, having presented minimal differences in the evaluated layers, the highest mean RP was 3 MPa. Mean values of COT obtained (32 to 55 g/kg⁻¹) did not differ statistically between the production systems. The highest root concentration was observed in the 0 - 0.10 m layer, and this concentration decreased in deeper layers. Thus, of the variables (VESS, RP, COT and root parameters) correlated and compared. The RP correlated positively with the VESS, and both were negatively correlated with the COT and the root variables, and with the increase of the VESS and the PR, the reduction of roots and the COT was observed. Among the systems evaluated, F presented higher values of RP and VESS, but, all systems presented acceptable structure quality ($Q_e < 3$) for the development of productive components. However, the different production systems provided structural soil quality, indicating that soil management performed on the studied agricultural production systems has been efficient, providing adequate soil conditions to crops.

Keywords: Crop-livestock-forest integration. Soil resistance to penetration.
Organic carbon. Soil conservation. Soil quality.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DO EXPERIMENTO	15
2.1.1 Localização do Experimento	15
2.1.2 Histórico da área e tratamentos	16
2.2 AMOSTRAGENS	19
2.3 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES	21
2.4 AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS)	22
2.5 ANÁLISES LABORATORIAIS DE SOLO	23
2.5.1 Parâmetros radiculares	23
2.5.2 Umidade, textura e densidade de partículas do solo.....	26
2.5.3 Análise do carbono orgânico total (COT)	27
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	27
3 RESULTADOS.....	28
3.1 AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO	28
3.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES	29
3.3 PARÂMETROS RADICULARES.....	31
3.4 QUALIDADE ESTRUTURAL VERSUS PARÂMETROS RADICULARES.....	34
4 DISCUSSÃO	41
4.1 AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO	41
4.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NOS SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	42
4.3 CARBONO ORGÂNICO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	44
4.4 PARÂMETROS RADICULARES.....	46
4.5 CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS RADICULARES COM VESS, RP E COT	47
5 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimento tem aumentado de forma proporcional com o crescimento da população. Assim é fundamental o uso de técnicas para produção de alimentos pautada em uma produção que preserve os ecossistemas (FAO, 2015).

Os sistemas agrosilvipastoris, quando são corretamente manejados com aplicação de práticas conservacionistas, reduzem custos de produção, proporcionam ganhos de produtividade e preservam a qualidade dos ecossistemas (COSTA et al., 2002; PANZENHAGEN et al., 2008; REINIGER et al., 2017; EHLERS, 2017). Ademais, Rahman et al. (2017) enfatizam que a agricultura praticada com técnicas que conciliem a produção de alimentos sem comprometer o ecossistema, garantem a conservação dos solos e a sua sustentabilidade. O cultivo intensivo de componentes produtivos com diversidade e práticas de conservação do solo favorecem a qualidade do solo, apresentando uma estrutura mais complexa (VEZZANI e MIELNICZUK, 2009).

O uso do sistema plantio direto (SPD), que é um sistema de cultivo conservacionista, vem sendo amplamente adotado no Brasil e associado com outras práticas de conservação (SALTON et al., 1998; FEBRAPDP, 2019). O SPD consiste em mínima mobilização do solo, bem como, preconiza a rotação de culturas e a cobertura permanente do solo (WADT, 2003; DIECKOW et al., 2004; BONETTI et al., 2015; BONETTI et al., 2018). Dados atualizados indicam que o Brasil tem mais de 33 milhões de hectares cultivados sob SPD (IBGE, 2019) e que no mundo há cerca de 180 milhões de hectares sob este sistema de manejo (KASSAM et al., 2020). Bem como o uso do SPD é apontado como um método que usado por longo tempo proporciona qualidade da estrutura do solo, devido a conectividade dos poros e o aumento do estoque de carbono (CAVALIERI et al., 2009).

No Brasil, o sistema integrado de produção agropecuária (SIPA), que visa produzir e associar dentro da mesma área, diferentes culturas e animais, resultando na produção de diversos produtos como: carne, leite, lã, grãos e biomassa, adotando o plantio sequencial e rotativo (MORAES et al., 2014), é usado em todas as regiões e praticados por pequenas e grandes propriedades (BURLAMAQUI BENDAHAN et al., 2018). No subtropico brasileiro, há relatos

que o SIPA tem sido usado desde o final do século XIX, com a prática de arroz inundado e pastagem natural, não sendo, portanto, uma técnica nova (MACHADO et al., 2011; MORAES et al., 2014). Ademais, o SIPA tem sido realizado sob sistema de plantio direto com rotação de lavouras e pastagens por proporcionar um bom retorno socioeconômico e preservação do ecossistema (GASPARINI et al., 2017). De acordo com Bungenstab et al. (2019), os SIPA diminuem o impacto do vento, melhoram a ambiência animal, a ciclagem de nutrientes, a fixação de nitrogênio, o sequestro de carbono, a comercialização de grãos, leite, carne, biocombustível, fibras, madeiras, assim como impactam positivamente a estrutura do solo e a resiliência do meio ambiente. Além disso, segundo a FAO, o SIPA proporciona benefícios sob a perspectiva sociocultural, sendo alternativa sustentável de produção de alimentos (FAO, 2011; CARVALHO et al., 2014;).

Apesar das vantagens apresentadas, efeitos negativos também são apontados, como: a compactação causada pelo pisoteio animal quando a pastagem é mal manejada e a liberação de gases de efeito estufa (DE ALMEIDA; DE MEDEIROS, 2013; BONETTI et al., 2018). Sales et al. (2016) apontam que a utilização do sistema de SPD pode proporcionar compactação superficial do solo, em comparação ao preparo convencional (PC), sendo esta compactação observada a partir da profundidade de 0,10 m. Entretanto, no SPD a rotação de culturas é fundamental no processo biológico de descompactação do solo, exercido pelos diferentes sistemas radiculares das culturas. Este processo é mais eficiente quanto mais vigoroso for sistema radicular, maior a contribuição para a formação de bioporos, onde as plantas com raízes pivotantes apresentam maior expressividade nesse processo (KOCHHANN et al., 2000; VIZIOLI et al., 2018).

A compactação do solo resulta da compressão das partículas sólidas do solo por forças externas, que afetam negativamente as relações entre a água, o ar, a temperatura do solo e o crescimento das raízes (MACHADO, 2003; HOLTHUSEN et al., 2018). Ademais, depende de vários fatores do solo, como, densidade, umidade, teor de carbono orgânico, cobertura, assim como, do agente compressivo por meio da força aplicada e da área de contato (RAKKAR e BLANCO-CANQUI, 2018). Em sistemas agropecuários, o processo de compactação ocorre devido ao tráfego de máquinas para pulverização,

adubação e plantio e/ou pelo pisoteio de animais. Segundo Reichert et al. (2007), a umidade reduz a capacidade suporte de carga no solo, propiciando a deformação, consequentemente, a compactação.

Os SIPA's são usualmente adotados nas seguintes configurações: integração lavoura pecuária floresta (LPF), integração lavoura floresta (LF), lavoura pecuária (LP) e pecuária floresta (PF). O uso da LP causa efeito positivo no solo, principalmente devido à incorporação da matéria orgânica (MO); o sistema proporciona mais entrada do que saída da MO, pois o pastejo moderado estimula a rebrota das plantas forrageiras e o crescimento das raízes atuam na formação de macroagregados, melhorando a estrutura do solo, a infiltração e a retenção da água (ZHANG et al., 2019; KICHEL et al., 2019). Apesar dos fatos apontarem para possível compactação causada pelo pisoteio, já existem várias pesquisas que apontam a solução, que é o manejo correto da pastagem e a lotação adequada de animais (BONETTI et al., 2018). O componente arbóreo no SIPA contribui para o conforto térmico do animal, para a ciclagem de nutrientes, para o acúmulo de folhas e galhos, protegendo a camada superficial do solo (MELOTTO et al., 2019).

Segundo Assis et al. (2015) e Bonini et al. (2016), a utilização do SPD no SIPA tem efeito positivo sobre as condições físicas, químicas e biológicas do solo. Uma evidência de menor influência negativa sobre os atributos físicos do solo é representada pelo uso do pastejo moderado (altura de corte até 20 cm) o que implica em reduzido efeito sobre os atributos físicos do solo (BONETTI et al., 2015; BONETTI et al., 2018).

A estrutura do solo afeta a penetração das raízes, o teor de água disponível às plantas e a aeração do solo. A formação da estrutura do solo, pelas raízes, ocorre pela ligação das partículas nas superfícies das raízes aos exsudatos radiculares, através de forças de ligação intermoleculares, forças de Vander Waals e por contato, dos pelos radiculares que se ligam às partículas do solo (LEPSCH, 2016; ZHANG et al., 2019). Gasparini et al. (2017) trabalhando com o SIPA, verificaram aumento na qualidade estrutural em LPF, que proporcionou a recuperação de áreas degradadas, aumentou a produção de grãos, melhorou o desempenho do animal e aumentou a MO do solo. Segundo Flavio Neto et al. (2015), solos degradados podem ser recuperados com o uso de pastagens (*Brachiaria decumbens* ou *brizantha*) em sistemas

integrados. Entretanto, resultados diferentes são apontados por Oliveira et al. (2015) sendo o tratamento com floresta de eucalipto o que propiciou maior resistência do solo à penetração (RP).

A estrutura do solo pode ser avaliada de diferentes formas e indicar a degradação física do solo por meio de medidas da porosidade, da movimentação da água, da resistência mecânica e a interação física, química e biológica do solo (TAVARES FILHO et al., 1999; CAMARGO, 2019). Dentre os métodos de avaliação, a avaliação visual da estrutura do solo - VESS (BALL et al., 2007; GUIMARÃES et al., 2011) tem sido utilizado com frequência para avaliar a estrutura do solo (GUIMARÃES et al., 2013; TORMENA et al., 2016; GUIMARÃES et al., 2017; CHERUBIN et al., 2017; FRANCO et al., 2019; PAIVA et al., 2020; ÇELİK et al., 2020). Segundo Paiva et al. (2020), no Brasil o uso do VESS se destaca, dentre os métodos utilizados na avaliação da estrutura do solo, enquanto Franco et al. (2019) avaliam sua aplicação global, principalmente devido à praticidade, à facilidade de aplicação do método e à rapidez na obtenção dos resultados. O VESS é um método semiquantitativo, e inclui vários aspectos da estrutura e do enraizamento para inferir sobre a qualidade da estrutura do solo, mediante os escores atribuídos (GUIMARÃES et al., 2017).

Além do VESS, outro indicador importante para a avaliação da estrutura do solo é a resistência do solo à penetração (RP), pois sua mensuração está diretamente relacionada à dificuldade das raízes penetrarem nos solos (TORMENA et al., 1996; TAVARES E RIBOM, 2008; LIMA et al., 2013). Popova et al. (2016) estudando a RP em diferentes densidades e texturas de solo, notaram o aumento da tortuosidade e redução do alongamento de raízes, em função do aumento da RP, sob textura média. Segundo MORAIS et al. (2020), tais efeitos nas raízes, associados à RP, afetam o crescimento da planta.

Os sistemas de produção agropecuária podem exercer efeitos adversos no solo (VEZZANI et al., 2009). Contudo, o monitoramento e avaliação dos parâmetros físicos hídricos relacionados ao manejo propicia um entendimento geral sobre a relação solo-planta e as influências que estes exercem sobre a qualidade do solo (CHERUBIN et al., 2017). Acredita-se que, um sistema de produção agropecuária complexo com adoção de práticas

conservacionistas venha proporcionar uma boa qualidade estrutural do solo e promover o bom desenvolvimento das plantas e o equilíbrio do sistema (ALVARENGA et al., 2001).

Apesar do SPD ser uma excelente prática conservacionista, para que o plantio ocorra na palha ou resíduo da cultura anterior, preconiza-se o uso constante de herbicidas, o que pode contribuir para o surgimento de espécies invasoras resistentes, alterando o ecossistema. Entretanto, há sistemas de produção que dispensam o uso de pesticidas. Dentre os mais conhecidos tem-se o agroecossistema tradicional que enfatiza a ciclagem dos nutrientes, a diversidade biológica, os recursos renováveis, a preservação dos microambientes e não dependem de insumos comerciais. Ademais, destaca-se a agricultura orgânica, que faz o uso de alguns insumos comerciais controlados de modo que promova a sustentabilidade ambiental e social (MAAS et al., 2020; FEIDEN, 2005). Assim, a adaptação de sistemas, como o SIPA, que usam os mais diversos insumos, buscando excluir o uso de pesticidas, torna-se uma estratégia benéfica. E, contribuem para alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS's), que segundo Keesstra et al. (2016) é preciso adotar manejos do solo para melhorar a saúde do ecossistema.

Baseado no exposto, a hipótese deste estudo é de que sistemas integrados de produção agropecuária podem promover melhor qualidade estrutural do solo quando comparados aos sistemas isolados, devido à ação de raízes diversificadas dos componentes produtivos.

Os objetivos deste estudo foram: i) determinar a RP e o VESS como indicadores da qualidade estrutural do solo em sistemas agropecuários; ii) avaliar parâmetros radiculares em cada sistema e; iii) relacionar atributos de raízes com carbono orgânico total do solo, com a RP e com o VESS.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DO EXPERIMENTO

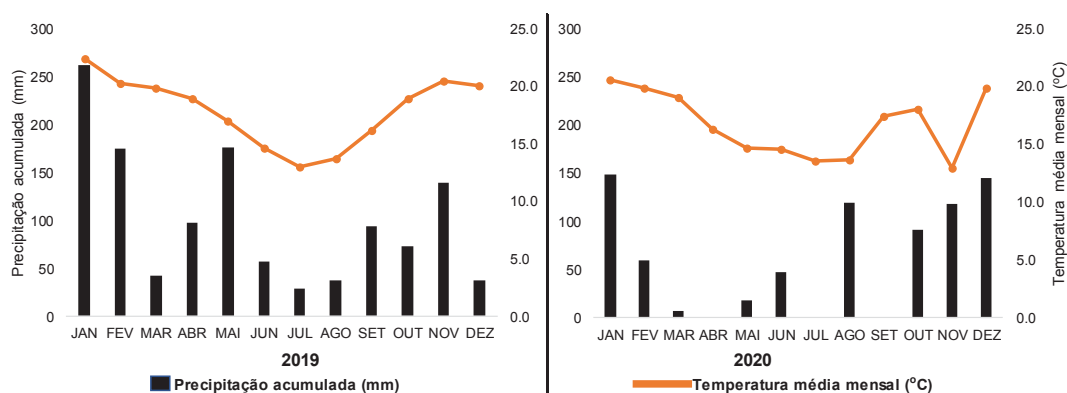
2.1.1 Localização do Experimento

O estudo foi realizado no Núcleo de Inovação Tecnológica Agropecuária (NITA), localizado na Fazenda Experimental do Canguiri, sob as coordenadas geográficas aproximadas de 25°24'05" S de latitude, 49°07'14" O, pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR), município de Pinhais-PR. A região possui clima do tipo Cfb, segundo Köppen, com precipitação média anual de 1.602 mm, temperatura média de 17 °C (ALVARES et al., 2013; CLIMATE-DATA.ORG, 2020) e altitude de 929 metros.

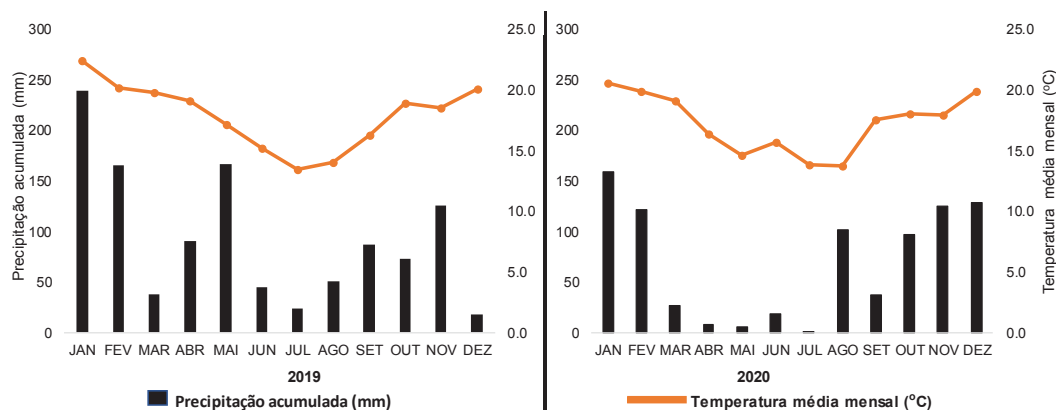
Dados de precipitação e temperatura, no período do estudo, nos sistemas com componente florestal (entre renque) e com componente Lavoura (a pleno sol) estão apresentados no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1. DADOS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA MÉDIA, A PLENO SOL (A) E ENTRE RENQUE (B).

A



B



FONTE: O autor 2021

2.1.2 Histórico da área e tratamentos

O NITA fica localizado em uma área de preservação ambiental segundo o decreto estadual Nº 2200/2000 da lei 6.938/81 (BRASIL, 2000), às margens do Rio Iraí (que abastece a água na cidade de Curitiba e a região metropolitana). Portanto, as áreas devem ser livres do uso de pesticidas ou agrotóxicos. Antes da implementação da área experimental havia o cultivo intensivo de milho sob preparo convencional do solo. Contudo, parte da área, era destinada a treinamentos e ensaios de tráfego de máquinas agrícolas, o que levou à intensa degradação do solo. Os solos da área experimental foram identificados, na sua maioria, como Latossolos, podendo haver a ocorrência de Cambissolos (Sugamoto, 2002).

Para a implantação do NITA, foi realizado o preparo convencional do solo com aração até 0,30 m de profundidade e, posteriormente, gradagem (0,20 m). O solo recebeu lodo de esgoto após ter sido tratado pelo processo N-VIRO® (8 a 10 ton ha⁻¹), para correção da acidez. Em seguida, a área foi cultivada com aveia-preta (*Avena strigosa*) sendo adubada com 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na linha, e com o intuito de promover a cobertura do solo. Em 2013, os valores médios de alguns atributos químicos do solo, na camada de 0-0,20 m, eram 20 g kg⁻¹ para o carbono orgânico total (COT), 5,2 para o Ph, 13 cmol_c kg⁻¹ para CTC, e 60% para saturação de bases (DEISS et al., 2018).

A área total do experimento é de aproximadamente 35 ha e o delineamento experimental está disposto em blocos ao acaso, sendo 3 blocos e sete tratamentos: Floresta plantada (F), Lavoura (L), Pastagem (P), Lavoura-Pecuária (LP), Pecuária-Floresta (PF), Lavoura-Floresta (LF) e Lavoura-Pecuária-Floresta (LPF). As parcelas dos tratamentos possuem área entre 0,2 e 1 ha (área sem pecuária) e acima de 1 ha (áreas com pecuária) (FIGURA 1).

FIGURA 1. CROQUI DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.



FONTE: Google Earth (2021).

LEGENDA: A cor verde delimita o bloco 1 do bloco 2 e vermelha delimita o bloco 2 do bloco 3, as linhas brancas delimitam as parcelas. Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta Plantada (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF).

A adubação do solo de toda a área do experimento tem sido realizada a lanço durante o verão. A recomendação utilizada para os sistemas tomou como base a cultura de maior exigência nutricional, no caso o milho (*Zea mays*), em que foi aplicado 180 kg ha^{-1} de N (ureia), 450 kg ha^{-1} de P_2O_5 (fosfato natural) e 120 kg ha^{-1} de K_2O (cloreto de potássio), com o intuito de repor os nutrientes exportados através dos grãos, da pastagem e, possivelmente, perdidos para o ambiente por escoamento superficial.

No tratamento L tem sido realizada a sucessão de culturas, utilizando como cobertura vegetal de inverno a aveia-preta, e como cultura de verão o milho, sob espaçamento entre plantas de $0,45 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$, totalizando uma população de $88.889 \text{ plantas ha}^{-1}$. O plantio direto da lavoura de verão ocorre na fase final de ciclo da aveia-preta, preferencialmente ainda em fase de enchimento dos grãos. Assim, após a passagem da semeadora a planta senesce sem necessidade de rolar a cobertura, pois o próprio tráfego do

equipamento executa este serviço, caracterizando o plantio ainda sobre “planta verde” sem o uso de herbicidas para dessecação.

No Sistema P, para a pastagem de inverno é plantada a aveia-preta, contudo há ocorrência de ressemeadura natural de azevém (*Lolium multiflorum*), e como pastagem de verão foi implantada o capim Áries (*Megathyrsus maximus*). O pastejo é realizado por animais, cruzados com sangue predominante da raça Angus, desde 2015. Os animais são manejados permanecendo na área durante 10 meses, composto por três animais-testes fixos por parcela e um número variável de animais reguladores com o intuito de manter a carga animal ajustada. Para o ajuste da taxa de lotação do sistema, são realizados semanalmente a medição da altura média do pasto, sendo utilizado um bastão graduado para o monitoramento da altura média do pasto em 150 pontos aleatórios por parcela, mantendo aproximadamente 0,24 m no inverno (aveia-preta) e 0,20 m no verão (capim Áries).

No sistema F foi plantado o eucalipto (*Eucalyptus benthamii*) em 2013, com mudas de origem seminal, utilizando a adubação de 16 g de N/cova, 40 g de K₂O/cova e 40 g de P₂O₅/cova. Com arranjo espacial de 3 x 2 m, obtendo uma densidade final de 1.667 árvores ha⁻¹. Tanto no LPF, LF como na PF as mudas foram plantadas em linhas simples, acompanhando as curvas de nível, tendo espaçamento de 14 m entre renques e de 2 m entre plantas. Assim, obtendo uma densidade final de 250 árvores ha⁻¹, ocupando cerca de 14,3 % da área dos sistemas integrados.

No PF o componente animal seguiu os ajustes da taxa de lotação descrito no sistema P. A adubação neste sistema é feita a lanço com o implemento adubador. No tratamento LF, nos três primeiros anos, foram cultivados a aveia-preta no inverno, e o girassol (*Helianthus annuus*) variedades aguará 4 e aguará e o milho híbridos 2B655HX, 30F53VYHR – precoce e P2866H – superprecoce no verão. A partir de 2015/2016 até a safra de 2020/2021 tem se usado apenas o milho, cultivado no verão. O LP teve início com os componentes da pastagem, até o inverno de 2015, porém sem pastejo, a partir de então iniciou-se o pastejo com animais até o verão de 2016. Em seguida foi estabelecido o primeiro ciclo de lavoura, com a aveia-preta para cobertura do solo no inverno, seguido pelo cultivo de milho no verão de 2017, conforme descrito no tratamento L. Assim, tem-se cumprido ciclos de três anos

de pecuária e um ciclo de lavoura. O sistema integrado LPF, seguiu o mesmo arranjo que o PF, sendo que a primeira linha da lavoura foi a 1 m de distância da linha do eucalipto.

Nos tratamentos com lavoura, entre 2017 até 2019/2020, a colheita do milho ocorreu somente para avaliação de produtividade, em alguns pontos amostrais, permanecendo a maior parte dos grãos nas parcelas, implicando em uma baixa exportação de nutrientes pela colheita. Assim, também não houve tráfego de colhedoras nesse período.

As máquinas utilizadas para as operações mecanizadas na área experimental foram: um trator da marca New Holland, modelo TL 75 E 4x4, com massa aproximada de 3.880 kg, usado no manejo e no plantio; uma colhedora da marca New Holland, modelo TC 59, com massa de cerca de 10.300 kg usada na safra 2016/17. Os implementos utilizados foram uma semeadora da marca Marchesan Tatu, com massa aproximada de 2.595 kg com adubo, uma roçadeira da marca Baldan, com massa de cerca de 1.000 kg, usada para o controle de plantas daninhas, essencialmente nos componentes com pastagem, e uma distribuidora de adubo e calcário da marca Marchesan Tatu, com massa de cerca de 800 kg sem adubo, maiores detalhes podem ser obtidos em (Dominschek et al., 2018).

2.2 AMOSTRAGENS

As amostragens de solo e raízes foram realizadas de forma aleatória dentro das parcelas (FIGURA 2), evitando-se coletar às margens das parcelas, dos bebedouros ou locais onde os animais circulam e permanecem por mais tempo.

FIGURA 2. CROQUI DOS PONTOS DE COLETA DAS RAÍZES E DO SOLO



FONTE: Google Earth (2021).

LEGENDA: Os pontos vermelhos destacam os pontos de coleta das amostras. Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF).

A amostragem para quantificar raízes foi realizada entre o período de dezembro de 2019 à primeira quinzena de janeiro de 2020. A coleta foi realizada neste período devido a maior emissão de raízes das plantas (L – milho verão) e nos sistemas com pastejo, por estimularem o crescimento radicular devido ao consumo do pasto, atrelado com as condições edafoclimáticas da estação (maior radiação solar e precipitação).

Foram coletadas amostras indeformadas de solo com trado tipo caneco conforme a FIGURA 3, (RATUCHNE et al., 2017), (0,058 m de diâmetro por 0,10 m de comprimento, volume $\approx 272 \text{ cm}^3$) para a avaliação de raízes, em quatro pontos amostrais e em três profundidades 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, totalizando 252 amostras.

Nos mesmos pontos e camadas, foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica, da granulometria, da densidade de partículas e do carbono orgânico total do solo. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos de polietileno, vedadas e transportadas para o

laboratório de Física do Solo da UFPR, onde foram processadas. As amostras usadas nas análises de solo foram secas ao ar para então serem processadas. As amostras usadas nas análises de raízes foram armazenadas em ambiente refrigerado a 2 °C, até serem processadas.

FIGURA 3. TRADO DE CANECO PARA COLETA DE RAÍZES E A AMOSTRA INDEFORMADA.



Fonte: MARCOLINO F.C. (2020).

2.3 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada utilizando-se um penetrômetro eletrônico da marca Falker® modelo PenetroLOG®, concomitantemente à amostragem de raízes e de solo. No momento da determinação da RP o solo estava próximo à capacidade de campo. Também foi determinada no laboratório a umidade gravimétrica do solo. O penetrômetro foi configurado para coletar os dados a cada centímetro, até 0,30 m de profundidade, o cone na ponta da haste possui o ângulo de 35,00° ponta padrão B com diâmetro de 12,81 mm. Três medidas de RP foram tomadas em cada ponto amostral (triplicata), totalizando 756 inserções na área experimental. Os dados obtidos foram analisados compondo médias a cada cinco centímetros de profundidade. Entretanto, para as correlações

pretendidas, os dados foram reorganizados em camadas (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30m).

2.4 AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS)

A avaliação visual da estrutura do solo foi realizada no verão nos mesmos pontos amostrais das outras amostragens. A estrutura do solo foi avaliada seguindo o método Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) proposto por Ball et al. (2007) e aprimorado por Guimarães et al. (2011). Realizou-se a amostragem de um monólito de 25 cm de profundidade, 10 cm de espessura e 20 cm de largura (FIGURA 4), no qual procedeu-se a avaliação e atribuição das notas ou escores de qualidade da estrutura do solo.

FIGURA 4. MÉTODO DE AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO



FONTE: MARCOLINO F.C. (2020).

LEGENDA: A: abertura da cova; B: coleta do monólito com a pá reta; C: manuseio e quebra da estrutura nos pontos de fraqueza; D: Estrutura do solo manuseada; E: análise das raízes nos agregados e F: comparação dos agregados com as características descritas na carta do VESS.

As notas atribuídas em cada camada homogênea do solo foram ponderadas com as respectivas camadas identificadas e, calculado a nota do VESS de cada amostra. A qualidade estrutural (Qe) foi analisada obedecendo sua classificação, como boa qualidade estrutural (Qe1) e qualidade pobre (Q5), conforme Guimarães et al. (2011).

2.5 ANÁLISES LABORATORIAIS DE SOLO

2.5.1 Parâmetros radiculares

As amostras de solo com as raízes foram desagregadas manualmente em uma bandeja plástica. Em seguida, adicionou-se água para facilitar a desagregação, levando para um conjunto de peneiras de 2,0; 1,0 e 0,5 mm de abertura de malha, buscando obter o máximo de raízes contidas em cada amostra de solo. Com um jato de água, todo o solo foi removido das peneiras até restar apenas as raízes. A lavagem para cada amostra foi padronizada em 10 repetições e, após a lavagem, as raízes, coletadas com auxílio de uma pinça, foram colocadas em potes de 50 ml contendo álcool 70% e, acondicionadas em temperatura de 2 °C.

Posteriormente, as raízes foram escaneadas através do software WinRhizo®, para obtenção dos seguintes parâmetros: Comprimento da Raiz (CR), Volume de raiz (VR) e Área Superficial Específica (ASE). Após serem escaneadas, as raízes foram pesadas e levadas à estufa de circulação de ar forçada, com temperaturas entre 45 a 65 °C até atingir peso constante. Em seguida foi aferida a massa seca de raízes (MSR) em balança de precisão (MEDEIROS et al., 2005). Por fim, foi calculado o comprimento específico radicular (CER), obtido pela relação entre o comprimento radicular e a massa seca (Eq. 1). As etapas de todos os procedimentos estão ilustradas na FIGURA 5.

Utilizando o volume do trado tipo caneco ($\approx 272 \text{ cm}^3$), foi possível obter valores de CR, VR, ASE, e diâmetro de raiz, por cm^3 de solo e MSR em t/ha^{-1} em cada camada estudada.

$$\text{CER} = \left(\frac{\text{CR}}{\text{MSR}} \right) \quad (1)$$

Em que:

CR – Comprimento radicular (cm), MSR - massa seca das raízes (g).

FIGURA 5. ETAPAS PARA OBTENÇÃO DE DADOS DE RAÍZES.



FONTE: MARCOLINO F.C. (2021).

LEGENDA: A: coleta da amostra entre plantas de milho; B: amostra indeformada de solo; C: amostra deformada em bandeja; D: lavagem do solo para separar as raízes; E: peneiras (1, 2 e 0,5 mm) usadas para coletar as raízes no processo de lavagem; F e G: seleção das raízes e o armazenamento em recipiente com álcool (70%); H: Organização das raízes no WinRhizo® para o escaneamento; I e J: leitura das raízes no equipamento.

2.5.2 Umidade, textura e densidade de partículas do solo

Amostras de solo deformadas foram pesadas e secas em estufa à 105 °C durante 72 h, para a obtenção da massa seca de solo, onde calculou-se a umidade gravimétrica do solo, conforme a equação abaixo:

$$U_g = \left(\frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \quad (2)$$

Em que:

U_g - umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$), M_{su} - massa de solo úmido (g), M_{ss} - massa de solo seco (g).

Para a textura do solo utilizou-se o método do densímetro de Bouyoucos, levando em consideração a Lei de Stokes (GEE e OR, 2002). A densidade de partículas (ρ_p) foi obtida através do método do balão volumétrico, no qual 20 g de solo seco (M_{ss}) foram colocados em um balão volumétrico (50 mL) e adicionado o álcool etílico (V_b) até completar seu volume, fechando-o hermeticamente. Em seguida o balão foi agitado e deixado em repouso durante 24h, após esse período foi adicionado novamente álcool até completar o volume total do balão volumétrico (50 cm^3). O volume de sólidos (V_s) foi obtido pela diferença entre V_t e V_b . A ρ_p foi calculada com a expressão abaixo:

$$\rho_p = \frac{M_{ss}}{50} - V_b$$

(2)

em que: ρ_p – densidade de partículas do solo ($g\ cm^{-3}$), M_{ss} – massa de sólidos (g) e V_b – volume do álcool etílico (cm^3).

TABELA 1. TEXTURA DO SOLO E DENSIDADE DE PARTÍCULAS (ρ_p). VALORES MÉDIOS

SISTEMA	L	P	F	LP	PF	LF	LPF	Classe textural
CAMADA	-----			0,0-0,10 m	-----			
ρ_p	2,55	2,51	2,50	2,54	2,53	2,54	2,48	
Argila	562	504	512	512	537	525	595	Argilosa
Silte	145	100	100	166	104	108	100	
Areia	291	395	387	320	358	366	304	
CAMADA	-----			0,10-0,20 m	-----			
ρ_p	2,40	2,54	2,62	2,53	2,54	2,57	2,57	
Argila	541	525	466	487	554	558	508	Argilosa
Silte	125	83	91	100	83	104	83	
Areia	333	391	137	412	362	337	408	

CAMADA	0,10-0,30 m							
pp	2,50	2.36	2.56	2.50	2,56	2,56	2,56	
Argila	545	504	529	546	429	437	508	
Silte	126	100	137	133	108	117	83	Argilosa
Areia	327	395	333	321	462	446	408	

FONTE: O autor (2021).

LEGENDA: Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF).

2.5.3 Análise do carbono orgânico total (COT)

Para a determinação do COT, amostras deformadas de solo foram secas em estufa de circulação de ar forçado à 45 °C, durante 24 horas. O COT foi determinado segundo o método colorimétrico (QUAGGIO e RAIJ, 1979).

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

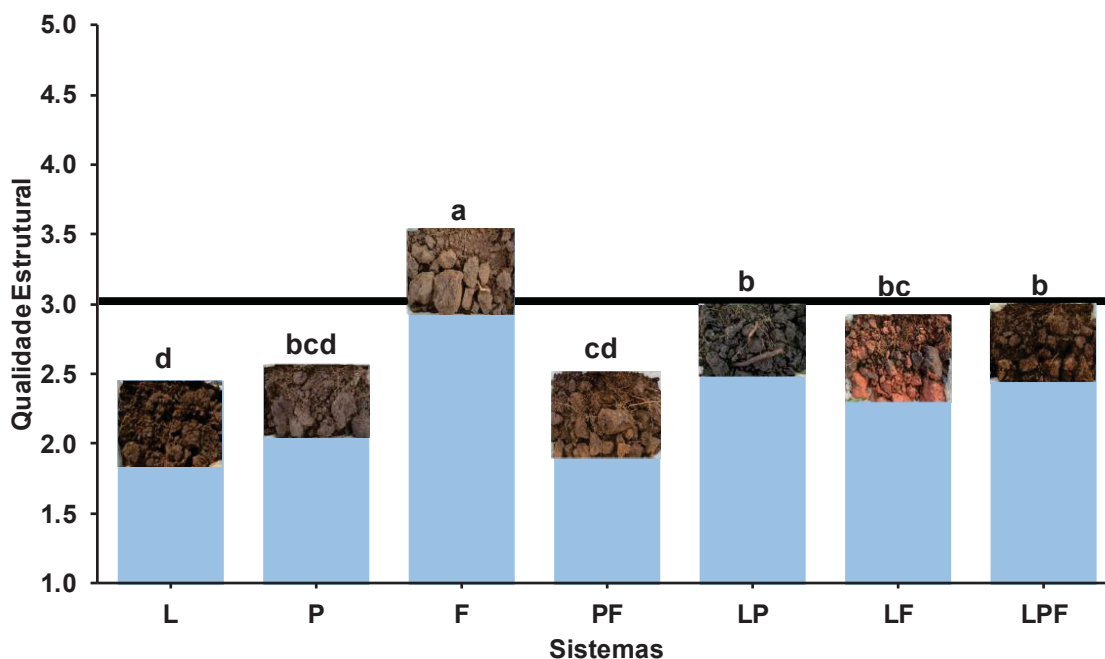
Os dados dos parâmetros de raízes, COT, RP e VESS foram submetidos ao teste de homogeneidade de variância (Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk). Aqueles que não atingiram os pressupostos de normalidade (RP e algumas variáveis de raízes) foram submetidos à transformação Boxcox (Box e Cox, 1964) que transforma os dados por intermédio da função logarítmica. Em seguida os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para verificar a correlação entre as variáveis estudadas os parâmetros de raízes, COT, RP e VESS foram pareados, através das médias por camada, e submetidas à análise multivariada de correlação de Spearman ($p < 0,05$) e análise de componentes principais (PCA). Análises de regressão também foram realizadas para a determinação das relações entre as variáveis. Também foi usado o intervalo de confiança (IC) a 10%, para a comparação das médias de RP entre intervalos de profundidade de cinco em cinco centímetros. As análises estatísticas foram realizadas no ambiente software R® (TEAM R CORE, 2020).

3 RESULTADOS

3.1 AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO

A estrutura do solo, avaliada pelo VESS, apresentou diferença estatística entre os sistemas agropecuários de produção estudados (FIGURA 6). O sistema F foi estatisticamente diferente aos demais sistemas (FIGURA 6). No entanto, este sistema apresentou uma nota considerada aceitável, não havendo necessidade de mudanças no manejo do solo. Entre os sistemas isolados, o L e o P não diferiram entre si, mas comparando com os sistemas integrados, a L apresentou a menor média comparado aos sistemas LP, LF e LPF. Por outro lado, o P foi estatisticamente igual aos sistemas integrados (PF, LP, L e LPF). Apesar de os sistemas apresentarem estruturas com qualidade aceitável pode se observar na FIGURA 6 a variação da estrutura após ser manuseada para determinação das notas, os sistemas L, P, LP, LPF apresentaram mais raízes.

FIGURA 6 – QUALIDADE DA ESTRUTURA DO SOLO, DETERMINADO PELO VESS NOS SISTEMAS AGROPECUÁRIOS.



FONTE: O autor (2021)

LEGENDA: Médias seguidas com as mesmas letras não diferem entre si, estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem

(LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF). A linha contínua representa o limite para indicação de mudança de manejo ($Q_e > 3$).

3.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES

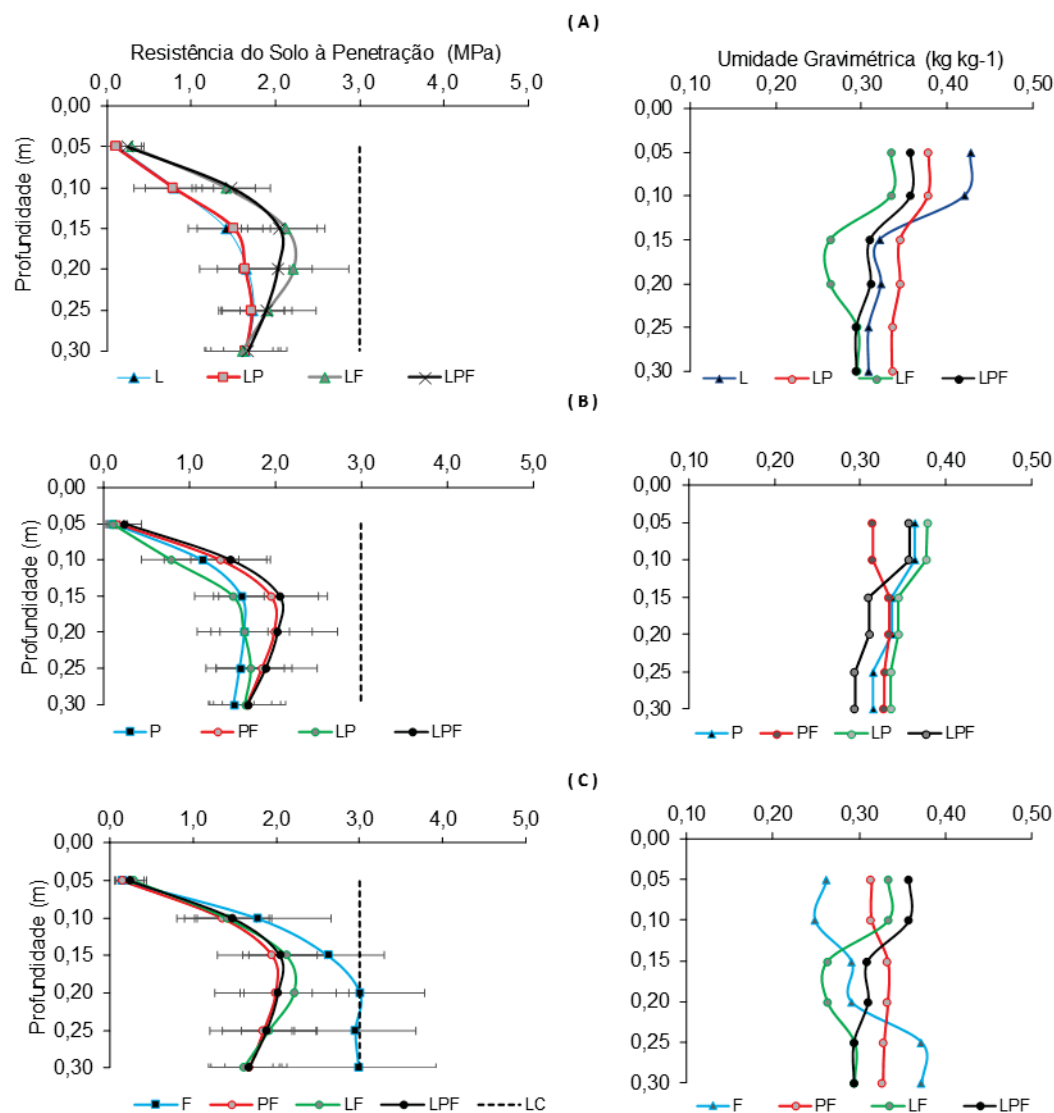
O GRÁFICO 2 apresenta valores médios de resistência à penetração de raízes (RP) e de umidade do solo nos sistemas, comparando os integrados com o componente do sistema simples que os compõe. Em todos os sistemas, menores valores de RP foram observados na camada superficial (0-0,10 m), e foram atrelados com a umidade do solo e com a estrutura do solo agregada pelas raízes.

As médias de RP comparadas pelo intervalo de confiança (90%) não apresentaram diferenças estatísticas na maioria das profundidades estudadas. Entretanto, menores valores médios de RP foram observados nos componentes L e LP comparando com o LF e LPF, entre 0,05 e 0,15 m de profundidade. Os sistemas com componente L apresentaram RP <2,5 MPa. Observa-se similaridade de RP entre os sistemas L e LP, assim como LF e LPF, nas camadas entre 0,10 e 0,25 m de profundidade (GRÁFICO 2 A).

Similarmente ao que houve com o componente L, a RP aumentou até 0,15 m de profundidade nos sistemas com P (GRÁFICO 2B), mantendo-se relativamente uniforme em profundidades maiores. Os sistemas PF e LPF apresentaram resultados similares de redução da RP entre todas as profundidades.

Para o componente F, em todos os sistemas estudados, foi observado que a RP tende a elevar-se mais claramente entre 0,10 e 0,20 m (GRÁFICO 2 A, B e C). Enquanto, ao comparar o sistema F com os respectivos integrados que o compõem, há diferenças significativas abaixo de 0,15 m, onde F apresentou RP acima de 2,5 MPa, alcançando a RP crítica ou limitante (3 MPa), a partir desta camada. Contudo, é possível notar que de todos os sistemas foi o que apresenta conteúdo de água abaixo de 30%, com exceção das camadas mais profundas (>0,20m).

GRÁFICO 2. RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES E UMIDADE DO SOLO, DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO COM COMPONENTE LAVOURA (A), PASTAGEM (B) E FLORESTA (C).



Fonte: O autor (2021)

Legenda: Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF). As barras horizontais indicam o intervalo de confiança de 90%. A linha vertical tracejada representa a RP considerada limite crítico para os sistemas.

Valores médios de RP por camadas estão apresentados na TABELA 2. Estatisticamente, o sistema F diferiu da L e LP na camada de 0-0,10 m, enquanto na camada de 0,10-0,20 a maior RP foi observada entre o F, PF, LF e LPF, em comparação com as demais. Enquanto na camada de 0,20-0,30 m apenas o F e LPF foram estatisticamente superiores.

TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES (RP), NAS CAMADAS ESTUDADAS.

Sistemas	L	P	F	PF	LP	LF	LPF	CV (%)
CAMADAS								
(m)	-----RP (MPa)-----							
0.00 - 0.10	0,46 b	0,60 ab	1,00 a	0,75 ab	0,50 b	0,85 ab	0,90 a	21,7
0.10 - 0.20	1,53 b	1,60 b	2,81 a	1,96 ab	1,60 b	2,17 ab	2,00 ab	17,5
0.20 - 0.30	1,69 b	1,60 b	2,90 a	1,8 b	1,70 b	1,80 b	2,05 ab	20,6

FONTE: O autor (2021)

LEGENDA: Médias seguidas com as mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre sistemas de produção. Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF). CV: Coeficiente de variação.

Dados de carbono orgânico total (COT) estão apresentados na TABELA 3. Não foi constatada diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os sistemas de produção nas camadas estudadas. Porém, constatou-se redução do teor de COT com o aumento da profundidade.

TABELA 3 – VALORES MÉDIOS DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT) DO SOLO NAS CAMADAS ESTUDADAS.

Sistemas	L	P	F	PF	LP	LF	LPF	CV (%)
CAMADAS								
(m)	-----COT (g kg ⁻¹)-----							
0.00 - 0.10	54,8 ^{ns}	51,4	50,3	43,0	48,5	46,7	54,9	14,1
0.10 - 0.20	34,9 ^{ns}	40,8	37,1	39,5	39,0	36,0	42,3	12,0
0.20 - 0.30	33,7 ^{ns}	37,2	36,8	44,6	32,0	33,5	37,6	19,2

FONTE: O autor (2021).

LEGENDA: ns: não significativo pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre sistemas de produção. Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF). CV: Coeficiente de variação.

3.3 PARÂMETROS RADICULARES

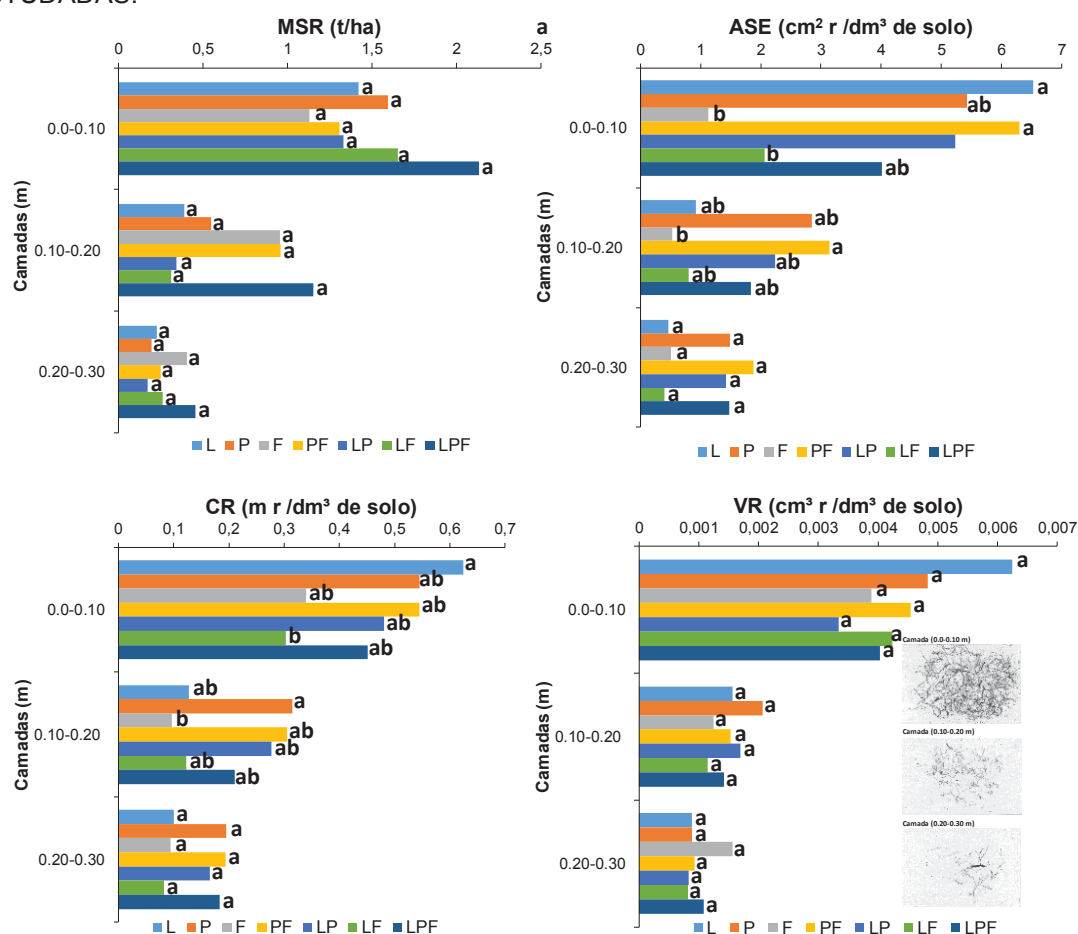
Os parâmetros radiculares avaliados nas três camadas estudadas, com as variáveis MSR, CR, VR e ASE estão apresentadas na GRÁFICO 3. Para a MSR as médias são estatisticamente iguais nos tratamentos (L, P, F, PF, LP, LF e LPF) e camadas estudadas. Para o CR, o sistema L destaca-se com a maior média na camada 0,0-0,10 m, porém estatisticamente foi diferente apenas do LF, por ter apresentado a menor média da camada. Na camada 0,10-0,20 m, o sistema P diferiu estatisticamente do F no CR, apresentando a menor média

entre os tratamentos estudados, enquanto na camada 0,20-0,30 m os sistemas foram iguais estatisticamente.

O sistema LF foi estatisticamente inferior ao L e PF na camada 0,0-0,10 m na variável ASE, enquanto nas camadas subsequentes os sistemas não diferiram estatisticamente. Na variável VR os sistemas L e P se destacam no gráfico, porém não diferem dos demais, apresentando médias iguais dos sistemas nas camadas estudadas.

De forma geral, as variáveis apresentaram comportamento similar de redução com a profundidade. Na variável VR é observado no lado direito o retrato fotográfico da concentração das raízes nas camadas estudadas, obtidas no WinRhizo®, evidenciando assim os resultados de concentração de raízes em profundidade.

GRÁFICO 3 – PARÂMETROS RADICULARES - MASSA SECA DE RAÍZES (MSR), COMPRIMENTO RADICULAR (CR), VOLUME RADICULAR (VR), ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (ASE), EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, NAS CAMADAS ESTUDADAS.



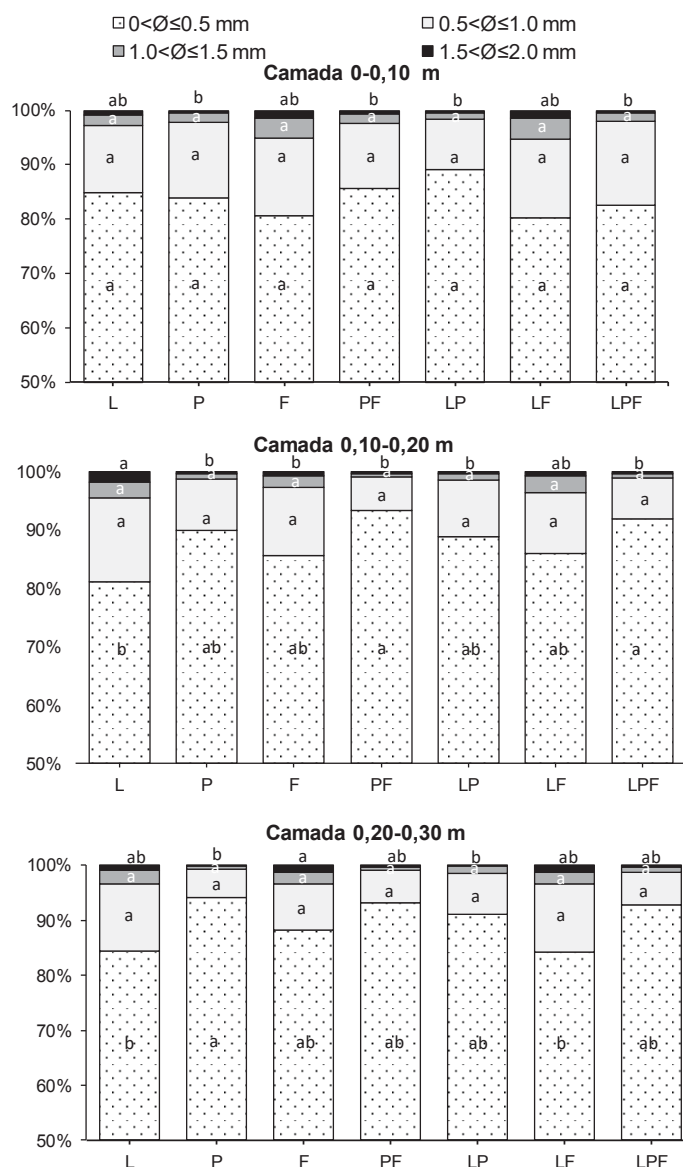
FONTE: O autor (2021)

LEGENDA: Médias seguidas com as mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre sistemas de produção, Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF).

Na GRÁFICO 4 os resultados da camada 0-0,10 m as médias não diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), nas diferentes classes de diâmetros ($0 < \varnothing \leq 0,5$; $0,5 < \varnothing \leq 1,0$; $1,0 < \varnothing \leq 1,5$ e $1,5 < \varnothing \leq 2,0$ mm) entre os sistemas de produção. Entretanto, os sistemas L, F e LF tiveram maiores percentagens. O diâmetro das raízes finas $0 < \varnothing \leq 0,5$ mm, representaram em média 87% em todas as camadas estudadas, seguindo dos diâmetros $0,5 < \varnothing \leq 1,0$ mm (10%); $1,0 < \varnothing \leq 1,5$ mm (<2%) e $1,5 < \varnothing \leq 2,0$ mm (<1%). Isto indica maior concentração de raízes finas $0 < \varnothing \leq 0,5$ mm independentemente dos sistemas de produção avaliados.

Na camada de 0,10-0,20 m, o sistema LPF e PF apresentaram percentagens de diâmetro radicular de $0 < \varnothing \leq 0,5$ mm estatisticamente superior ao sistema L. Enquanto, que nos diâmetros de $0,5 < \varnothing \leq 1,0$ mm e $1,0 < \varnothing \leq 1,5$ mm não houve diferença estatística entre os sistemas. Já para o diâmetro radicular de $1,5 < \varnothing \leq 2,0$ mm o L diferiu dos demais sistemas exceto o LF. Na camada 0,20-0,30 m o diâmetro $0 < \varnothing \leq 0,5$ mm apresentou diferença estatística do sistema P comparado aos sistemas L e LF. As médias dos diâmetros $0,5 < \varnothing \leq 1,0$ mm e $1,0 < \varnothing \leq 1,5$ mm não diferiram estatisticamente nos sistemas de produção, e no diâmetro $1,5 < \varnothing \leq 2,0$ mm o sistema P e LP foram estatisticamente inferiores ao F, mas não diferiu dos demais sistemas (L, PF, LF e LPF).

GRÁFICO 4 – PERCENTAGEM DE COMPRIMENTO RADICULAR EM DIFERENTES CLASSES DE DIÂMETRO, EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, NAS CAMADAS ESTUDADAS.



FONTE: O autor (2021).

LEGENDA: Ø: Diâmetro das Raízes. Lavoura (L), Pastagem (P), Floresta (F), Lavoura Pastagem (LP), Pastagem Floresta (PF), Lavoura Floresta (LF) e Lavoura Pastagem Floresta (LPF). Médias seguidas pelas mesmas letras, não diferem entre tratamentos pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

3.4 QUALIDADE ESTRUTURAL VERSUS PARÂMETROS RADICULARES

As variáveis (COT, RP, VESS, CR, VR, ASE, MSR, CE, $0 < \text{Ø} \leq 0,5$ mm, $0,5 < \text{Ø} \leq 1,0$ mm, $1,0 < \text{Ø} \leq 1,5$ mm e $1,5 < \text{Ø} \leq 2,0$ mm), submetidas à correlação de Spearman, apresentaram diversas correlações significativas. O VESS apresentou correlação negativa com todas as variáveis de raízes estudadas,

com exceção da ASE, onde obteve correlação positiva. Similarmente ao VESS, a RP também apresentou correlações significativas negativas para com as variáveis de raízes, sendo não significativo para ASE. Isto indica, que o aumento de RP e da nota do VESS implica em redução do CR, VR, MSR, CE, e dos comprimentos de raízes nas classes de diâmetros $0 < \varnothing \leq 0,5\text{mm}$, $0,5 < \varnothing \leq 1,0\text{mm}$, $1,0 < \varnothing \leq 1,5\text{mm}$ e $1,5 < \varnothing \leq 2,0\text{ mm}$. Também houve correlações positivas entre o COT e todos os parâmetros radiculares, demonstrando a importância delas em aumentar o COT. O VESS apresentou correlação forte positiva com a RP (0,70) e negativa com o COT. De forma geral as variáveis de do solo (RP e VESS) apresentaram correlação negativa com os parâmetros radiculares e COT.

Os dados das variáveis de raízes e de solo também foram agrupados e submetidos à Análise de Componentes Principais – (Principal Component Analysis – PCA) (GRÁFICO 5). Aonde o primeiro componente (PCA 1) explica 70,29% das variáveis e o segundo componente (PCA 2) explica 11,75%, sendo que os dois componentes acumularam cerca de 78,53 % do total da variância.

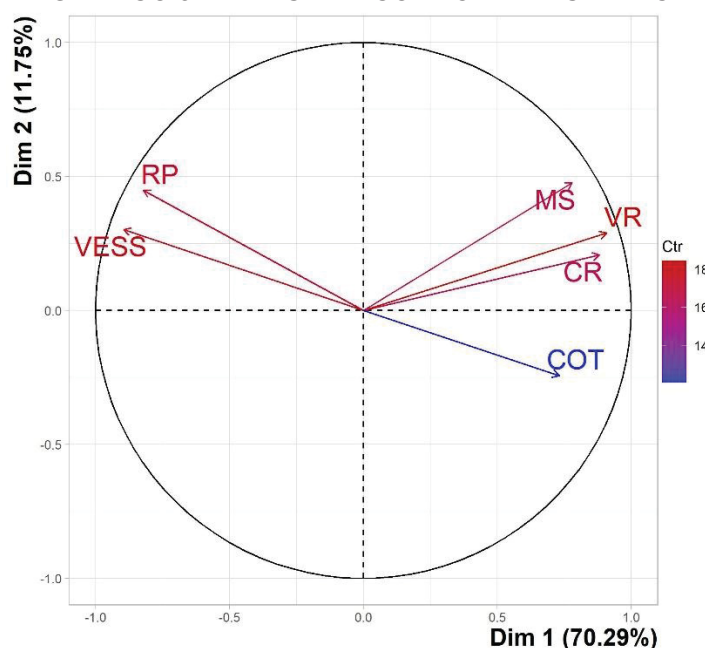
No GRÁFICO 5, a componente 1 apresenta as variáveis das raízes (CR, VR, MSR) e COT classificadas como as que mais estão correlacionadas e caracterizadas na coordenada positiva do eixo 1. As variáveis VESS e RP estão correlacionadas e caracterizadas na coordenada negativa do eixo 1.

TABELA 4. CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE AS VARIÁVEIS ESTUDADAS. CORRELAÇÕES POSITIVAS EM NEGRITO E NEGATIVAS EM ITÁLICO.

	CR	Ø Médio	VR	ASE	Ø 0.0-0.5	Ø 0.5-1.0	Ø 1.0-1.5	Ø 1.5-2.0	MSR	COT	RP	VESS
	cm	mm	cm ³	cm ² cm ⁻³	mm	mm	mm	mm	t ha ⁻¹	g kg ⁻¹	MPa	
CR	1	-0.1109ns	0.8292***	-0.1594*	0.9942***	0.8623***	0.5917***	0.4442***	0.6822***	0.3171***	-0.5623***	-0.4921***
Ø Médio		1	0.4036***	-0.0002ns	-0.1891**	0.2778***	0.5790***	0.6308***	0.4525***	0.1411**	-0.1855**	-0.2784***
V			1	-0.1567**	0.7805***	0.9167***	0.8226***	0.7250***	0.8846***	0.3410***	-0.5930***	-0.5742***
ASE				1	-0.1587**	-0.1661**	-0.1457**	-0.0974ns	-0.10733ns	-0.0196ns	0.0143ns	0.1534**
Ø 0.0-0.5					1	0.8141***	0.5261***	0.3851***	0.6357***	0.2966***	-0.5300***	-0.4512***
Ø 0.5-1.0						1	0.8010***	0.6213***	0.7715***	0.3327***	-0.6170***	-0.6179***
Ø 1.0-1.5							1	0.8134***	0.7157***	0.2992***	-0.5598***	-0.5994***
Ø 1.5-2.0								1	0.6907***	0.3220***	-0.5024***	-0.4828***
MSR									1	0.3605***	-0.5506***	-0.5090***
COT										1	-0.3939***	-0.4430***
RP											1	0.7041***
VESS												1

LEGENDA: Comprimento Radicular (CR), Volume Radicular (VR), Área Superficial Específica (ASE), Massa Seca de Raízes (MSR), Comprimento Radicular em Classes de Diâmetro de Raiz (0<Ø≤0,5; 0,5<Ø≤1; 1,0<Ø≤1,5 e 1,5<Ø≤2,0 mm) e Diâmetro Médio (Ø MÉDIO). *: p<0,05; **: p<0,01; ***: p<0,001; ns: não significativo.

GRÁFICO 5. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.



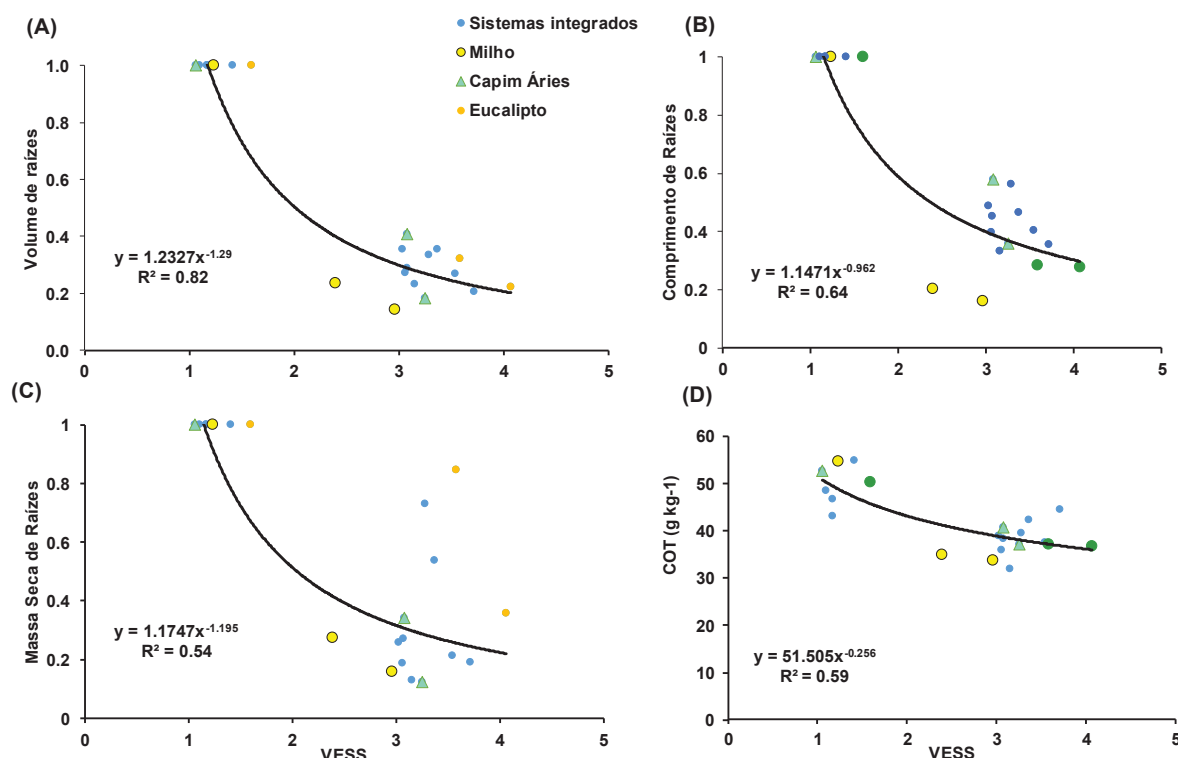
FONTE: O autor (2021).

LEGENDA: Comprimento Radicular (CR), Volume Radicular (VR), Massa Seca (MSR), Carbono Orgânico Total (COT), Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) e Resistência do Solo à Penetração (RP).

A correlação entre as variáveis VESS e RP e ambas se correlacionam negativamente com o COT e os parâmetros radiculares, corroboram com a correlação de Spearman (Tabela 4). Quanto aos parâmetros radiculares e o COT, a correlação entre si é positiva (GRÁFICO 5), o que já era esperado, uma vez que estes contribuem para a matéria orgânica do solo.

Devido às fortes correlações encontradas entre as variáveis, foram analisadas as relações das variáveis de raízes e do COT com o VESS, através de análises de regressão (GRÁFICO 6). Pode-se constatar que há uma relação potencial negativa com o aumento do VESS, na qual o VR (Gráfico 4A) apresentou o mais elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,82$), o que indica uma confiabilidade de 82% no efeito do aumento do VESS sobre a redução do VR. Quanto à CR, o aumento da nota do VESS diminui o comprimento radicular ($R^2 = 0,64$) (GRÁFICO 4B), comportamento similar ao VR x VESS, também foi constatado para MSR ($R^2 = 0,54$) e o COT ($R^2 = 0,59$). Também é possível destacar, através do coeficiente angular da regressão, maior impacto da nota do VESS sobre o VR, entretanto este aumento afeta significativamente, o CR, a MSR e, consequentemente, o COT.

GRÁFICO 6 – RELAÇÕES DOS PARÂMETROS RADICULARES E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM FUNÇÃO DAS NOTAS ATRIBUÍDAS NA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS).



FONTE: O autor (2021).

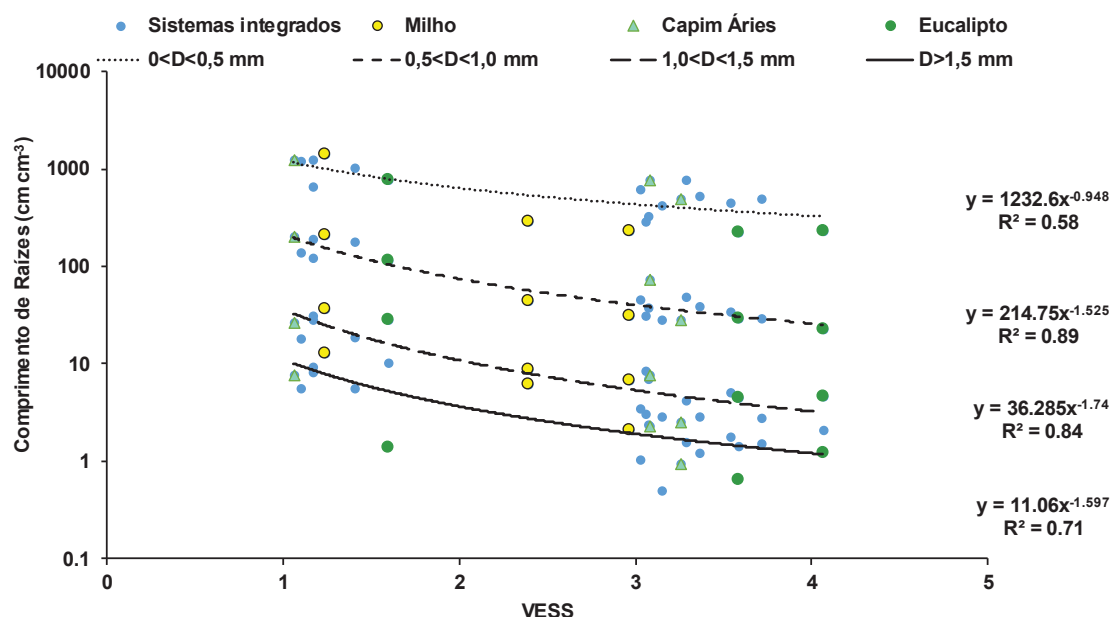
LEGENDA: Volume Radicular- VR (A), Comprimento Radicular- CR (B), Massa Seca de raízes- MSR (C), Carbono Orgânico Total- COT (D). Milho: Lavoura, Capim Áries: Pastagem, Eucalipto: Floresta, Sistemas integrados (Lavoura Pastagem – LP, Pastagem Floresta - PF, Lavoura Floresta – LF e Lavoura Pastagem Floresta – LPF).

As diferentes classes de diâmetro radicular obtiveram relações significativas contra o VESS (GRÁFICO 7). O comprimento de raízes nas diferentes classes de diâmetro diminui potencialmente à medida que a qualidade estrutural (Qe) determinada pelo VESS, se reduz, uma vez que quanto maior a nota do VESS menor será a qualidade estrutural do solo. As classes mais afetadas pela estrutura do solo foram $1,0 < \varnothing \leq 1,5$ e $1,5 < \varnothing \leq 2,0$ mm, verificados pelo coeficiente angular das equações, indicando que à medida que a estrutura do solo vai se degradando, a presença dessas classes de raízes torna-se mais reduzida. Já a classe de raízes mais finas $0 < \varnothing \leq 0,5$ mm apesar de aumentarem com a condição da nota baixa do VESS e valores menores de RP, e de ser negativamente afetada, pouco se altera com o aumento da nota do VESS de 3 para 4.

Os sistemas de produção influenciaram nas maiores concentrações de CR, os sistemas integrados e solteiros apresentaram as maiores concentrações de CR por

diâmetro nas notas menores (<3 Qe) do VESS, enquanto menores concentrações de CR por diâmetro foram verificadas quando o VESS atingiu notas maiores (>3 Qe).

GRÁFICO 7 – RELAÇÕES DO COMPRIMENTO DE RAÍZES SOB DIFERENTES CLASSES DE DIÂMETROS EM FUNÇÃO DAS NOTAS ATRIBUÍDAS NA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS).



FONTE: O autor (2021).

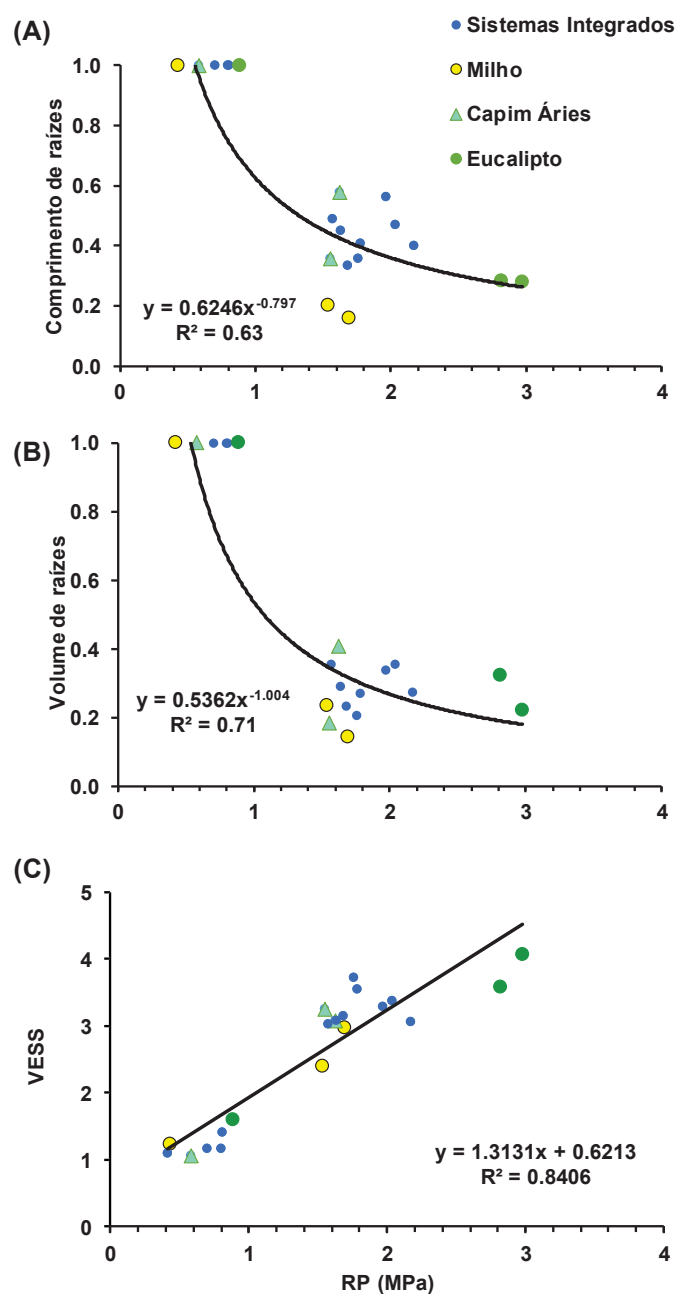
LEGENDA: D: diâmetro de raízes nos sistemas com Milho, Capim Áries, Eucalipto e Sistemas integrados.

No Gráfico 8 estão apresentadas as relações de comprimento e volume radicular, assim como do VESS, relacionado à RP. As variáveis CR ($R^2=63$) e VR ($R^2=71$) reduzem potencialmente com o aumento da RP (GRÁFICO 8AB). É possível observar que tanto para o VR quanto para o CR, valores médios de RP maiores que 1,5 MPa impactam drasticamente as raízes, nas quais se concentram na faixa entre 1,5 a 2,5 MPa e, que as raízes no sistema com o eucalipto se desenvolvem sob RP em torno de 3,0 MPa, porém sob valores relativos mais reduzidos.

Os dados do VESS x RP (GRÁFICO 8C) tiveram uma relação positiva ($R^2 = 0,84$), sendo que à medida que aumenta a RP observa-se o aumento do VESS. Vale ressaltar que as condições de umidade do solo estavam próximas à capacidade de campo. Assim, tem-se que notas de Qe entre 3 e 4, apresentam valores médios estimados de RP entre 1,81 e 2,57 MPa. Quando avaliado os sistemas de produção, pode se observar que o sistema com floresta se destaca nas maiores notas do

VESS e RP, ao passo que as menores notas são observadas nos sistemas integrados, milho e pastagem.

GRÁFICO 8 – RELAÇÃO DO COMPRIMENTO (CR), VOLUME DE RAÍZES (VR), NOTAS DA AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO (VESS) COM A RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES (RP).



FONTE: O autor (2021).

LEGENDA: Milho: Lavoura, Capim Áries: Pastagem, Eucalipto: Floresta e Sistemas integrados.

4 DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO

Os resultados da qualidade estrutural do solo foram considerados adequados no sentido de conferir a qualidade aceitável segundo a carta do VESS (GUIMARÃES et al., 2011). O sistema F apresentou características de agregados, com pouca porosidade, agregados arredondados e angulados e poucas raízes finas em relação aos demais sistemas. Nos sistemas L, P e PF, é possível observar agregados menores e arredondados, o que propiciou os menores valores médios de VESS. Apesar das diferenças estatísticas encontradas, todos os sistemas possuem uma boa qualidade estrutural. O que implica em solo com a qualidade física adequada para o desenvolvimento das culturas agrícolas e não agrícolas.

Os sistemas L e P apresentaram médias (2,35 e 2,33) próximas as notas (2,40 e 2,25) encontradas por Eurich et al. (2014) no sistema de L e P, ele atribui a esses resultados a influência do manejo, que consiste no plantio direto (PD), manejo de rotação de culturas. Para além destas características supracitadas, as raízes influenciaram na qualidade da estrutura encontrada neste trabalho. Os resultados (FIGURA 6) podem ser atribuídos ao manejo adequado da pastagem que consiste em adubação, pastejo moderado, sucessão de gramíneas de inverno e verão, e redução de movimentação de máquinas agrícolas, no controle de invasora por roçadeira e/ou outras operações de manejo.

Segundo Carvalho et al. (2018) e Salton et al. (2014) o manejo adequado da pastagem estimula a rebrota do pasto e o maior crescimento das raízes à medida que o animal se alimenta. O crescimento de raízes e novas folhas, conseqüentemente, a maior deposição de matéria orgânica em profundidade, liberação de exsudado por raízes que estimula a atividade de microrganismos e atua como agregador das partículas de solo, formação de galerias após a morte das raízes que torna a estrutura mais porosa e influência na circulação da água e o crescimento de novas raízes.

O sistema F apresentou a maior média (3,33) da qualidade estrutural do solo (Qe) comparando com os demais sistemas estudados, e esta nota encontrada através do método do VESS é um indicador de que o sistema apresenta estrutura aceitável, porém quando a nota de Qe está com tendência a aumentar para 4 é necessário o monitoramento, pode é uma nota de alerta para mudança de manejo

(BALL et al., 2007). Portanto, notas mais elevadas podem ser decorrentes das condições atreladas a área de estudo, que possui histórico de solo degradado (Dominschek et al., 2018). O que está ocorrendo é que o solo está se recuperando de forma mais lenta no F devido à redução de componentes produtivos (L e P) e, consequentemente, a redução da concentração de raízes nas camadas superficiais. Cruvinel Furquim et al. (2020) avaliaram a RP em sistemas integrados e isolados com pastagens degradadas, e concluíram que a menor RP foi proporcionada pela diversidade de espécies no tratamento. Nesse sentido, pode-se destacar o sombreamento das árvores e a presença de plantas invasoras, uma vez que não há controle químico delas. Além disso, a área de estudo possui um histórico de solo degradado. Portanto, levando em consideração que a área está se recuperando da degradação, a Qe pode ainda apresentar efeitos decorrentes do seu histórico.

Os resultados observados nos sistemas PF (2,30), LP (2,77), LF (2,70) e LPF (2,79) estão próximos dos resultados encontrados por Ferreira (2015) quando avaliou e caracterizou a estrutura do solo em diferentes sistemas de uso em Latossolo, obtendo valores de 2,7 e 2,5, respectivamente para LP e LPF. A autora relaciona esses resultados encontrados à prática do PD e ao pisoteio animal, ao comparar com a floresta nativa. Ainda os sistemas LP e LPF tiveram Qe maiores e que, os animais e a circulação de máquinas influenciaram nos resultados. Enquanto para o presente estudo, os resultados de RP obtidos possam ter sido atrelados, tanto devido ao histórico de degradação da área (DOMINSCHEK et al., 2018) e ao tráfego de máquinas agrícolas, há de se pontuar que onde há o componente florestal foram realizados desbastes e remoção do caule lenhoso em 2015.

De forma geral, nas áreas de P, a Qe dos sistemas está dentro do que é adequada de acordo com a carta do VESS, parte destes resultados é atribuído ao capim Aries, por ser uma gramínea com alta produtividade de biomassa, que influencia na incorporação da matéria orgânica e retenção de água do solo (ANRADE et al., 2021).

O método para avaliar visualmente a estrutura solo foi eficiente, com facilidade, praticidade e rapidez na obtenção de resposta da Qe do solo nos sistemas de produção (GUIMARÃES et al. 2017; CHERUBIN et al., 2017).

4.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NOS SISTEMA DE PRODUÇÃO

A RP dos sistemas de produção (GRÁFICO 2) mostrou resultados médios menores (1,0 MPa) na camada 0,0 a 0,10 m com valores próximos a 3MPa na camada >0,10 m para o sistema F. Resultados próximos foram observados por Sartor et al. (2020) quando avaliavam a RP em sistema silvipastoril, onde observaram RP menores na camada de 0,0 a 0,5 m. Os autores atrelaram este resultado ao sistema radicular da pastagem, folha das árvores e a cobertura vegetal aportado no sistema. Para este trabalho se atribui os resultados menores de RP a maior concentração de raízes (GRÁFICO 3) na camada superficial devido à diversidade de componentes produtivos. Pois, a concentração de raízes pode melhorar a qualidade da estrutura do solo.

O componente L e os sistemas que o contém na integração apresentaram comportamentos similares da RP no perfil do solo (GRÁFICO 2A). Resultado similar foi verificado por Da Silva et al. (2012) quando avaliavam a qualidade da estrutura do solo em sistema de plantio direto em um Latossolo vermelho, verificando aumento da RP na camada de 0,07 a 0,15 cm. Quando comparado o L e LP a média da resistência apresentada foi similar desde o primeiro centímetro (0,1 m) ao último centímetro avaliado (0,30 m), para estes dois sistemas foi registrado valores abaixo de 2MPa e de 3 MPa para o F. Estes resultados foram considerados adequados por vários pesquisadores (MORAIS et al., 2020; DE VARES ROSSETTI e CENTURION, 2017) por não causar problemas no desenvolvimento das culturas sob PD. Enquanto Blainski et al. (2008) consideram RP limitante a partir de 2,5 MPa, independentemente do sistema. Por outro lado, Klein e Rodrigo (2007) encontraram na RP de 2MPa limitações no crescimento de raízes na cultura da soja. Ou seja, existe divergências quanto a RP limitante nas culturas agrônômica.

Para o componente pastagem (GRÁFICO 2B) também apresentou similaridade nos valores médios de RP. O componente F (Gráfico 2C) se destaca atingindo valores de 3 MPa, tornando o F o sistema com valores médios maiores de RP para profundidades >0,15 m. Resultados próximos foram observados por Sartor et al. (2020) nas profundidades >0,20 m, os autores atrelaram este resultado ao sistema radicular arbóreo. Os resultados de RP observados neste trabalho podem ser atrelados à baixa influência radicular de componentes produtivos com o sistema radicular abundante e, esta RP pode estar relacionada ao histórico de degradação que a área sofreu durante os anos que se praticava o preparo de solo convencional

e treinamento de máquinas agrícolas, não tendo ainda se reestruturado, como ocorreu nos outros sistemas estudados.

O sistema mais complexo PF apresentou RP de 0,75 a 2 MPa. Resultados de RP diferentes foram verificados por Polanía-Hincapié et al. (2021) quando avaliavam a RP no sistema Silvipastoril em Latossolo degradado, com valores de 3,77 MPa. Segundo os autores, apesar de ser um valor alto, foi observado melhorias em relação ao seu estado inicial, portanto os autores apontam o sistema PF como sendo eficiente para restaurar a qualidade estrutural do solo.

As médias de RP apontaram diferenças estatísticas entre os sistemas de produção (TABELA 2). Os sistemas de produção manejados com semeadura direta e livres de pesticidas, apresentaram resultados de RP <3MPa. Segundo Klein e Rodrigo (2007) tal condição pode ser considerada adequada para os sistemas que realizam PD, uma vez que o sistema plantio direto usa métodos de conservação do solo que reduz o impacto da RP sobre os componentes produtivos.

Quando comparados os sistemas com componente L, P e F, o F apresentou valores médios nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m estatisticamente superiores ao L e P (TABELA 2), mas que não ultrapassaram o limite crítico de 3 MPa. Segundo Moraes et al. (2014) em Latossolos sob PD aponta o limite crítico de RP em sistemas estabelecidos de plantio direto pode ser considerado 3,5 MPa. Resultados diferentes foram encontrados por De Vares Rossetti e Centurion (2017) estudando a RP crítica na lavoura de milho em Latossolo vermelho distrófico, onde registraram RP de até 3,95 MPa, mas que não influenciou negativamente na produtividade da lavoura.

4.3 CARBONO ORGÂNICO EM SISTEMA DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

A variável COT analisada não apresentou diferenças estatísticas entre os sistemas, nas camadas avaliadas (TABELA 3). Resultados semelhantes foram relatados por Buss (2015), que avaliou a estrutura do solo em diferentes sistemas e usos, não verificando diferenças estatísticas. O autor relacionou este fato por se tratar de uma área sob Latossolo Bruno com elevados teores de matéria orgânica e, ao ambiente de formação ser mais frio, o que diminui a decomposição e eleva o teor de COT no solo.

Os dados de COT encontrados variaram em média de 54,9 a 32 g kg⁻¹. De acordo com o Manual de Adubação do Estado do Paraná o carbono orgânico maior igual a 20 g kg⁻¹ é considerado muito alto (PAULETTI e MOTTA, 2019). Segundo Wiesmeier et al. (2019) a alta concentração do COT pode ser influenciada pela mineralogia do solo, micro-organismos, fauna do solo, agregação, textura e clima. Diante dos resultados expostos (TABELA 3), a alta concentração de COT pode ser atribuída à concentração de material orgânico, proporcionado pelo manejo adotado, o não revolvimento do solo e diversidade de componentes produtivos, que influenciam na deposição de raízes em profundidade. Pois, segundo Salton et al. (2014) estes fatores, supracitados, podem exercer influência pela deposição de matéria orgânica no solo tanto na superfície quanto em profundidade, que proporciona a concentração de COT nos sistemas e nas camadas estudadas.

Em vista dos argumentos já apresentados, vale ressaltar que a alta concentração do COT nos sistemas é relacionado a não realização da colheita de duas safras, isto ocorreu devido à falta de mão de obra para colheita manual e a infestação da Corda de viola (*Ipomoea purpurea*) que inviabilizou a colheita mecanizada, levando em consideração o equipamento disponível para colheita. No entanto a lavoura permaneceu no campo até o outro plantio, a falta da colheita pode ter reduzido a exportação de nutrientes do solo, aumentando a cobertura do solo, deposição das raízes do milho em profundidade e consequentemente influenciar na alta concentração do COT. Pesquisa conduzida por Moraes et al. (2020) em área de canavial no latossolo, avaliaram o efeito da remoção total da palha de cana de açúcar e verificaram a redução da concentração do COT, o que fortalece o argumento supracitado, de que a alta concentração encontrada nesta área de pesquisa está atrelada a concentração de material orgânico que existe no sistema de produção o que justifica a concentração de COT observada em todos os sistemas.

Os dados encontrados neste estudo (TABELA 3) são próximos aos resultados de COT feitas na mesma área de estudos nos anos de 2016 a 2017, que apresentaram médias variando em torno de 47 a 32 g kg⁻¹ nas profundidades de 0 a 0,10 m (Dominschek et al., 2018), sugerindo que o COT tem aumentado com o decorrer do tempo.

De acordo com Vezzani e Mielniczuk (2009), a quantidade e diversidade da biomassa vegetal aumenta a interação da biota edáfica do solo, o que resulta na

construção da qualidade estrutural do solo. Com isto, acredita-se que os sistemas agrícolas avaliados neste trabalho, submetidos ao manejo específico e à diversidade de componentes produtivos favoreceram positivamente no aumento do COT e, conseqüentemente, na qualidade da estrutura do solo.

4.4 PARÂMETROS RADICULARES

Os dados da MSR, VR, CR e ASE, observados no GRÁFICO 3, são decorrentes da presença de raízes dos diversos componentes produtivos existentes nos sistemas. Os dados observados são próximos aos de Salton et al. (2014) que avaliaram a integração LP e obtiveram o decréscimo em profundidade das variáveis de raízes e atribuíram ao aumento da RP. Portanto, a redução da concentração das raízes em profundidade, verificada neste trabalho pode estar ligada à RP e ao VESS, que traduzem a qualidade estrutural do solo. Apesar de não significativo, atribui-se destaque de MSR, VR e CR nos sistemas L e P, provavelmente, devido ao enraizamento abundante do pasto (Capim áries) e da lavoura de milho. Ademais, pode-se mencionar a influência dos animais presentes no sistema P que estimulam a rebrota e o crescimento das raízes (BONETTI, 2018) à medida que eles se alimentam, e depositam os esterco aumentando a matéria orgânica nos sistemas.

O comprimento radicular (CR) teve o mesmo comportamento da MSR ao longo do perfil do solo avaliado, onde pode ser verificada a maior concentração na camada (0-0,10 m). O aumento ou a redução da CR está atrelada à RP e à Qe, conforme verificado neste trabalho (GRÁFICO 8).

O VR apresentou redução com a profundidade (GRÁFICO 3D) e maior concentração do VR foi verificada na primeira camada, podendo ser devido aos valores de RP (<1 MPa) observados na primeira camada. Por fim, ao observar o Gráfico 3D, na sua direita, o retrato fotográfico escaneado das raízes por camadas, corroboram com tal afirmação, aonde a concentração de raízes foi maior na camada superficial, reduzindo-se com a profundidade.

O comportamento observado da MSR, foi semelhante aos resultados observados por Garlet e Schumacher. (2020) eles avaliaram a biomassa das raízes finas em área de restauração florestal e registraram redução da biomassa das raízes à medida que aumentava a profundidade avaliada. Esta diminuição da MSR pode estar atrelada à RP que aumentou com a profundidade (GRÁFICO 2). Maior

concentração de MSR registrada na camada superficial, menores valores de RP são observados (<1 MPa). Resultados semelhantes foram observados por Costa et al. (2012), avaliando a RP e a produção de raízes de forragem, os autores registraram a influência negativa da RP para o crescimento de raízes e, nas camadas com o menor valor de RP, observaram maior concentração de MSR, portanto atribuíram a este resultado a concentração de sistema radicular e aos índices de fertilidade observados na camada superficial.

4.5 CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS RADICULARES COM VESS, RP E COT

Os parâmetros radiculares apresentaram interdependência, na qual o desenvolvimento de um parâmetro reflete nos outros (TABELA 4), conforme era esperado. As correlações entre as variáveis observadas no gráfico da PCA (GRÁFICO 5) estão de certa forma, atrelados aos efeitos das raízes e à concentração de COT avaliados neste trabalho, que influenciou positivamente a qualidade da estrutura do solo. Segundo Gamboa et al. (2020) a produção de raízes nos sistemas de cultivo estimula a atividade biológica do solo, que afeta positivamente a qualidade da estrutura física do solo. Na área de estudo onde foi desenvolvida esta pesquisa não se faz o uso de pesticidas ou agrotóxicos, o que pode aumentar ainda mais a diversidade edáfica da biota e, conseqüentemente, influenciar na qualidade do solo.

A correlação do VESS com a RP (GRÁFICO 5) mostra a eficiência do uso do VESS, pois os resultados encontrados apontam claramente que é possível obter resultados próximos ou iguais de qualidade física do solo, quando se usa um aparelho caro para medir a RP. Contudo, o uso de VESS, além de ser simples de usar é um método sem custo e eficiente.

Os resultados de CR e VR correlacionados com o VESS (GRÁFICO 6) podem ser atrelados aos fatores relatados por Coblinski et al. (2019) que avaliaram as perdas de água, solos e nutrientes na mesma área de estudo, e atribuíram a densidade do solo, porosidade, disponibilidade e retenção de água e outros aspectos de qualidade química (COT) que influencia na qualidade da estrutura do solo.

Quando avaliado o comportamento do comprimento radicular em diferentes classes de diâmetros em função do VESS se observa a concentração de até 80% do

comprimento das raízes finas na camada de 0,0-0,10 m (GRÁFICO 7). Resultados semelhantes foram observados por Hao-Xin et al. (2020), avaliando as mudanças ocasionadas por diferentes tipos de vegetação (gramíneas e arbustos) e o efeito das suas raízes no solo, concluindo que as raízes finas das gramíneas estavam concentradas na camada de 0,0-0,15 m e que proporcionaram maior infiltração da água, estabilidade de agregados, e porosidade do solo. Portanto, para este trabalho a correlação observada entre o VESS e as raízes com diferentes diâmetros pode ser devido ao manejo dos sistemas de produção que proporcionaram a quantidade de raízes observadas (TABELA 4).

A regressão obtida entre RP e VR ($R^2=0,71$) (GRÁFICO 8B) indica que a produção de raízes pode ser drasticamente afetada sob valores médios de RP maiores que 2 MPa. Destaca-se que na camada de 0,0-0,10 m foi observada menores valores médios de RP ($<1\text{MPa}$) (GRÁFICO 2; TABELA 2) e, conseqüentemente, as maiores concentrações de raízes (GRÁFICO 3). Dados semelhantes foram verificados por Costa et al. (2012) avaliando o efeito do pastejo sobre a qualidade física do solo e o impacto das raízes, ao relacionar a RP com VR. Os autores constataram uma relação negativa ($R^2=0,55$), sendo que valores altos de RP influenciaram nas menores concentrações de VR observadas, e atribuíram este comportamento à produção de raízes e aos índices de fertilidade do solo.

A relação positiva verificada neste trabalho entre RP e VESS (GRÁFICO 8C), também foi observada por Çelik et al. (2020) avaliando o efeito de sistemas de cultivo de longo prazo, encontrando um coeficiente de determinação entre RP e VESS de 0,67 na camada de 0,10-0,20 m, em área plantio direto sobre Latossolo vermelho distrófico. A relação positiva entre RP e VESS também é verificada por outros autores (CHERUBIN et al., 2017; TUCHTENHAGEN et al., 2018; CASTIONI et al., 2018). Tais resultados estão atrelados, como pode ser observado no GRÁFICO 5. Contudo, o comportamento do aumento do VESS com aumento da RP, corrobora com o verificado na dificuldade da desintegração dos agregados, que está associada à compactação do solo.

De forma geral, as variáveis avaliadas apresentaram qualidade aceitável da estrutura do solo. As notas encontradas estão de acordo sugerem essa qualidade ligada às raízes dos componentes produtivos e ao manejo praticado na área. Além disso, o PD, é considerado como uma prática chave para o sequestro de carbono no solo, e pela sua eficiência para evitar a degradação física do solo (CALONEGO et

al., 2017; VIZIOLI et al. 2021). As correlações negativas entre as variáveis dos atributos do solo RP, VESS com o COT e as raízes explicam claramente a influência que cada variável exerce para melhorar a qualidade da estrutura física do solo.

Assim sendo, os resultados confirmam a hipótese de que os sistemas integrados de produção agropecuária podem promover melhor qualidade estrutural do solo quando comparados aos sistemas isolados, devido à ação de raízes diversificadas dos componentes produtivos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados observados confirmaram parcialmente a hipótese levantada de que os sistemas de produção agropecuária com maior número de componentes produtivos promovem a qualidade estrutural do solo. Assim, a diversidade de componentes produtivos, apesar de proporcionar qualidade estrutural do solo, foram tão eficientes quanto os sistemas isolados L e P, que nas condições do estudo tiveram os melhores resultados, juntamente com o PF. O sistema isolado F apresentou menor qualidade estrutural.

Ao relacionar os atributos físicos do solo, RP e VESS, com parâmetros radiculares e o COT, foi evidenciada melhoria da estrutura do solo com a concentração de raízes e COT.

Os sistemas de produção agropecuária livres de pesticidas foram eficazes em promover o crescimento radicular, melhorar a estrutura do solo e aportar carbono orgânico no solo, sendo indicado o uso e manejo destes sistemas em condições similares. Entretanto, mais estudos são necessários para que tais evidências sejam constatadas também em outros ambientes.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2001.
- ANDRADE, V. D.; VIEIRA FILHO, W. C.; DE SOUSA PERES, M.; PONCIANO, V. D. F. G.; CRUZ, S. J. S.; DE MATOS P. Retenção de água no solo no feijão-comum em sucessão de diferentes adubos verdes. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 933-942, 2021.
- ASSIS, PC, STONE, LF, MEDEIROS, JC, MADARI, BE, OLIVEIRA, JDM, & WRUCK, FJ. Physical attributes of the soil in crop-livestock-forest integration systems. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 19, p. 309–316, 2015.
- BALL, B. C., T. Batey, and L. J. Munkholm. "Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerlkamp test." **Soil use and Management** 23, no. 4 329-337, 2007.
- BONETTI, J. DE A.; PAULINO, H. B.; DE SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; CAETANO, J. O. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Brazilian Agricultural Research**, v. 53, n. 11, p. 1239-1247, 2018.
- BONETTI, JDA, PAULINO, HB, SOUZA, EDD, CARNEIRO, MAC, & SILVA. Influence of the integrated agricultural production system on the soil and on soybean and brachiaria productivity. **Tropical Agricultural Research**, v. 45, n. 1, p. 104-112, 2015.
- BONINI, CDSB, LUPATINI, GC, ANDRIGHETTO, C., MATEUS, GP, HEINRICHS, R., ARANHA, AS., SANTANA, EAR., & MEIRELLES, GC. Forage production and chemical and physical soil attributes in integrated agricultural production systems. **Brazilian agricultural research**, v. 51, n. 9, p. 1695-1698, 2016.
- BUNGENSTAB, D.J.; ALMEIDA, R.G. Forrageiras em sistemas de produção de bovinos em integração. In: BUNGENSTAB, D.J.; ALMEIRA, R.G.; LAURA, 48 V.A.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, A.D. (ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. 1. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, cap 24, p. 835, 2019.
- BURLAMAQUI BENDAHAN, A.; POCCARD-CHAPUIS, R.; DE MEDEIROS, R. D.; MOURÃO FILHO M.; DA COSTA LUCENA, N.; MENEZES, B. R.; TOURRAND, J.F. Sistemas integrados de produção agropecuária em pequenas e médias propriedades rurais. In: FRANCINE D.S.; DAMIAN DS. T.; AURÉLIO S. A. M.; CARBONE C. P. C.; PAULINO F. C. H. B (Ed.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. Curitiba, 2018. p. 211-228.

BUSS, S. R. **AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO**: Aplicabilidade Em Um Latossolo Bruno Sob Diferentes Usos e Manejos. 2015.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.

BRASIL. Decreto estadual Nº 2200, 12DE junho de 2000. Regulamento ao zoneamento ecológico-econômico da área de proteção ambiental do irai, Curitiba, PR, 2000.

CAMARGO, A. DE. Densidade do solo e porosidade. p. 1–14, 2019.

CARVALHO, P. C. D. F.; PETERSON, C. A.; NUNES, P. A. D. A.; MARTINS, A. P.; SOUZA FILHO, W.; BERTOLAZI, V. T.; MORAIS, A.; ANGHINONI, I. Animal production and soil characteristics from integrated crop-livestock systems: toward sustainable intensification. **Journal of animal science**, v. 96, n. 8, p. 3513-3525, 2018.

CARVALHO, P. C. DE F.; MORAES, A. DE; PONTES, L. DA S.; ANGHINONI, I.; SULC, R. M.; BATELLO, C. Definitions and terminologies for an integrated agricultural production system. **Magazine Agronomic Science**, v. 45, n. 5SPE, p. 1040-1046, 2014.

CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, C.J.; Carvalho, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: a multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 301-309, 2018.

CAVALIERI, KMV.; DA SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, AR.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, **Brazil. Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158-164, 2009.

COBLINSKI, J. A.; FAVARETTO, N.; GOULARTE, G. D.; DIECKOW, J.; MORAES, A.; SOUZA, L. D. P. Water, soil and nutrients losses by runoff at hillslope scale in agricultural and pasture production in Southern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 6, p. 160, 2019.

COSTA, M. A. T.; TORMENA, C. A.; LUGÃO, S. M. B.; FIDALSKI, J.; NASCIMENTO, WGD.; MEDEIROS, FMD. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 993-1004, 2012.

COSTA, R. B. DE.; ARRUDA, E. J. DE.; ARRUDA, D.; OLIVEIRA, L. C. S. DE. Sistemas agrossilvipastoris como alternativa sustentável para a agricultura familiar. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, v. 3, n. 5, p. 25–32, 2002.

COX, D. R.; BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 26, p. 211-252, 1964.

CALONEGO, J. C.; JUAN PA. R.; João P. G R.; LEONTINO de O. N.; CIRO A. R. "Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling." *European Journal of Agronomy* 85 (2017): 31-37.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L.; GUIMARÃES, R. M.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017.

CLIMATE-DATA.ORG. **CLIMA:** Quatro Barras-PR, c2020. Disponível em:<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/quatro-barras-43751/>>. Acesso em: 25 de abr. de 2020.

CRUVINEL FURQUIM, L., JOSÉ DE SOUZA, E.; FURTADO DA SILVA, N.; NUÑEZ C. D. N., CABRAL, R. J. S.; SANTINI, K, J. M.; LEÃO, B. C. S.; FERNANDO STONE, L. Infiltração de água e resistência do solo à penetração em sistemas de cultivos integrados e em área de pastagem degradada. In: **Colloquium Agrariae**. Vol. 16, No. 5. 2020.

ÇELIK, İ., GÜNAL, H., ACAR, M., ACIR, N., BEREKET BARUT, Z.; BUDAK, M. Evaluating the long-term effects of tillage systems on soil structural quality using visual assessment and classical methods. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 2, p. 223-239, 2020.

DA COSTA, J. A. A.; PÉREZ LUNA, E. J.; ESPINOSA VILLAFUERTE, S. G.; KICHEL, A. N.; REIS, F. A. Sistemas integrados de producción agropecuaria-SIPA, todos los motivos para iniciarlos. In: Embrapa Caprinos e Ovinos-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: REUNIÓN CIENTÍFICA DE LA ASOCIACIÓN MEXICANA PARA LA PRODUCCIÓN ANIMAL Y SEGURIDAD ALIMENTARIA, 44. Chiapas, Mexico. Programas de conferencias. Universidad Autónoma de Chiapas, 2017. 35 f., 2017.

DA SILVA, V. L.; DIECKOW, J., MELLEK, J. E.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; VEZZANI, F. M. Melhoria da estrutura de um Latossolo por sistemas de culturas em plantio direto nos Campos Gerais do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 3, p. 983-992, 2012.

DE ALMEIDA, R. G.; DE MEDEIROS, S. R. Emissão de gases de efeito estufa em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Embrapa Gado de Corte-Livro técnico (INFOTECA-E), 2015.

DE VARES ROSSETTI, K.; CENTURION, J. F. Compactação em Latossolos e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Agroambiente On-Line**, v. 11, n. 3, p. 181-190, 2017.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; LADISLAU MARTIN-NETO; MIELNICZUK, J. Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono. **Embrapa**, v. 1, n. 12, p. 17, 2004.

DOMINSCHKE, R.; KRUCHELSKI, S.; DEISS, L.; PORTUGAL, T.; DENARDIN, L. G.; MARTINS, A.; LANG, C.; MORAES, A. SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NA PROMOÇÃO DA INTENSIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL. 2018. Disponível em: <<https://www.aliancasipa.org/wp-content/uploads/2018/12/Boletim-NITA.pdf> acessado> em: 12 de abril de 2019.

EHLERS, Eduardo. O que é agricultura sustentável. Brasiliense, 2017.

EURICH, J.; WEIRICH NETO, P. H.; ROCHA, C. H.; EURICH, Z. R. D. S. Avaliação visual da qualidade da estrutura do solo em sistemas de uso das terras. **Rev. Ceres, Viçosa**, v.61, n.6, p.1006-1011, 2014.

FAO. An international consultation on integrated crop-livestock systems for development The Way Forward for Sustainable Production., v. 13, n. 1, p. 79, 2011.

FAO WF. IFAD (2012) The state of food insecurity in the world 2012. Economic growth is necessary but not sufficient to accelerate reduction of hunger and malnutrition. **Rome, FAO**. 2015.

FEBRAPDP. O que é sistema plantio direto? 2020. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/noticias/680/sistema-plantio-direto-os-pilares-do-equilibrio#:~:text=No%20Brasil%2C%20segundo%20dados%20do,chegando%20a%20557%20mil%20estabelecimentos.>> Acesso 20 novembro 2020.

FEIDEN, Alberto. Agroecologia: introdução e conceitos. Agroecologia: princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável. **Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica**, p. 51-70, 2005.

FERREIRA, S. A. **Avaliação visual da estrutura e macrofauna edáfica em sistemas de uso do solo no sub-trópico Brasileiro**. Dissertação de Mestrado em ciências do solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FLÁVIO NETO, J.; SEVERIANO, E. D. C.; COSTA, K. A. D. P.; JUNNYOR, W. S. G.; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 3, p. 375-383, 2015.

FRANCO, H. H. S.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CHERUBIN, M. R.; FAVILLA, H. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 61-69, 2019.

GAMBOA, C. H.; VEZZANI, F. M.; KASCHUK, G.; FAVARETTO, N.; COBOS, J. Y. G.; DA COSTA, G. A. Soil-root dynamics in maize-beans-eggplant intercropping system under organic management in a subtropical region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 1480-1490, 2020.

GARLET, C.; SCHUMACHER, M. V. Biomassa e comprimento de raízes finas em uma área de restauração florestal. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 15, p. 351-361, 2020.

GASPARINI, L. V. L.; COSTA, T. S.; HUNGARO, O. A. D. L.; SZNITOWSKI, A. M.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Sistemas integrados de produção agropecuária e inovação em gestão: Estudos de casos no Mato Grosso. Texto para Discussão, 2017.

GEE, G.W. & OR, D. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. Methods of soil analysis. Madison, **Soil Science Society of America**, p.201-227. 2002.

GUIMARÃES, R. M. L.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L. J.; BALL, B. C.; KELLER, T. Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 104-113, 2017.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, ÁLVARO P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 92–99, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395–403, 2011.

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, v. 177, p. 113-124, 2018.

HAO, HAO-XIN.; YU-JIE WEI.; DAN-NI CAO.; ZHONG-LU GUO.; Zhi-hua Shi. "Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils." **Soil and Tillage Research** 198, p. 104542, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário** 2017: resultados definitivos - Rio de Janeiro, v. 8, p.1-105, 2019.

KASSAM, A.; DERPSH, R.; FRIEDRICH, T. Development of conservation agriculture systems globally. **Advances in Conservation Agriculture**, v. 1, p. 1-56, 2020.

KEESSTRA, S.D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDÀ, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J.N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W.H.; BARDGETT, R.D. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, 2, p.111-128, 2016.

KLEIN, V. A.; RODRIGO K. C. "Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado." **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31, no. 2 221-227, 2007.

KICHEL, Armindo Neivo et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e o progresso do setor agropecuário brasileiro. In: BUNGENSTAB, D. J. et al. ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. **Embrapa Gado de Corte-Livro científico** (ALICE), 2019.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. Compactação e descompactação de solos. **Embrapa Trigo-Documents (INFOTECA-E)**, 2000.

LEPSCH, Igo F. Formação e conservação dos solos. Oficina de textos, 2016.

LIMA, R. P. DE; LEÓN, M. J. DE; RODRIGO, A. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 60, n. 4, p. 577–581, 2013.

MAAS, Larissa; MALVESTITI, Rosane; GONTIJO, Leila Amaral. Work in organic farming: an overview. **Ciência Rural**, v. 50, n. 4, 2020.

MACHADO, L. A. Z.; BALBINO, L. C.; CECCON, G. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. 1. Estruturação dos Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária. **Embrapa Agropecuária, Oeste, Documentos**, v. 110, p. 46, 2011.

MACHADO, P. L. O. A. Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar. **Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E)**, 2003.

MEDEIROS, R. D. DE; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 5, p. 940–947, 2005.

MELOTTO, A. M.; LAURA, V. A.; BUNGENSTAB, D. J.; FERREIRA, A. D. Espécies florestais em sistemas de produção em integração. BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (Ed.). ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. **Brasília, DF: Embrapa**, 2019.

MORAES, A. D.; CARVALHO, P. C. D. F.; LUSTOSA, S. B. C.; LANG, C. R., & DEISS, L. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v. 45, n. 5spe, p. 1024-1031, 2014.

MORAIS, M.C.; SIQUEIRA-NETO, M.; GUERRA, H.P.; SATIRO, L.S.; SOLTANGHEISI, A.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; CHERUBIN, M.R. Trade-Offs between Sugarcane Straw Removal and Soil Organic Matter in Brazil. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9363, 2020.

OLIVEIRA, B. DA S.; CARVALHO, M. A. C.; LANGE, A.; DALLACORT, R.; SILVA, V. P. DA. Resistência Do Solo À Penetração Em Áreas Sob O Sistema De Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, Na Região Amazônica Benhur. **Enciclopedia Biosfera**, v. 11, n. 22, p. 3678–3689, 2015.

PAIVA, I. A. de.; RITA, Y. L.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil—A survey. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104704, 2020.

PANZENHAGEN, N. V.; KOLLER, O. C.; VAQUIL, P. D.; SOUZA, P. V. D. D.; SOGLIO, D.; KESSLER, F. Technical and environment aspects of the organic production on citric region of Caí Valley, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Ciência Rural**, v. 38, n. 1, p. 90-95, 2008. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010384782008000100015&lng=en&nrm=iso>. access on 20 february 2021.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, 386, 114900, 2021.

POPOVA, L.; VAN DUSSCHOTEN, D.; NAGEL, K. A.; FIORANI, F.; MAZZOLAI, B. Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. **Annals of botany**, v. 118, n. 4, p. 685-698, 2016.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. **Comparison of rapid methods for the determination of organic matter in soils**. 1979.

RAHMAN, S. A.; JACOBSEN, J. B.; HEALEY, J. R.; ROSHETKO, J. M.; SUNDERLAND, T. Finding alternatives to swidden agriculture: does agroforestry improve livelihood options and reduce pressure on existing forest. **Agroforestry Systems**, v. 91, n. 1, p. 185–199, 2017.

RAKKAR MK, BLANCO-CANQUI H. Grazing of crop residues: Impacts on soils and crop production. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 258, p. 71-90. 2018.

RATUCHNE, L. C.; KOEHLER, H. S.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; SCHAMNE, P. A. Comparison of sampling methods for the evaluation of the root system of sugarcane. **Revista de Ciencias Agrícolas**, v. 34, n. 1, p. 7-16, 2017.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação Do Solo Em Sistemas Agropecuários E Florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, n. 15193934, p. 49–134, 2007.

REINIGER, L.R.S.; WIZNIEWSKY, J. G.; KAUFMANN, M. P. **Princípios de agroecologia**. 1o ed. Santa Maria, 2017.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; ALVES MOREIRA, J. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido1. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil:

Toward a sustainable production system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 190, p. 70-79, 2014.

SALTON, Julio C.; HERNANI, Luis C.; FONTES, Clarice Z. Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: **Embrapa-SPI; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste**, 1998.

SARTOR, L. R.; RAMÃO, J.; SILVA, V. P. D. CASSOL, L. C.; BRUN SARTOR, LAÉRCIO R. Soil mechanical resistance to penetration in silvopastoral system after eleven years of implantation. **Forest Science**, v. 30, n. 1, p. 231-241, 2020.

SUGAMOSTO, Maria Lúcia. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do Centro de Estações Experimentais do Canguiri, município de Pinhais-Paraná.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) Ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 149. 2002.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do Solo à Penetração em Resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, n. 1, p. 487–494, 2008.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; Guimarães, M. F.; Medina, C. C., Balbino L. C.; & Neves, C. S. V. J. Método Do Perfil Cultural Para Avaliação Do Estado Físico De Solos Em Condições Tropicais. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 393–399, 1999.

TEAM, R. Core et al. **R: A language and environment for statistical computing.** 2020.

TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L.; LOGSDON, S.; CHERUBIN, M. R. TORMENA, CASSIO A. Visual soil structure effects of tillage and corn stover harvest in Iowa. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 3, p. 720-726, 2016.

TORMENA, CA dos; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.

TUCHTENHAGEN, I. K., LIMA, C. L. R., BAMBERG, A. L., GUIMARÃES, R. M. L., & MANSONIA, P. M. Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 42, 2018.

VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. Uma visão sobre qualidade do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa**, v. 33, n. 4, p. 743-755, ago. 2009.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M.V.; TORMENA, A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104935, 2021.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; BARTH, G. Influência de manejos de azevém sobre as propriedades físicas de um Latossolo Bruno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 8, p. 952–960, 2018.

PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2.ed. Curitiba: NEPAR-SBSC. 2019.

WADT, Paulo Guilherme Salvador. Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas. **Embrapa Acre-Documents (INFOTECA-E)**, 2003.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; LANG, B.; VON LÜTZOW, M.; MARIN-SPIOTTA, E.; VAN WESEMAEL, B.; RABOT, E.; LIEß, M.; GARCIA-FRANCO, N.; WOLLSCHLÄGER, U. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, 333, pp.149-162.,2019.

ZHANG, Xunchang et al. Quantifying effects of root systems of planted and natural vegetation on rill detachment and erodibility of a loessial soil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104420, 2019.