

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

REGIANE KAZMIERCZAK

**INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS
DE PREPARO**

PONTA GROSSA-PR

2018

REGIANE KAZMIERCZAK

**INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS
DE PREPARO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de concentração: Agricultura. Linha de pesquisa: Uso e Manejo do Solo.

Orientadora: Prof^a. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola.

PONTA GROSSA-PR

2018

K23 Kazmierczak, Regiane
Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo/Regiane Kazmierczak. Ponta Grossa, 2018. 100f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de concentração – Agricultura uso e manejo do solo), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola.

1. Solo – qualidade. 2. Solo – preparo. 3. Indicadores físicos. 4. Indicadores químicos I. Giarola, Neyde Fabíola Balarezo. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. III. T.

CDD : 631.31



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

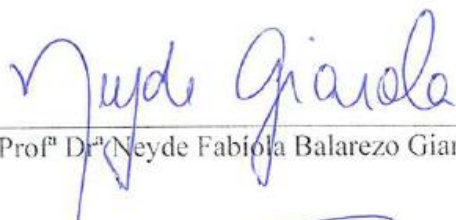
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo”.**

Nome: Regiane Kazmierczak

Orientador: Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Aprovado pela Comissão Examinadora:



Prof^a Dr^a Neyde Fabíola Balarezo Giarola



Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa



Prof. Dr. José Eduardo Corá

Data da Realização: 30 de julho de 2018.

Tudo aceito com amor.

‘Nunca esqueça como era a terra quando dela você tomou posse. E com toda a sua força, o seu poder, e todo o seu coração conserva-a para seus filhos e ame-a como Deus nos ama a todos. Uma coisa sabemos: que o nosso Deus é o mesmo Deus, essa terra é querida por Ele. Nem mesmo o homem pode evitar o nosso destino comum.’

(Parte da carta do Chefe Seath, da tribo Suquahish, dos Estados Unidos, redigida em 1855 para o Presidente Americano)

A minha família,

DEDICO.

A todos os estudantes que se empenham em buscar
conhecimento, e aos pesquisadores esforçados por levar
algo de melhor a nossa sociedade, cumprindo seu papel
nesta arte de aprender e ensinar,

OFEREÇO.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, meu guia em toda minha caminhada, fonte de sabedoria e paz.

À minha família, pois a presença destas pessoas preciosas me mostra que o amor é energia vital à vida. Agradeço pela segurança proporcionada nesta caminhada, em especial a minha mãe Anísia Tyski Kazmierczak, ao meu pai Renato Kazmierczak, aos meus irmãos, cunhados, meu sobrinho e afilhado Renan Gabriel Kazmierczak e ao Alisson Becker por estar ao meu lado neste período. Sem a presença destas pessoas os sonhos não fazem sentido.

Agradeço pela orientação recebida, em especial a Prof^a Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola, pela confiança ao longo de toda esta caminhada e por toda a ajuda na realização deste trabalho. Ao Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa, pelo auxílio no trabalho, e a pesquisadora do IAPAR Dra. Josiane Burkner dos Santos, pela parceria neste projeto de pesquisa.

Agradeço aos colegas, força sem a qual não seria possível realizar todo este trabalho: Flavia Biassio Riffert, Sandoval Carpinelli, Andressa Dranski, Adriane Aguiar, Bruna Emanuele Schiebelbein, Erick Romanowski, Igor de Siqueira, Leandro Alegransi, Leonardo Silva, Caetano Benassi, Ariane de Paula, Lucia Helena Wiecheteck, e aos estagiários e funcionários do IAPAR.

Pelo apoio financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

KAZMIERCZAK, R. INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE PREPARO. 2018. 100 pag. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa-PR, 2018.

RESUMO

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo funcionar mantendo a produtividade com mínima degradação ambiental. Esta pode ser monitorada por um índice de qualidade do solo, após a seleção de indicadores, permitindo verificar alterações no solo devido a diferentes preparos. Desse modo é possível analisar qual preparo do solo é mais eficaz em manter a produtividade e ser sustentável no ambiente agrícola. O objetivo deste estudo foi selecionar indicadores físicos e químicos e avaliar a qualidade de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo em ambiente subtropical. A área de estudo está situada na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) no município de Ponta Grossa (PR), com três sistemas de preparo do solo de longa duração: plantio direto (PD), preparo mínimo (PM) e preparo convencional (PC), e uma área de vegetação secundária (VS). Foram realizadas duas profundidades de amostragem (0-10 e 10-20 cm), analisando os indicadores físicos: densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Map), microporosidade (Mip), condutividade hidráulica saturada (Kfs), resistência do solo a penetração (RP) e químicos: pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), relação cálcio/magnésio (Ca/Mg), fósforo (P), potássio (K), carbono orgânico total (COT), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (M%). A qualidade do solo foi analisada por um índice de qualidade do solo, seguindo três etapas: composição do conjunto mínimo de dados, transformação dos indicadores em escores padronizados e a transformação dos escores no índice de qualidade do solo. Foram reduzidos de 19 indicadores na camada de 0-10 cm para 6 indicadores, e de 18 indicadores na camada de 10-20 cm para 5 indicadores. Os indicadores selecionados na camada 0-10 foram pH (CaCl₂), Map, CTC, Mg, P e RP e na camada de 10-20 cm: Al, Map, CTC, Ca/Mg e RP. O índice de qualidade do solo na camada de 0-10 foi de 0,54 no PD; 0,76 no PM; 0,67 no PC e 0,61 na VS; e na camada de 10-20 foi de 0,78 no PD; 0,87 no PM; 0,89 no PC e 0,30 na VS; mostrando que o PM apresentou maior qualidade do solo na primeira camada e o PC apresentou maior qualidade do solo na segunda camada, e que o PD foi inferior aos dois preparos nas duas camadas. O preparo de solo melhorou a qualidade do solo nas condições de solos argilosos de ambiente subtropical. Valores altos de Al na VS proporcionaram baixa qualidade do solo na camada de 10-20 cm neste local. A qualidade do solo na VS mostra tanto as potencialidades naturais do solo quanto suas limitações.

Palavras-chave: Qualidade dos solo, preparo do solo, indicadores.

KAZMIERCZAK, R. PHYSICAL AND CHEMICAL INDICATORS OF SOIL QUALITY IN PREPARATION SYSTEMS. 2018. 100 page. Dissertation (Master Science in Agronomy) – Ponta Grossa State University, Ponta Grossa-PR, 2018.

ABSTRACT

Soil quality can be defined as the ability of soil to function maintain yield with minimal environmental degradation. This can be monitored by a soil quality index, after the selection of indicators, allowing to verify changes in the soil due to different preparations. In this way it is possible to analyze which soil preparation is most effective in maintaining productivity and be sustainable in the agricultural environment. The objective of this study was to select physical and chemical indicators and evaluate the quality of a very clayey Red Latosol (Oxisols - U.S. Soil Taxonomy) cultivated under different soil tillage systems in a subtropical environment. The study area is located at the Experimental Station of the Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) in the city of Ponta Grossa (PR-Brazil), with three systems of long term soil preparation, no-tillage (NT), minimum tillage (MT) and conventional tillage (CT), and an area of secondary vegetation (SV). There were two sampling depths (0-10 and 10-20 cm), analyzing the physical characteristics: bulk density (BD), total porosity (TP), macroporosity (Map), microporosity (Mip), hydraulic conductivity (K_{fs}) and soil resistance (PR) and chemicals: pH (H_2O), pH (KCl), pH ($CaCl_2$), aluminum (Al), calcium (Ca), magnesium (Mg), calcium/magnesium proportion (Ca/Mg) phosphorus (P), potassium (K), total organic carbon (TOC), cation exchange capacity (CTC), base saturation (V%) and aluminum saturation (M%). Soil quality was analyzed by a soil quality index, following three steps: composition of the minimum set of data, transformation of the indicators into standardized scores and transformation of the scores in the soil quality index. There were reduced from 19 indicators in the 0-10 cm layer to 6 indicators, and 18 indicators in the 10-20 cm layer to 5 indicators. The selected indicators in the 0-10 layer were pH ($CaCl_2$), Map, CTC, Mg, P and PR and in the 10-20 cm layer: Al, Map, CTC, Ca/Mg and PR. The soil quality index in the 0-10 layer was 0.54 in NT; 0.76 in MT; 0.67 in CT and 0.61 in SV; and in the 10-20 layer was 0.78 in NT; 0.87 in MT; 0.89 in CT and 0.30 in SV; showing that the MT presented higher soil quality in the first layer and the CT presented higher soil quality in the second layer and that the NT was inferior to the two tillage in the two layers. Soil preparation improved soil quality under clay soil in subtropical environment. High values of Al in SV provided low soil quality in the 10-20 cm layer at this site. Soil quality in SV shows both the natural potentialities of the soil and its limitations.

Keywords: Soil quality, soil preparation, indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Histórico da área experimental. PD - plantio direto; PC - preparo convencional; PM - preparo mínimo	32
Figura 2: Mapa do Brasil (A). Localização geográfica do município de Ponta Grossa (B). Imagem de satélite da cidade de Ponta Grossa e localização do IAPAR (C). Imagem de satélite da Estação Experimental do IAPAR (D): PD - plantio direto; PC - preparo convencional; PM - preparo mínimo; VS - vegetação secundária	33
Figura 3: Esquema representativo das atividades em campo. Demarcação dos pontos em malha regular (A). Georreferenciamento (B). Coletas e análises em campo realizadas no raio de 1 metro da marcação do ponto (C). Coleta de amostras indeformadas e deformadas realizadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm (D)	36
Figura 4: Esquema representativo das atividades de coleta e preparo das amostras. Coleta de amostras indeformadas e preparo da amostra (A). Coleta de amostras deformadas (B).....	37
Figura 5: Ilustração demonstrativa da saturação de anéis, pesagem e mesa de tensão	38
Figura 6: Sequência da determinação da Kfs. Anel cravado ao solo (A). Saturação e cronometragem do tempo de infiltração (B). Local de realização da Kfs e coleta de anéis (C)	40
Figura 7: Medição da RP com penetrômetro de campo (A) e medição de umidade com TDR (B).....	41
Figura 8: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores físicos em todos os locais, na camada de 0-10 cm.....	50
Figura 9: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores químicos em todos os locais, na camada de 0-10 cm.....	53
Figura 10: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores físicos em todos os locais, na camada de 10-20 cm.....	55
Figura 11: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores químicos em todos os locais, na camada de 10-20 cm.....	57
Figura 12: Gráficos com os fatores representando os maiores pesos das variáveis. Camada 0-10.....	64
Figura 13: Gráficos com os fatores representando os maiores pesos das variáveis. Camada 10-20.....	70

Figura 14: Curvas de padronização para os indicadores de qualidade do solo	72
Figura 15: Contribuição dos indicadores no índice de qualidade do solo para a camada de 0-10 cm no plantio direto (PD), preparo mínimo (PM) preparo convencional (PC) e vegetação secundária (VS).....	80
Figura 16: Contribuição dos indicadores no índice de qualidade do solo para a camada de 10-20 cm no plantio direto (PD), preparo mínimo (PM) preparo convencional (PC) e vegetação secundária (VS).....	82
Figura 17: Comparação do índice de qualidade do solo na camada de 0-10 cm e na camada de 10-20 cm.....	83
Figura 18: Contribuição percentual de cada função do solo para a avaliação do índice de qualidade do solo para cada sistema de preparo do solo e na vegetação secundária, para a camada 0-10 cm.....	84
Figura 19: Contribuição percentual de cada função do solo para a avaliação do índice de qualidade do solo para cada sistema de preparo do solo e na vegetação secundária, para a camada 10-20 cm.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sequência de culturas, cultivadas desde o início do experimento (1981), submetidas à diferentes sistemas de manejo do solo (Preparo convencional – PC; Preparo Mínimo – PM; Plantio Direto – PD).....	34
Tabela 2: Funções de pontuação padronizada e valores limites para os indicadores de qualidade dos solo.	47
Tabela 3: Transformações utilizadas na normalização dos dados e resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk após a normalização dos dados, nos indicadores físicos e químicos, na camada de 0-10 cm em todos os preparos do solo.	59
Tabela 4: Matriz de correlações de Pearson para os dados de indicadores físicos e químicos, na camada de 0-10 cm em todos os preparos do solo.	60
Tabela 5: Autovalores associados aos indicadores físicos e químicos da camada de 0-10 cm.	61
Tabela 6: Autovetores associados aos autovalores dos indicadores físicos e químicos da camada de 0-10 cm.	62
Tabela 7: Transformações utilizadas na normalização dos dados e resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk após a normalização dos dados, nos indicadores físicos e químicos, na camada de 10-20 cm em todos os preparos do solo.	66
Tabela 8: Matriz de correlações de Pearson para os dados de indicadores físicos e químicos, na camada de 0-10 cm em todos os preparos do solo.	67
Tabela 9: Autovalores associados aos indicadores físicos e químicos da camada de 10-20 cm.	68
Tabela 10: Autovetores associados aos autovalores dos indicadores físicos e químicos da camada de 10-20 cm.	69
Tabela 11: Cálculo do índice de qualidade do solo (IQS) para a camada de 0-10 cm no plantio direto, preparo mínimo, preparo convencional e vegetação secundária.	74
Tabela 12: Cálculo do índice de qualidade do solo (IQS) para a camada de 10-20 cm no plantio direto, preparo mínimo, preparo convencional e vegetação secundária.	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 HIPÓTESES E OBJETIVOS	15
2.1 HIPÓTESE	15
2.2 OBJETIVO GERAL	15
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 QUALIDADE DO SOLO	16
3.1.1 Indicadores de qualidade do solo.....	18
3.1.1.1 Indicadores físicos	19
3.1.1.2 Indicadores químicos.....	22
3.1.1.3 Seleção de indicadores	24
3.1.2 Índice de qualidade do solo (IQS)	25
3.2 USO E PREPARO DO SOLO	27
3.2.1 Sistema preparo convencional	29
3.2.2 Sistema plantio direto	30
3.2.3 Sistema preparo mínimo.....	31
4 MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
4.2 AMOSTRAGEM.....	35
4.3 ANÁLISES FÍSICAS	37
4.3.1 Porosidade do solo.....	37
4.3.2 Densidade do solo (Ds).....	39
4.3.3 Condutividade hidráulica saturada do solo (Kfs)	39
4.3.4 Resistência do solo a penetração (RP).....	41
4.4 ANÁLISES QUÍMICAS	41
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS	49
5.1.1 Indicadores físicos da camada de 0-10 cm	49
5.1.2 Indicadores químicos da camada de 0-10 cm.....	51
5.1.3 Indicadores físicos da camada de 10-20 cm	54

5.1.4 Indicadores químicos da camada de 10-20 cm.....	55
5.2 SELEÇÃO DE INDICADORES DA CAMADA DE 0-10 CM	58
5.3 SELEÇÃO DE INDICADORES DA CAMADA DE 10-20 CM	64
5.4 PADRONIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS	71
5.5 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO.....	73
6 CONCLUSÕES.....	86
7 REFERÊNCIAS	87
8 ANEXO.....	94

1 INTRODUÇÃO

O solo desempenha sua importância para a vida na terra, com funções relacionadas à produção de alimentos e à proteção ambiental. A qualidade do solo busca avaliar quão bem o solo desempenha suas funções, se é capaz de manter e aumentar a produção vegetal, com mínima degradação ambiental. Para esta avaliação, existe uma ampla gama de indicadores do solo que podem ser utilizados, os quais podem ser químicos, físicos e biológicos.

No entanto, há uma preocupação em usar um número reduzido de indicadores, visando a redução de custo e menor demanda de tempo de avaliação, porém utilizando indicadores capazes de avaliar de forma eficiente a qualidade do solo.

Portanto, o primeiro passo na avaliação da qualidade do solo é buscar indicadores do solo sensíveis, que possibilitem diagnosticar mudanças no solo que ocorrem devido a diferentes usos e manejos. A redução de indicadores se torna bastante útil para futuras avaliações de qualidade do solo, pois possibilita conduzir experimentos futuros com menor custo e menor tempo. Porém só é viável utilizar os indicadores selecionados em locais e condições semelhantes ao estudado, pois os indicadores não são igualmente sensíveis em todos os locais e situações.

Os bons resultados na avaliação da qualidade do solo são possíveis por unir as informações de vários indicadores. Portanto a manutenção de um conjunto de indicadores é importante, pois um indicador sozinho não é eficiente na avaliação da qualidade do solo. Estes são combinados e resumidos em um único índice, formando o índice de qualidade do solo. O índice de qualidade do solo integra as informações de todos os indicadores e transmite estas em um único valor.

O índice de qualidade do solo é eficiente em avaliar e discriminar de forma eficaz práticas de manejo do solo. As práticas de manejo e preparo do solo causam perturbações no solo e estas precisam ser monitoradas ao longo dos períodos de tempo. A avaliação do preparo do solo realizado por um período prolongado de tempo traz resultados confiáveis da influência que o preparo causa na qualidade do solo.

Além disso, estas avaliações são importantes de serem realizadas para classes específicas de solo e diferentes climas. Condições diferenciadas da textura do solo, por exemplo, podem resultar em diferentes recomendações quanto ao preparo do solo. O clima da região e a distribuição de chuvas são aspectos relevantes a serem considerados quando

se avaliam práticas de preparo do solo. Condições diferentes de clima podem refletir em diferentes resultados.

Portanto, a verificação das alterações que o preparo do solo, realizado por um longo período de tempo, causa na qualidade do solo é uma avaliação que permite resultados promissores. Esta pode auxiliar nas recomendações de práticas de preparo do solo adequadas para determinados tipos de solos localizados em condições ambientais específicas.

2 HIPÓTESES E OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESE

Este trabalho tem as hipóteses de que: a) A ferramenta estatística é eficiente em selecionar indicadores para avaliar a qualidade do solo em diferentes preparos, reduzindo o conjunto de dados; b) O preparo do solo realizado por um longo período de tempo modifica a qualidade do solo, sendo que o preparo de solos argilosos melhora a qualidade do solo em ambiente subtropical.

2.2 OBJETIVO GERAL

Selecionar indicadores físicos e químicos e avaliar a qualidade de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado sob diferentes sistemas de preparo em ambiente subtropical.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a seleção de indicadores físicos e químicos para a avaliação da qualidade do solo, compondo um conjunto mínimo de dados;
- Integrar os indicadores selecionados em um índice de qualidade do solo;
- Investigar os efeitos dos diferentes preparos do solo na qualidade do solo;
- Comparar a qualidade do solo dos sistemas de preparo e da vegetação secundária.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 QUALIDADE DO SOLO

A qualidade do solo foi definida de forma comum e abrangente como a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens (DORAN; PARKIN, 1994).

No contexto agrícola, a qualidade do solo foi pensada em termos de terras produtivas que mantêm ou aumentam a rentabilidade agrícola, bem como a conservação dos recursos agrícolas para que futuras gerações agrícolas possam utilizar este recurso, sendo este critério utilizado para a avaliação (BÜNEMANN *et al.*, 2018; GREGORICH, 2006). Doran e Zeiss (2000) citam que o conceito definido num contexto mais agrícola demonstra avaliar a qualidade do solo de acordo com a aptidão do solo para apoiar o crescimento das plantações sem degradar ou prejudicar o meio ambiente.

Para avaliar a qualidade do solo, se integram indicadores biológicos, físicos e químicos do solo, que o habilita a exercer suas funções (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009), chegando a um conhecimento mais abrangente do solo para a tomada de decisões e para evitar a degradação do solo (DROBNIK *et al.*, 2018). Alguns autores citam a necessidade de incorporação de aspectos econômicos, ambientais e sociais, integrando um maior número de partes interessadas, com um foco mais interdisciplinar (JÓNSSON *et al.*, 2016).

Neste sentido, outras partes interessadas na avaliação da qualidade do solo começaram a serem pensadas e incorporadas para esta avaliação (JÓNSSON *et al.*, 2016). Para formuladores políticos, a qualidade do solo pode ser vista em termos da capacidade de uma nação permanecer competitiva no mercado internacional e honrar os seus compromissos ambientais internacionais. Manter a qualidade do solo tem relação com a vida humana, animal e vegetal (GREGORICH, 2006).

Em termos mais ambientais, pensa-se ciclagem de nutrientes, regulação da água, mudança climática e biodiversidade (GREGORICH, 2006). Nesse contexto, o conceito saúde do solo foi introduzido, sendo definida como a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo vital, dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra, para

sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água e promover a saúde animal e vegetal (DORAN; ZEISS, 2000). A saúde humana tem relação com a saúde do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

A saúde do solo retrata o solo como um sistema vivo e dinâmico cujas funções são mediadas por uma diversidade de organismos vivos que requerem manejo e conservação. Com essa definição, o interesse da avaliação da qualidade do solo ligado ao desenvolvimento sustentável tornou-se alvo de estudo. Para isso se propôs o uso de indicadores bióticos de qualidade do solo, necessários para avaliar a saúde do solo (DORAN; ZEISS, 2000). Um sistema de manejo do solo é considerado sustentável somente se mantiver ou melhorar a saúde do solo e não comprometer a qualidade ambiental além de um grau aceitável para a sociedade (GREGORICH, 2006).

A qualidade do solo e a saúde do solo podem ser vistas como sinônimos (CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017), porém podem ser divididas de forma que a qualidade do solo se concentra mais na capacidade do solo de atender às necessidades humanas, como manter a produtividade, enquanto a saúde do solo se concentra mais na capacidade contínua do solo de sustentar o crescimento das plantas e manter suas funções. Portanto estas definições se mantêm interligadas (DORAN; ZEISS, 2000), pois somente entendendo a qualidade do solo e promovendo-a podemos alcançar a proteção ambiental e preservar os solos em um estado utilizável para as futuras gerações (GREGORICH, 2006).

Um dos interesses no solo tem sido tradicionalmente seu potencial para a produção agrícola (BÜNEMANN *et al.*, 2018). Avaliar a qualidade do solo em um contexto mais agrícola remete a buscar avaliar como as práticas de manejo interferem na qualidade do solo. A avaliação das mudanças induzidas pelo manejo na qualidade do solo é importante para sustentar o alto rendimento das culturas (MUKHERJEE; LAL, 2014). Pesquisadores de todo o mundo têm somado esforços significativos para avaliar a qualidade do solo em práticas de manejo, a fim de minimizar os impactos negativos causados pela má gestão do solo (VALLE; CARRASCO, 2018).

Portanto a qualidade do solo não se limita em apenas verificar o grau de poluição do solo, como é o objetivo de verificação da qualidade do ar e da água, mas de forma muito mais complexa busca mensurar sua capacidade em manter a produtividade, a qualidade ambiental e a vida vegetal e animal saudável na face da terra (BÜNEMANN *et al.*, 2018). A qualidade do solo é um fator necessário para alcançar sistemas agrícolas

sustentáveis que atendam às nossas crescentes demandas por alimentos, rações, fibras e combustíveis (CHERUBIN *et al.*, 2016).

3.1.1 Indicadores de qualidade do solo

O primeiro passo para a avaliação da qualidade do solo é a seleção de indicadores de qualidade do solo. Os indicadores são medidas simples, na maioria das vezes quantitativas, que representam um estado de desenvolvimento do que se pretende analisar, demonstrando a direção em que algo ou alguém está indo (NESS *et al.*, 2007). Para a qualidade do solo, os indicadores devem ser selecionados de acordo com as funções de interesse do solo e as mudanças provocadas por um tipo específico de gestão do sistema de produção (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002).

Desde os primórdios da agricultura, indicadores de qualidade do solo foram utilizados para avaliar sua qualidade principalmente voltados para a produção agrícola. Como exemplo tem-se a utilização da cor do solo como medida da matéria orgânica do solo, sendo que a cor mais escura do solo se relaciona com o maior teor de matéria orgânica. Porém estas avaliações são mais subjetivas, embora mais baratas e rápidas. Informações mais precisas são obtidas com procedimentos analíticos para a avaliação da qualidade do solo, sendo a abordagem quantitativa mais específica e mais precisa, embora mais cara e demorada (ADEYOLANU; OGUNKUNLE, 2016).

Existem diversos indicadores do solo mensuráveis que abrangem uma ampla gama de funções físicas, químicas e biológicas do solo, que podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do solo (BOLINDER *et al.*, 1999), assim os indicadores subdividem-se em físicos, químicos e biológicos (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Bunemann *et al.* (2018) apresentaram os indicadores de qualidade do solo proposto com maior frequência em 62 publicações. A matéria orgânica total e o pH são os indicadores de qualidade do solo mais propostos, seguidos pelo fósforo disponível, indicadores de armazenamento de água e densidade aparente. O número médio de indicadores propostos são de 11. Na maioria das publicações, pelo menos um indicador das categorias físico, químico e biológico foi incluído, porém os indicadores biológicos do solo estavam ausentes em 40% dos conjuntos de dados mínimos revisados. Os indicadores físicos foram frequentemente propostos, bem como os químicos.

3.1.1.1 Indicadores físicos

Para que um solo apresente boa qualidade física, deve apresentar características como: facilidade de infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas; resposta ao manejo e resistência à degradação; possibilidade de trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas e permitir o crescimento e desenvolvimento das raízes (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Os indicadores físicos definem o crescimento das plantas, de forma direta, como o potencial de água no solo, aeração, temperatura do solo e resistência do solo à penetração de raízes (ALVES; SUZUKI, SANCHES, 2004; REICHARDT e TIMM, 2012).

Os atributos físicos do solo mais utilizados como indicadores quantitativos da qualidade física são a densidade do solo; taxa de infiltração de água no solo; macro, micro e porosidade total; condutividade hidráulica do solo e resistência do solo à penetração. Esses fatores físicos relacionam-se com a compactação do solo e são influenciados por outras características físicas, tais como: a textura, superfície específica, densidade do solo, estrutura e consistência do solo (DORAN; PARKIN, 1994; REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003; ALVES; SUZUKI, SANCHES, 2004; REICHARDT e TIMM, 2012).

A textura pode ser elencada como um atributo físico permanente, inerente às propriedades de cada solo e que serve para classificá-lo pedologicamente, influenciando em outros fatores. Porém não é um indicador físico importante a ser utilizado como indicador de qualidade do solo para diferenciar sistemas de manejo, visto que não é alterado (STEFANOSKI *et al.*, 2013). Atributos do solo governados por processos de formação do solo na maioria das vezes não respondem às práticas de manejo (CHERUBIN *et al.*, 2016).

As faixas consideradas adequadas para os indicadores físicos, como a condutividade hidráulica saturada (K_{fs}), volume de poros, densidade do solo (D_s) e resistência do solo à penetração (RP), geralmente estão associadas a condições compactas do solo que restringem o crescimento das raízes e o mau contato da raiz ao solo, bem como a retenção e disponibilidade de água (CARTER, 2006).

A porosidade do solo é uma medida do espaço poroso do solo. Esta pode ser representada pela porosidade total (PT), sendo o espaço poroso total do solo, e ainda subdividida em macroporosidade (M_{ap}) e microporosidade (M_{ip}). Os poros com diâmetro

maior que 100 μm são representados pela Map, sendo importantes na aeração do solo e nos fluxos mais rápidos de água (REICHARDT e TIMM, 2012).

Reichert, Suzuki e Reinert (2007) consideram o valor inferior de Map de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ como sendo crítico para o crescimento das plantas, pois influencia na aeração mínima necessária do sistema radicular. Citam que a porosidade de aeração afeta o crescimento das plantas, aumentando seu desenvolvimento com o acréscimo da porosidade de aeração. Grable e Simer (1968) já falavam que a porosidade de aeração mínima tem que ser de 10% para que a difusão de O_2 atenda a demanda do sistema radicular das plantas. A Mip é representada pelos poros com diâmetros menores, sendo os que elevam a capacidade de retenção da água no solo, atuando no armazenamento de água do solo (REICHARDT e TIMM, 2012).

A Ds é uma medida física na qual se faz uma relação entre a massa do solo e seu volume total. Relaciona-se diretamente com a PT do solo, pois quando há maior PT, a massa do solo é menor. Desse modo, maior PT está relacionada com a existência de menor Ds (REICHARDT e TIMM, 2012).

A Ds indica o grau de compactação do solo. Ao se compactar uma amostra, a massa do solo permanece constante e o volume do solo diminui, o que eleva a sua Ds. Desse modo, a compactação tem relação com a porosidade do solo (REICHARDT e TIMM, 2012). A Ds responde, de forma imediata, às alterações de manejo (ALVES; SUZUKI, SUZUKI, 2004), pois reduzindo a mobilização do solo, valores maiores de Ds tendem a ser encontrados (CAVALIERI *et al.*, 2006).

A textura influencia na Ds. Solos mais argilosos tendem a ter PT maior, e com isso menor Ds. O seu espaço poroso é constituído de grande quantidade de microporos, com volume grande de poros, com uma faixa ampla de variação da Ds, podendo variar de 900 a 1600 kg m^{-3} (REICHARDT e TIMM, 2012).

A Kfs do solo mede o volume de água que atravessa, por unidade de tempo, uma unidade de área de uma amostra de solo, demonstrando a facilidade com que um fluido é transportado por um meio poroso. Desta forma descreve a funcionalidade do sistema poroso do solo, englobando propriedades da porosidade do solo, como a quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros (LIBARDI, 2005). Há variação no fluxo devido a diferentes tortuosidades que ocorrem no solo, devido a este conter poros não uniformes, tortuosos e com conexões irregulares (HILLEL, 1998).

A porosidade do solo também é afetada pela textura, desse modo, além da distribuição dos poros, a movimentação da água, com maior ou menor facilidade, dependerá também da textura do solo (BAGARELLO; IOVINO; ELRICK, 2004). De acordo com Brady e Weil (2013) solos arenosos, normalmente, apresentam maior Kfs em relação a um solo argiloso, devido à maior quantidade de macroporos e menor capacidade de absorção de água. O manejo é outro fator que influencia a Kfs, pois altera a estrutura do solo e a porosidade (SCHWARTZ; EVETT; UNGER, 2003).

Gonçalves e Libardi (2013) destacam que a Kfs depende mais da estrutura do que da textura do solo, pois ao elevar o grau de agregação de um solo, o valor da Kfs aumenta. O efeito da estrutura, e em especial dos macroporos, possibilita a um solo argiloso exibir valores de Kfs similares ao arenoso. A Kfs é afetada pela Ds. Isso ocorre porque com o aumento da Ds e da compactação, se diminui os macroporos. O movimento da água em meio saturado se realiza através de grandes poros. Deste modo, a Kfs decresce acentuadamente com o aumento da Ds (MILLAN *et al.*, 2014).

A Kfs controla variáveis importantes como: infiltração de água no solo, escoamento superficial, lixiviação de pesticidas e contaminação do lençol freático (BAGARELLO; IOVINO; ELRICK, 2004). Assim, é necessária para projetos de sistemas de drenagem, medição de infiltração de canais, reservatórios, lagoas de retenção, lagoas de efluentes, monitoramento do movimento de lixiviados no solo, avaliação da recarga de água subterrânea e escoamento superficial, bem como a predição de erosão do solo (IBRAHIM; ALIYU, 2016). A baixa capacidade de infiltração de água no solo, que é controlada pela Kfs, resulta em elevado escoamento superficial, acarretando a erosão do solo. Por isso, a Kfs constitui-se numa característica importante do solo (BAGARELLO; IOVINO; ELRICK, 2004; HEMMAT; AHMADI; MASOUMI, 2007).

Existem diferentes métodos para a determinação da Kfs, pois diferentes técnicas de mensuração da Kfs foram sendo descritas. Bagarello, Iovino e Elrick (2004) propuseram o método de carga decrescente. Este método tem a finalidade de facilitar a determinação da condutividade hidráulica saturada em campo, visto que requer baixo custo, reduzido volume de água e poucos equipamentos que são de fácil transporte.

A RP é uma medida que estima o impedimento mecânico que o solo oferece ao crescimento das raízes. É avaliada com o uso de aparelhos denominados penetrômetros, que compõe-se de uma haste metálica com extremidade cônica que é introduzida no solo por movimento contínuo ou por impacto (REICHARDT e TIMM, 2012).

A RP varia com o teor de umidade do solo e da Ds. De forma geral, quanto maior a RP, menor a umidade (BUSSCHER *et al.*, 1997). Essa afirmação é verdadeira, porém é comum encontrar resultados na literatura mostrando condições em campo onde uma maior umidade do solo representa um ponto com maior RP. Isto ocorre porque o solo mantém maior quantidade de água retida em condições de maior Ds, devido a maior proporção de microporos. Dessa forma, quando se comparam sistemas de manejo, é comum verificar menor RP mesmo em condições de menor umidade. O que se deve observar é que, se todas as camadas estivessem na mesma condição de umidade do solo, a RP seria ainda maior nas camadas com maior Ds (DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999).

Preparos do solo geralmente afetam os valores de RP do solo, pois as camadas com influência do preparo tendem a apresentar menores valores de RP, e o não revolvimento do solo proporciona uma maior RP pelo acúmulo de pressões induzidas pelo tráfego de máquinas (CAVALIERI *et al.*, 2006; CUNHA; CASCÃO; REIS, 2009).

Há grande diversidade de valores críticos de RP para as plantas. A busca desse valor ainda é um campo aberto para pesquisas, e há dificuldade é padronizar para diferentes umidades de avaliações de RP, bem como os tipos de equipamentos utilizados (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Carter (2006) e Reichert (2006) indicam que valores inferiores a 2 Mpa são os mais adequados, pois quanto menor a resistência do solo ao crescimento das raízes, melhor a condição para o crescimento das plantas.

3.1.1.2 Indicadores químicos

Os indicadores químicos do solo para avaliar a qualidade estão correlacionados com a capacidade do solo de fornecer nutrientes para as plantas e reter elementos químicos ou compostos prejudiciais ao meio ambiente e ao crescimento das plantas. O pH do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC), a matéria orgânica e os níveis de nutrientes são os principais indicadores químicos utilizados na avaliação da qualidade do solo (CARDOSO *et al.*, 2013).

Podem ser divididos entre os que indicam os processos do solo ou de comportamento, como o pH e o carbono orgânico; os que indicam a capacidade do solo de resistir à troca de cátions, como a CTC, CTA e os materiais de origem, os que indicam as necessidades nutricionais das plantas, como os nutrientes, a relação dos nutrientes, a

saturação destes nutrientes no solo e os que indicam contaminação ou poluição, como metais pesados (GOMES; FILIZOLA, 2006).

Os indicadores químicos são correlacionados com o rendimento das culturas. As variações de um determinado indicador são facilmente interpretadas, permitindo melhorar as condições químicas do solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas, por meio de adubações e calagem. Os indicadores químicos do solo também podem ser úteis ao considerar a capacidade do solo de sustentar a produção e a sustentabilidade da floresta, mantendo a ciclagem de nutrientes (MANUAL..., 2017; VAN RAIJ, 2011; CARDOSO *et al.*, 2013).

O pH do solo refere-se a de concentração de H^+ no solo, e é importante por controlar a solubilidade de nutrientes no solo e exerce grande influência sobre a absorção dos mesmos pela planta (GOMES; FILIZOLA, 2006). A CTC é a capacidade de troca de cátions do solo, e mede a quantidade total de cátions retidos na superfície das argilas ou colóides minerais e orgânicos existentes no solo (VAN RAIJ, 2011). O carbono é um componente chave da fertilidade do solo, especialmente em condições tropicais, que interage com propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (CARDOSO *et al.*, 2013).

Os nutrientes no solo são a fonte nutricional da planta, sendo fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das culturas. Os mais importantes que podem ser facilmente medidos no solo são o fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Além da disponibilidade destes, a relação entre eles se torna importante. Por exemplo, há necessidade de existir relação de maior proporção de Ca em relação ao Mg para maiores produtividades para as plantas. Porém, este é um assunto polêmico, pela variação de respostas na literatura. Verifica-se que os teores de Ca devem ser maiores que de Mg, em vista do Ca ser requerido em maior quantidade pelas plantas, pela sua função na estrutura e em processos metabólicos. Em geral, esta relação é citada como mais adequada dentro da faixa de 2:1 e 3:1 (MANUAL..., 2017; VAN RAIJ, 2011; TAIZ e ZEIGER, 2013).

A saturação por bases (V%) expressa a porcentagem da CTC do solo que é ocupada por bases como Ca, Mg e K, sendo importante para se conhecer o nível de fertilidade de um solo. Por exemplo, um solo que apresenta V% baixa, há maior adsorção de Al^{3+} e H^+ e menores quantidades de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ adsorvidos nos colóides do solo. Nessas condições, é comum encontrar altos valores de saturação por alumínio (M%). O Al^{3+} é tóxico, e pode comprometer o desenvolvimento radicular das plantas (MANUAL..., 2017; VAN RAIJ, 2011).

Para a definição dos melhores valores para os indicadores químicos no estado do Paraná, pode ser utilizado como parâmetro o Manual de Adubação e Calagem do Estado do Paraná, que estabelece as faixas adequadas para as culturas no estado (MANUAL..., 2017).

3.1.1.3 Seleção de indicadores

A qualidade do solo só pode ser avaliada usando indicadores sensíveis às mudanças induzidas pelo manejo no processo do solo e funções associadas (RAIESI, 2017). Antes de realizar uma avaliação da qualidade do solo, é necessário estabelecer um conjunto mínimo de dados, o qual compreenda indicadores sensíveis às mudanças induzidas pelo manejo. Esta seleção busca identificar um conjunto relevante de atributos do solo, definindo quais devem ser usados como indicadores da qualidade do solo (KIANI *et al.*, 2017; VALLE; CARRASCO, 2018).

Para isto, podem ser usados indicadores que são referência sobre mudanças do solo, utilizando indicadores bem conhecidos, com a opinião de especialistas, ou utilizar de técnicas matemáticas para realizar a seleção de indicadores (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002).

O número de indicadores de qualidade do solo que é realmente analisado em um determinado conjunto de amostras precisa ser reduzido a um conjunto de dados mínimo, pois aumentar o número de indicadores pode aumentar a colinearidade, e ainda a medição de muitos indicadores aumenta consideravelmente o custo e o tempo de trabalho (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Andrews, Karlen e Mitchell (2002) mostraram que a seleção de indicadores por técnicas matemáticas, como a análise dos componentes principais, se mostrou semelhante a opinião de especialistas, e muitas vezes utilizar a seleção de indicadores buscando a opinião de diferentes pesquisadores envolvidos se torna uma discussão difícil em relação a quais variáveis incluir em um índice de qualidade do solo (IQS), a qual pode ser simplificada por métodos estatísticos.

Estudos com métodos estatísticos, entre eles a análise de componentes principais e a análise fatorial, buscando a seleção de indicadores para avaliar a qualidade do solo são encontrados em diversos trabalhos, visando reduzir o número de variáveis, utilizando apenas variáveis que representem bem as mudanças do solo (ANDREWS; KARLEN;

MITCHELL, 2002; RAIESI, 2017; VALLE; CARRASCO, 2018; ZUBER *et al.*, 2017). Alguns indicadores são menos úteis que outros devido à forte correlação entre eles (GREGORICH, 2006).

Os métodos matemáticos, para a seleção de um conjunto mínimo de dados, possuem a desvantagem de requerer um grande conjunto de dados existente, e pode não funcionar se o número de indicadores ou observações for baixo. É de grande relevância quando se dispõe de muitas informações e se deseja trabalhar com as informações com um melhor peso de resposta. A partir de uma seleção pré-estabelecida, pode não haver necessidade de testar uma ampla gama de outros indicadores para avaliar a qualidade do solo ao longo do tempo, porém não se tem informações sobre por quanto tempo esses indicadores são significativos, ou se a outros sistemas produtivos naquele mesmo clima e tipo de solo, esses indicadores podem ser aplicados (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002).

3.1.2 Índice de qualidade do solo (IQS)

Quando os indicadores são agregados de alguma maneira, a medida resultante é um índice (NESS *et al.*, 2007). Este índice integra todas as informações e transmite estas em um único valor, o qual tem potencial de superar as fronteiras disciplinares promovendo discussões mais promissoras (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002; DROBNIK *et al.*, 2018).

A quantificação da qualidade do solo pode ser estabelecida em um índice numérico. A computação dos índices de qualidade do solo ajuda a combinar diferentes indicadores e processos do solo em uma ferramenta simples que explica as mudanças do solo em resposta às diferentes práticas de cultivo, e permite monitorar os efeitos do uso agrícola do solo (MELO FILHO; MUKHERJEE; LAL, 2014; SOUZA; SILVA SOUZA, 2007).

O IQS fornece informações que ajudam a identificar as práticas de manejo mais sustentáveis, sendo uma ferramenta eficaz para avaliar os impactos das práticas de gestão agrícola no solo (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002; YU *et al.*, 2018), o que é benéfico a todos os envolvidos no uso da terra, como os produtores, possuidores das terras, conservacionistas de recursos, outros administradores envolvidos e toda a população, pois é interesse comum produzir alimentos mantendo os recursos naturais preservados (ANDREWS; KARLEN, D L; MITCHELL, 2002). Um objetivo do IQS é informar os

agricultores e outros administradores de terras sobre o efeito do manejo do solo na funcionalidade do solo (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Existe uma forte necessidade de desenvolver um IQS de fácil utilização (MUKHERJEE; LAL, 2014), sendo este uma boa ferramenta para identificar problemas de manejo relativos à sustentabilidade do uso do solo (HUSSAIN *et al.*, 1999). Leite Chaves, Concha Lozada e Gaspar (2017) propuseram um IQS robusto, na busca em facilitar os estudos sobre qualidade do solo em países subdesenvolvidos. Este índice utilizou de indicadores químicos, físicos e biológicos relevantes que podem ser facilmente medidos, onde os diferentes pesos refletem a classificação da qualidade do solo nos tratamentos, avaliada pelos diferentes indicadores do solo. Adeyolanu e Ogunkunle (2016) realizaram um trabalho de avaliação da qualidade do solo utilizando dois métodos, um quantitativo e outro qualitativo. Porém avaliações qualitativas deixam algumas lacunas, sendo que as avaliações quantitativas fornecem um conhecimento mais detalhado, porém requer medições laboratoriais (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Foi desenvolvida nos EUA uma Estrutura de Avaliação do Manejo do Solo (SMAF) demonstrada no trabalho de Andrews, Karlen e Cambardella (2004) e esta tem sido usada como uma ferramenta para avaliar e quantificar mudanças na qualidade do solo induzidas por usos da terra e práticas agrícolas. A avaliação da qualidade do solo é realizada a partir da seleção de indicadores, e com esta seleção, cada indicador é padronizado a um valor que varia entre 0 e 1, podendo este ser baseado em curvas de pontuação e um IQS pode ser calculado (ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; BÜNEMANN *et al.*, 2018). Esta metodologia de avaliação da qualidade do solo vem sendo desenvolvida em diversas partes do mundo (CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017) e no Brasil o primeiro trabalho desenvolvido pela metodologia SMAF foi realizado por Cherubin *et al.* (2016), na cultura da cana de açúcar.

Esta estrutura de avaliação do manejo do solo mostra-se flexível e contextual à avaliação da qualidade do solo, e vários estudos recentes aplicam métodos estatísticos multivariados para selecionar os indicadores mais relevantes e utilizam funções de pontuação para chegar a um IQS voltado para as condições específicas (BÜNEMANN *et al.*, 2018). Cherubin, Tormena e Karlen (2017) concluem que o SMAF pode ser usado como uma ferramenta para avaliar a qualidade dos solos brasileiros, ajudando agricultores, administradores de terras e políticos a tomarem melhores decisões em relação a práticas sustentáveis de uso e manejo da terra.

Porém ainda há falta de estudos para classes específicas de solo (VALLE; CARRASCO, 2018), pois fatores como material de origem, clima, topografia e hidrologia podem influenciar os valores potenciais das propriedades do solo (BÜNEMANN *et al.*, 2018). A avaliação periódica da qualidade do solo é necessária nos trópicos, devido à natureza frágil dos solos tropicais (ADEYOLANU e OGUNKUNLE, 2016).

3.2 USO E PREPARO DO SOLO

O solo é a base de sustentação de todo habitat vegetal e animal. Resultado da interação do clima, relevo, organismos e tempo sob um material de origem, garante a sustentação da vegetação. O estabelecimento de sistemas agrícolas produtivos gera alteração na vegetação natural, o que pode influenciar no ambiente do solo. Além disso, práticas de preparo do solo para o estabelecimento das culturas também interferem nas condições do solo. Desse modo a interferência antrópica modifica o ambiente do solo e de fatores ambientais interligados (CASSOL; DENARDIN; ALBERTO, 2007; MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984).

O preparo do solo é um conjunto de técnicas que visam melhorar as condições de cultivo buscando aumentar a produtividade das culturas e a qualidade do solo (MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984; MUKHERJEE; LAL, 2014). Visa atender aspectos como: eliminação de plantas indesejáveis e a obtenção de condições favoráveis para a semeadura ou plantio, germinação, emergência e desenvolvimento das plantas. Muitas vezes se torna necessário para a eliminação de camadas compactadas, buscando melhorar a infiltração de água e promover a incorporação de corretivos e fertilizantes (MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984).

O preparo do solo deve ser avaliado conforme o clima específico da região (PRIMAVESI, 2002). Historicamente, regiões temperadas da Europa tiveram sucesso com o preparo do solo mais intensivo, com inversão da camada do solo, por possibilitar o degelo mais rápido e aquecimento do solo. Esta técnica foi aplicada em outras regiões de climas tropicais e subtropicais, com regimes de chuvas mais intensos e sem a necessidade de aquecer o solo, mas sim com a necessidade de proteger o solo da insolação intensa. Assim o preparo intensivo não se mostrou totalmente adequado, podendo aumentar o potencial de degradação do solo das áreas agrícolas por erosão (PRIMAVESI, 2002; MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984, CASSOL; DENARDIN; ALBERTO, 2007).

Desse modo, práticas conservacionistas foram introduzidas, com a redução do preparo do solo, ou mesmo realizando a semeadura ou plantio sem preparo do solo. O plantio direto passou a ser adotado e entendido como um método alternativo de preparo do solo (DENARDIN *et al.*, 2001). Porém esta prática só se tornou viável com o desenvolvimento de controle químico de plantas daninhas, com o surgimento dos herbicidas (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998; CASSOL; DENARDIN; ALBERTO, 2007).

No Brasil, na década de 1970, produtores rurais tiveram a iniciativa de substituir o preparo convencional do solo, que era a prática de preparo do solo predominante, pelo plantio direto, devido a problemas de degradação do solo por erosão e elevados custos com as operações de preparo. A região Sul do Brasil foi pioneira, e a técnica foi se difundindo entre os produtores, incentivando assim entidades técnico-científicas a investirem em pesquisa sobre os preparos do solo. No Paraná, as cidades de Castro e Ponta Grossa foram as que apresentaram maior crescimento inicial do sistema, por iniciativa dos produtores rurais (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998).

Contudo, problemas com compactação do solo, muitas vezes advindos de uma estrutura degradada por sistemas intensivos de produção (CARVALHO LEITE; MACIEL; ARAÚJO, 2014) geraram a necessidade de realizar alguma operação para romper camadas compactadas, mas não de forma tão intensiva como o preparo convencional. Desta forma outros preparos do solo foram sendo desenvolvidos e testados, reduzindo operações de preparo. Tais operações foram denominadas de preparo mínimo (RAMOS; DEDECEK, 1979).

Esta redução de operações de preparo foi se mostrando vantajosa para os produtores por possibilitar controle de invasoras com menor número de operações, reduzindo custos e tempo de preparo do solo quando comparado ao preparo convencional (RAMOS; DEDECEK, 1979). Desse modo, nos últimos anos, métodos de preparo de solo, como o preparo mínimo e a semeadura direta vêm sendo adotados em substituição aos preparos convencionais (IVO; MIELNICZUK, 1999).

Assim diferem-se três principais preparos do solo para culturas comerciais: plantio direto (PD), preparo convencional (PC) e preparo mínimo (PM). Tais preparos, por não revolverem o solo, revolvê-lo parcialmente, ou por ocasionar um maior revolvimento podem provocar diferenças no solo, e estas podem influenciar o desenvolvimento do

sistema radicular das plantas, e, por consequência, sua produtividade (IVO; MIELNICZUK, 1999; DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999).

3.2.1 Sistema preparo convencional

Consiste em um preparo mais intensivo solo, realizado, basicamente, com aração e gradagens. O arado efetua o corte, elevação, inversão do solo, em uma profundidade de aproximadamente 20 a 25 cm, cobrindo a maior parte das plantas e restos vegetais, ocorrendo pouca mistura do solo. Esta etapa é denominada preparo primário do solo. A gradagem complementa esse trabalho, misturando o solo, diminuindo o tamanho dos agregados do solo e nivelando o terreno, operação denominada como preparo secundário do solo. A profundidade atingida pela gradagem é de 10 a 15 cm, não ultrapassando metade da profundidade atingida pelo preparo primário (GABRIEL FILHO *et al.*, 2000; MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984).

No Brasil, historicamente predominava o PC para a implantação das culturas, deixando o solo praticamente descoberto na fase de implantação e desenvolvimento inicial das culturas. Essa prática foi trazida das regiões temperadas e mostrou-se inadequada para as regiões tropicais e subtropicais, sendo apontada como a principal causa de degradação dos solos nestas regiões (MIELNICZUK *et al.*, 2003). A inversão das leivas, enterrando a cobertura vegetal e deixando o solo exposto a agentes erosivos, alterando ainda a agregação do solo, pode proporcionar aumento da erosão (GABRIEL FILHO *et al.*, 2000).

No PC, o preparo do solo geralmente favorece uma menor RP nas camadas mais superficiais do solo, porém com maiores valores de RP nas camadas mais profundas (ALVES; SUZUKI, 2004). A umidade do solo nas camadas superficiais tende a ser menor em relação ao plantio direto, o processo de secamento nas camadas superficiais em PC ocorre de forma mais intensiva, em virtude da menor Mip nestas camadas, juntamente com menor cobertura do solo (SALTON; MIELNICZUK, 1995).

A Mip em PC pode ser maior nas camadas mais profundas, em virtude de maior Ds nestas camadas as quais não são atingidas nas operações de preparo (ALVES; SUZUKI, 2004), podendo resultar em maior retenção de água (SALTON; MIELNICZUK, 1995). Esta maior Ds nas camadas subsuperficiais sob PC podem agravar o problema de erosão, em virtude da dificuldade de infiltração da água da chuva, favorecendo um escoamento superficial e subsuperficial a partir da saturação do solo (GABRIEL FILHO *et al.*, 2000).

3.2.2 Sistema plantio direto

O plantio direto (PD) consiste no plantio ou semeadura em solo não revolvido, sendo que o mínimo revolvimento ocorre apenas no sulco de semeadura ou plantio (MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984).

O PD, devido a maior manutenção da cobertura do solo, pode apresentar menor variação da temperatura do solo, bem como menor temperatura média, reduzindo a evaporação da água. Pode ainda manter maior quantidade de água na camada superficial, mantendo por mais tempo a quantidade de água disponível às plantas, o que pode ser obtido também pela maior Mip, o que altera a energia com que a água está adsorvida ao solo (SALTON; MIELNICZUK, 1995; FUNDAÇÃO CARGILL, 1985).

O PD, com mobilização apenas na linha de semeadura, mantém os restos culturais na superfície do solo. Dessa forma, um efeito considerado neste sistema é a redução da erosão, apresentando outras vantagens como aumento no teor de matéria orgânica e economia de combustível nas operações agrícolas (DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999; FUNDAÇÃO CARGILL, 1985).

Devido ao não revolvimento do solo, encontram-se maiores valores de Ds e RP nas camadas mais superficiais do PD em comparação a outros preparos do solo. Em camadas mais profundas, já se encontram valores próximos aos demais manejos para estas medidas (SALTON; MIELNICZUK, 1995; DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999). O não revolvimento do solo favorece a agregação e melhora da estrutura do solo (CNPT-EMBRAPA; FUNDACEP-FECOTRIGO; ABC, 1993).

Os maiores valores de Ds e RP no PD podem não ser tão restritivos ao crescimento radicular, não reduzindo a densidade de raízes devido a continuidade de poros formados por raízes e organismos, e pela maior umidade mantida nesses solos (DE MARIA; CASTRO; DIAS, 1999).

A evolução da área cultivada em plantio direto no Brasil é notada ao longo dos anos, resultado dos benefícios observados ao solo. Em 1975/1976 o plantio direto ocupava uma área de 32.500 ha; vinte anos depois a área já era de 5.500.000 ha; em 2005/2006 passou para 25.501.656 ha, e em 2011/2012 passou para 31.811.000 ha. No Paraná, o último levantamento do ano de 2014 mostra um total de 5.319.966 ha de área cultivada em plantio direto, um equivalente a 91,65% da área física total das culturas de verão (FEBRAPDP, 2018).

3.2.3 Sistema preparo mínimo

O preparo mínimo (PM) é caracterizado pela redução de operações de preparo do solo. Por sistemas de PM do solo, compreende-se a semeadura de uma determinada cultura com movimentação reduzida do solo. Há várias formas de preparo mínimo do solo de acordo com a intensidade de movimentação, podendo ser usados diferentes implementos, como escarificadores ou grades pesadas para o preparo primário e grades leves no preparo secundário (RAMOS; DEDECEK, 1979; FUNDAÇÃO CARGILL, 1985).

O uso de escarificador causa menos desagregação ao solo do que o arado do PC, porém sem enterrar a maior parte dos resíduos vegetais. É apropriado para quebrar camadas compactadas a profundidades de 10 a 20 cm. A grade pesada tem como objetivo soltar e misturar o solo, eliminando também plantas daninhas. É considerada um dos implementos que mais contribuem para a erosão dos solos, pois não ultrapassa 10 a 12 cm de profundidade não conseguindo romper as camadas compactadas de 10 a 20 cm de profundidade (MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984).

Já a gradagem, compreendida como uma operação de preparo secundário do solo, é destinada a destorroar, nivelar e misturar o solo após um preparo primário, ou de forma isolada, realizando apenas a gradagem. A profundidade de trabalho é de 10 a 15 cm (MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984). Verifica-se que de acordo com os implementos utilizados no PM, os resultados obtidos podem ser diferenciados.

Alguns trabalhos demonstram vantagens neste preparo. Gabriel Filho *et al.* (2000) utilizando o PM com revolvimento com sulcador apenas na linha de plantio para a cultura da mandioca, verificaram menores valores de Ds e RP em comparação ao PC. Citam que este resultado pode advir do fato da atuação das plantas de cobertura utilizadas nos experimentos, as quais foram mantidas em maior proporção que no PC, com aumento da cobertura morta do solo e redução do impacto da chuva sob o solo. Sistemas de PM do solo apresentaram produção de soja superior àquela obtida nas parcelas com PC (RAMOS; DEDECEK, 1979).

O PM busca manter pelo menos 30% de cobertura sobre a superfície do solo, desse modo busca-se neste preparo reduzir a evaporação e aumentar a taxa de infiltração de água, ocasionando maior disponibilidade da água às culturas, podendo refletir em maiores produtividades (SALTON; MIELNICZUK, 1995).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na Estação Experimental do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) no município de Ponta Grossa (PR), na latitude 25°09'S e longitude 50°09'W, com 865 m de altitude. O experimento foi implantado no ano de 1981, buscando iniciar os estudos sobre preparo do solo e plantio direto. Compreende uma área manejada por 36 anos em diferentes preparos do solo.

No ano de 1981 se deu início ao experimento, inicialmente com a condução de dois sistemas de preparo do solo: plantio direto e preparo convencional (Figura 01). Em 1989, a área de preparo convencional foi dividida, para realizar o preparo mínimo no mesmo local de estudo (Figura 02). O manejo diferenciado nestas áreas foi mantido, chegando ao ano de 2017 com um histórico de 36 anos de condução em sistema plantio direto, 36 anos de condução em sistema plantio convencional e 28 anos em sistema cultivo mínimo.

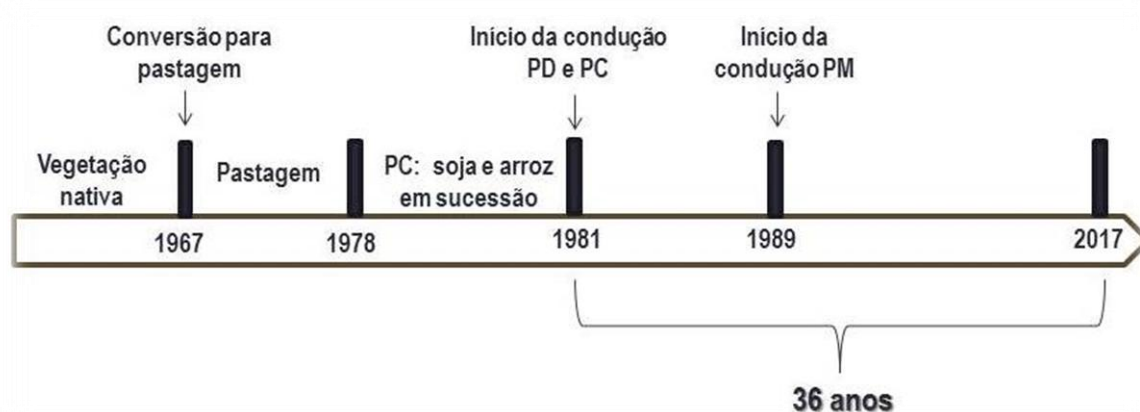


Figura 1: Histórico da área experimental. PD - plantio direto; PC - preparo convencional; PM - preparo mínimo. Fonte: A autora (2018).

Os três sistemas de preparo do solo consistem em preparo convencional (PC): preparo do solo com uma aração, com arado de disco, seguida por duas gradagens; preparo mínimo (PM): preparo do solo com grade pesada seguida por duas gradagens leves; plantio direto (PD): revolvimento do solo apenas na linha de semeadura. Em todos os preparos do solo, foram utilizadas sempre as mesmas culturas.

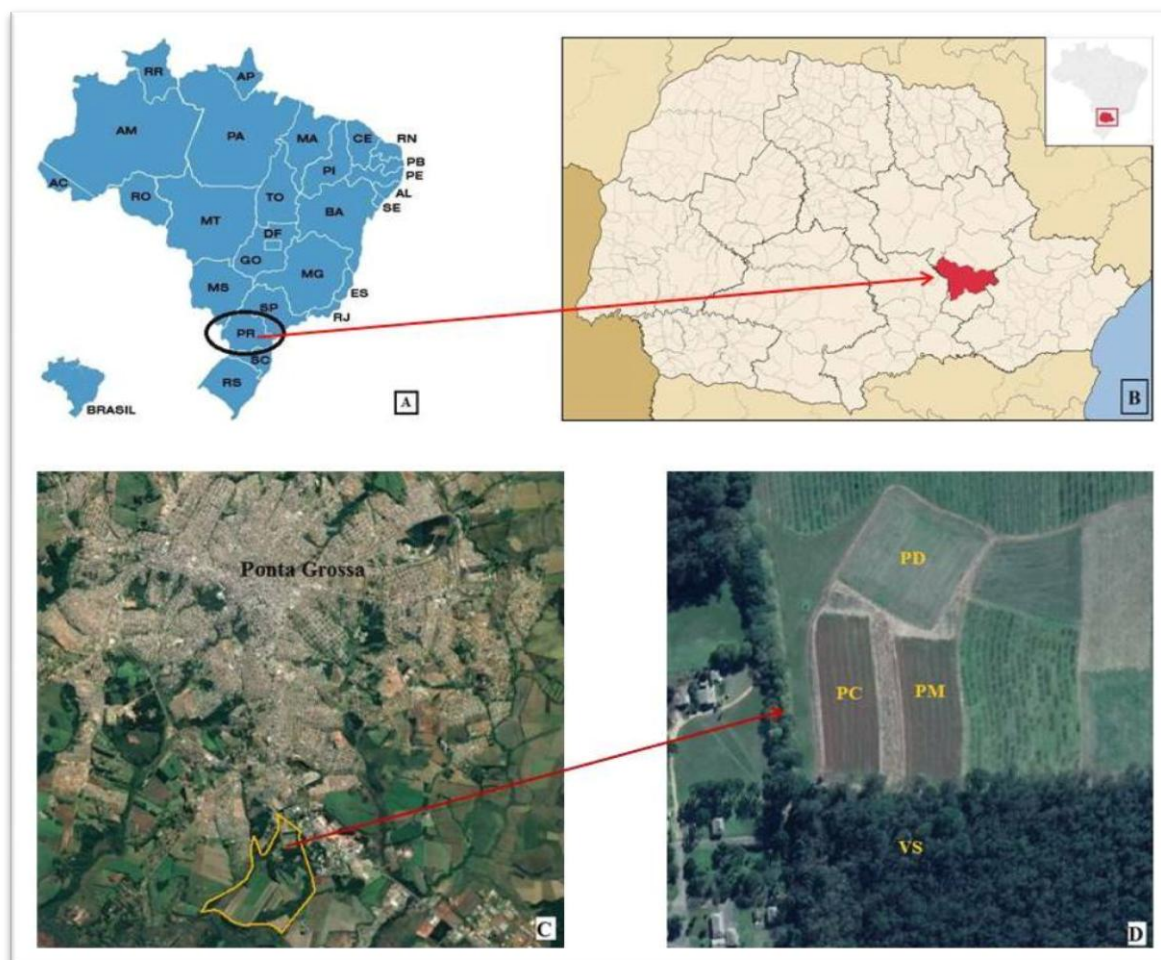


Figura 2: Mapa do Brasil (A). Localização geográfica do município de Ponta Grossa (B). Imagem de satélite da cidade de Ponta Grossa e localização do IAPAR (C). Imagem de satélite da Estação Experimental do IAPAR (D): PD - plantio direto; PC - preparo convencional; PM - preparo mínimo; VS - vegetação secundária. Fonte: A autora (2018).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, com teores aproximados de $72,6 \text{ g kg}^{-1}$ de argila, $21,2 \text{ g kg}^{-1}$ de silte e $6,2 \text{ g kg}^{-1}$ de areia (MEDEIROS *et al.*, 2011), proveniente de folhelhos da formação Ponta Grossa (MELO, 1999). Os minerais presentes nesta área, segundo Gonçalves *et al.* (2008) foram: gibbsita, caulinita, haloisita, montmorilonita, hematita, rutilo, anatásio, goethita e quartzo. O solo sob vegetação secundária preservada, localizada ao lado do experimento (Figura 02), foi considerado como uma referência para a sua qualidade e limitação.

A sequência de culturas, a partir da safra de verão de 1981/1982 até a safra de verão 2017/2018 estão especificadas na Tabela 1, de acordo com os registros presentes do histórico da área, fornecidos pelo IAPAR.

Tabela 1: Sequência de culturas, cultivadas desde o início do experimento (1981), submetidas à diferentes sistemas de manejo do solo (Preparo convencional – PC; Preparo Mínimo – PM; Plantio Direto – PD).

Ano	Sequência de culturas		Produtividade (kg ha ⁻¹) - Verão		
	Verão	Inverno ⁽¹⁾	PC	PM	PD
1981-1989	Soja	Trigo	-(²)	-	-
1989-1991	Soja	Aveia preta	-	-	-
1991-1992	Milho	Trigo	-	-	-
1992-1993	Soja	Aveia preta	-	-	-
1993-1994	Soja	Tremoço	-	-	-
1994-1995	Milho	Aveia preta	-	-	-
1995-1996	Soja	Trigo	1660	2318	2064
1996-1997	Soja	Aveia preta	1610	1424	1431
1997-1998	Milho	Aveia preta	-	-	-
1998-1999	Soja	Trigo	1660	2318	2064
1999-2000	Milho	Aveia preta+Ervilhaca	1610	1424	1431
2000-2001	Milho	Aveia preta	-	-	-
2001-2002	Soja	Aveia preta	-	-	-
2002-2003	Soja	Aveia preta+Ervilhaca	-	-	-
2003-2004	Milho	Aveia preta	-	-	-
2004-2005	Soja	Aveia preta	-	-	-
2005-2006	Milho	Aveia preta	7396	-	8303
2006-2007	Soja	Aveia preta	-	-	2820
2007-2008	Milho	Centeio	-	-	-
2008-2009	Soja	Ervilhaca	2403	3151	3538
2009-2010	Milho	Aveia preta	-	-	-
2010-2011	Soja	Ervilhaca	3101	3115	2783
2011-2012	Milho	Aveia preta	-	-	-
2012-2013	Soja	Aveia preta+Ervilhaca	-	-	-
2013-2014	Milho	Aveia preta	-	-	-
2014-2015	Soja	Aveia preta	-	-	-
2015-2016	Milho	Aveia preta	-	-	-
2016-2017	Soja	Aveia preta	-	-	-
2017-2018	Milho	-	6574	7315	6096

⁽¹⁾Culturas utilizadas como cobertura do solo, exceto o trigo. Sem avaliação da produtividade.

⁽²⁾Produtividades não disponíveis nos registros fornecidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná.

Nos anos de 1989 a 1995, foi conduzido nestas áreas um experimento para avaliação de perdas de solo e água. O experimento foi realizado em condições de chuva natural e as perdas do solo foram maiores no tratamento com uma gradagem pesada e duas gradagens leves (PM), a qual ocorreu em grande maioria após eventos extremos de precipitação. Estes eventos extremos (precipitação de 107 mm e 88 mm) resultaram em

uma perda de solo de 8,50 e 7,20 t ha⁻¹ no PM; 0,640 e 0,453 t ha⁻¹ no PC; 0,033 e 0,132 t ha⁻¹ no PD (MONDARDO *et al.*, 2016).

A maior perda de solo no PM ocorreu devido a um fluxo do solo por remoção dos sedimentos por uma massa de solo supersaturada sobreposta a uma camada de solo adensada (MONDARDO *et al.*, 2016). O preparo com grade pesada foi citado como um preparo que mais contribui para a erosão dos solos (MAZUCHOWSKI; DERPSCH, 1984).

A vegetação secundária (VS) consiste em uma floresta de regeneração, resultante de processos naturais de sucessão. A área foi povoada em renques com espécies de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) na década de 1940, visando estudar a adaptação de espécies do gênero na região. O processo de formação da floresta foi estimulado pela fauna, como aves e mamíferos de pequeno porte nativos da região, que realizaram a dispersão de sementes de espécies nativas, processo conhecido como zoocoria. Dessa forma, a VS hoje possui algumas espécies antigas de *Eucalyptus* spp. e demais espécies nativas resultado de sua regeneração.

O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Koppen, é do tipo Cfb - clima temperado, caracterizado por apresentar temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida.

4.2 AMOSTRAGEM

As coletas e análises do solo ocorreram no ano de 2017, no período de entressafra das culturas de verão. A amostragem foi realizada em malha de 10 x 5 com espaçamento regular de 10 metros, coletando 50 pontos em cada preparo do solo e na vegetação secundária. A Figura 03 ilustra um esquema representativo da realização das amostragens a campo.

Os pontos foram demarcados com bandeiras e georreferenciados com aparelho modelo TRIMBLE R4 geodésico de dupla frequência pós-processado de alta precisão (Figura 03). A correção das coordenadas foi realizada utilizando o software Trimble Business Center.

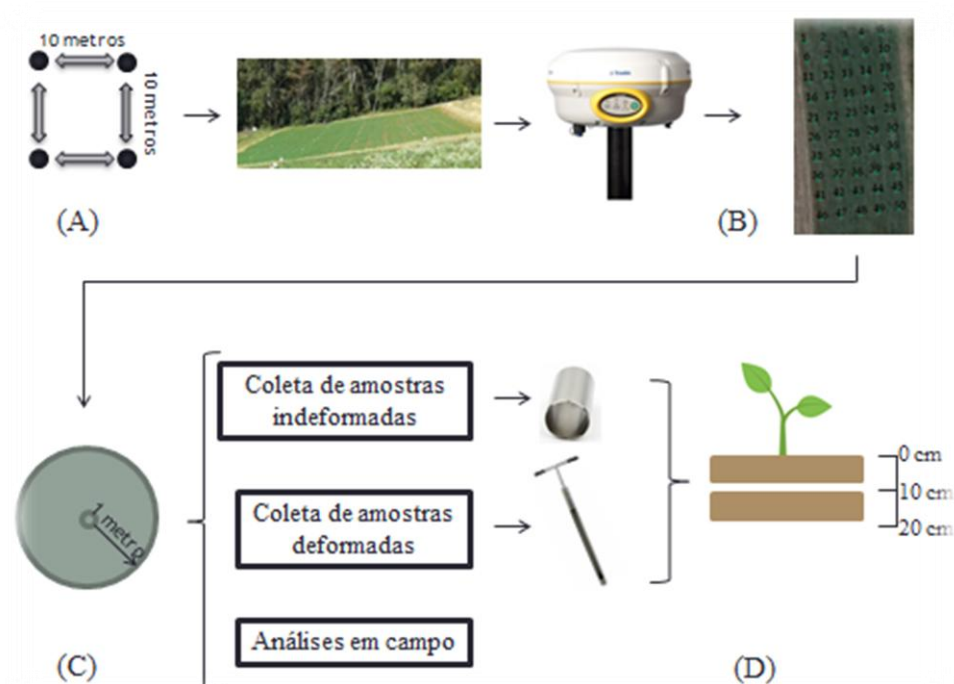


Figura 3: Esquema representativo das atividades em campo. Demarcação dos pontos em malha regular (A). Georreferenciamento (B). Coletas e análises em campo realizadas no raio de 1 metro da marcação do ponto (C). Coleta de amostras indeformadas e deformadas realizadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm (D). Fonte: A autora (2018).

Em cada ponto, as amostragens foram realizadas no raio de um metro do local demarcado. Para cada preparo do solo e na vegetação secundária, cada ponto foi identificado com um número variando de 1 a 50, permitindo conhecer a localização de cada ponto. Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 5x5 cm, com amostrador Uhland, composto por um anel de alumínio no qual é acoplado o anel volumétrico para a coleta do solo, e uma haste que facilita ao operador a realização da amostragem. Após a coleta, o material foi levado ao laboratório para a realização do preparo das amostras (Figura 04).

As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de trado calador (Figura 04). Essas amostras foram levadas ao laboratório, secas em estufa a 40°C com circulação forçada de ar, e submetidas à fragmentação manual, realizado o peneiramento em peneira de malha de 2,0 mm.

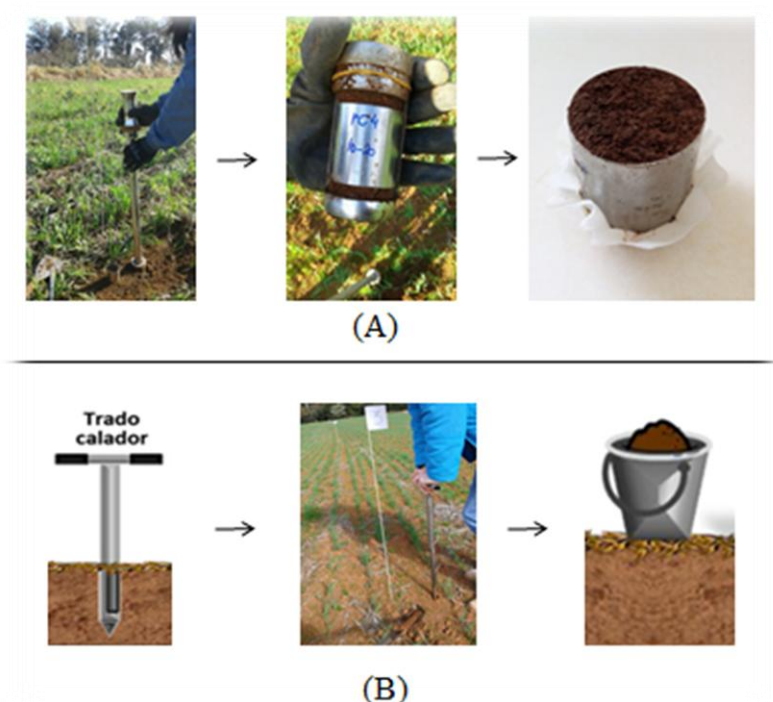


Figura 4: Esquema representativo das atividades de coleta e preparo das amostras. Coleta de amostras indeformadas e preparo da amostra (A). Coleta de amostras deformadas (B). Fonte: A autora (2018).

As análises realizadas em campo foram a Kfs de campo, RP e a umidade do solo, com metodologias descritas a seguir.

4.3 ANÁLISES FÍSICAS

As análises físicas foram realizadas no Laboratório do IAPAR, do Polo Regional de Ponta Grossa. Foram utilizadas as amostras indeformadas para as determinações de Ds, PT, Map e Mip. Estes indicadores físicos do solo foram determinados empregando a metodologia da EMBRAPA (2011, 2017). Em campo foram medidas a Kfs e RP.

4.3.1 Porosidade do solo

A PT, Map e Mip foram determinadas seguindo a metodologia da Embrapa Solos (EMBRAPA, 2011). No laboratório, as amostras indeformadas foram saturadas com água por capilaridade. Após a saturação, as amostras foram pesadas e levadas a mesa de tensão, aplicando uma tensão de -6 kPa, a qual retira a água dos macroporos do solo (Figura 04).

Após cessar a drenagem da água (aproximadamente 4 dias), os anéis foram pesados e levados a estufa para retirar a água dos microporos (24 horas a 105°C).

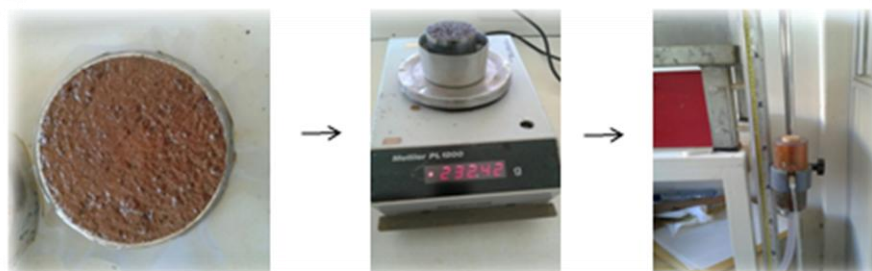


Figura 5: Ilustração demonstrativa da saturação de anéis, pesagem e mesa de tensão. Fonte: A autora (2018).

Com o peso seco dos anéis de solo e o peso obtido após serem retirados da mesa de tensão, a Mip pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$Mip = (a - b) / c$$

Onde:

Mip: microporosidade ($m^3 m^{-3}$);

a: massa da amostra retirada da mesa de tensão (kg);

b: massa da amostra seca a 105 °C (kg);

c: volume do cilindro (m^3).

A macroporosidade pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$Map = Vs - Mip$$

Onde:

Map: macroporosidade ($m^3 m^{-3}$);

Vs: volume de saturação ($m^3 m^{-3}$);

Mip: microporosidade ($m^3 m^{-3}$).

Para a determinação da PT, ou seja, volume de poros totais do solo ocupado por água e/ou ar, pode-se somar a Map com a Mip

$$\text{Porosidade total} = Mip + Map$$

Onde:

Mip: microporosidade ($m^3 m^{-3}$);

Map: macroporosidade ($m^3 m^{-3}$).

4.3.2 Densidade do solo (Ds)

Os anéis coletados nas duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) foram utilizados também para a determinação da Ds, conforme metodologia da Embrapa Solos (EMBRAPA, 2011).

Com o peso seco das amostras, obtido a partir do mesmo preparo para a determinação da PT, Map e Mip, e medindo o volume de cada anel, a Ds foi calculada pela seguinte fórmula:

$$Ds = a/b$$

Onde:

Ds: densidade do solo ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$);

a: massa da amostra seca a 105°C (kg);

b: volume do anel ou cilindro (dm^3).

4.3.3 Condutividade hidráulica saturada do solo (Kfs)

A Kfs foi determinada em campo, pelo método de carga decrescente. Este método foi proposto por Bagarello, Iovino e Elrick (2004), com a finalidade de facilitar a determinação da Kfs em campo, visto que requer baixo custo, reduzido volume de água e poucos equipamentos que são de fácil transporte. Assim, esta metodologia apresenta a vantagem de menor tempo para determinação e com mínimo grau de perturbação do solo.

A Kfs foi determinada nos 50 pontos em cada sistema de preparo do solo e na VS, totalizando 200 pontos de análise. Para a determinação do volume de água a ser utilizado, foi determinada a umidade do solo nos dias de análise, e conhecendo a porosidade do solo, foi calculada a quantidade de água a ser utilizada para saturar o solo. O valor encontrado foi de 0,449 L, portanto buscando padronizar e garantir a saturação do solo em todos os pontos, o volume de água utilizado foi de 0,5 L. A área do anel fixado no solo para a saturação foi de $307,90 \text{ cm}^2$.

A sequência de determinação da Kfs é representada na Figura 6. Inicialmente o anel, de diâmetro de $19,8 \text{ cm}^2$, foi cravado ao solo a 5 cm de profundidade. O volume de água (0,5 L) foi aplicado sobre o solo na área total do anel, e o tempo de infiltração foi cronometrado, a partir da aplicação de água para o instante em que a área de superfície do solo não é mais coberta por água. Após o tempo requerido para a infiltração de água no

solo, este foi coletado com anéis volumétricos (5x5 cm) no local onde foi determinada a K_{fs} (maior umidade) e ao lado (menor umidade), para verificação da diferença de umidade volumétrica.



Figura 6: Sequência da determinação da K_{fs} . Anel cravado ao solo (A). Saturação e cronometragem do tempo de infiltração (B). Local de realização da K_{fs} e coleta de anéis (C). Fonte: A autora (2018).

Após a coleta, os anéis foram pesados e levados a estufa por 24 horas a 105°C, retirando a umidade do solo para posterior cálculo da umidade volumétrica. Foi determinada a diferença da umidade volumétrica ($\Delta\theta$), calculada a relação entre o volume da água e a área do anel (D), e com o tempo de infiltração da água no solo (ta) e o parâmetro α , foi calculada a K_{fs} pela equação:

$$K_{fs} = \frac{\Delta\theta}{(1-\Delta\theta)ta} \left[\frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D+(1/\alpha^*)}{1-\Delta\theta} \ln \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)D}{\Delta\theta(D+(1/\alpha^*))} \right) \right]$$

K_{fs} : condutividade hidráulica saturada;

$\Delta\theta$: diferença de umidade volumétrica;

$D = V/A$ é a relação entre o volume da água e a área do anel;

ta é o tempo de infiltração da água no solo;

α^* é uma constante que varia entre: 1; 4; 12 e 36.

O parâmetro α utilizado para o cálculo da K_{fs} foi 12, devido ao solo ser estruturado, e apresentar tempo de infiltração inferior a 5 minutos.

4.3.4 Resistência do solo a penetração (RP)

A RP foi medida a campo com penetrômetro eletrônico modelo PenetroLOG PLG1020. As medições foram realizadas de forma automatizada, com o penetrômetro acoplado a um amostrador, possibilitando a realização das medições em velocidade constante (Figura 7). Utilizou-se o cone tipo 03, com haste de 40 cm de comprimento e diâmetro do cone de 7,94 mm. Foi realizada a medida de RP nos 50 pontos por preparo do solo e na vegetação secundária, totalizando 200 pontos.

O conteúdo de água volumétrico foi medido no mesmo ponto de medição da RP, logo após esta, utilizando um sensor modelo Delta T Devices ML2 (Moisture Meter) (Figura 7), que detecta o conteúdo volumétrico de água por meio de medições de mudanças na constante dielétrica aparente. A medição do conteúdo de água foi realizada nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, coincidindo com a profundidade medida de RP.

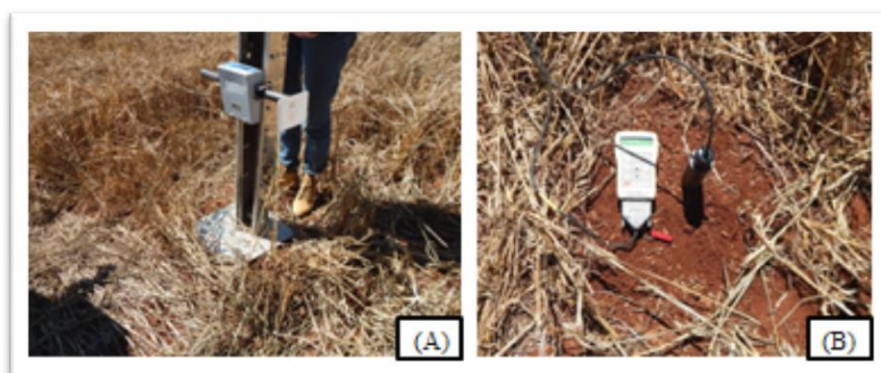


Figura 7: Medição da RP com penetrômetro de campo (A) e medição de umidade com TDR (B). Fonte: A autora (2018).

O conteúdo de água médio na camada de 0-10 cm foi de $0,2352 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,3230 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 10-20 cm. São valores de umidade abaixo da capacidade de campo, considerada uma boa condição para realizar as medidas de RP. Para obter esta condição, a medida foi realizada após 3 dias de uma chuva de 39,2 mm (ÁGUAS PARANÁ, 2018).

4.4 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Nutrição de Plantas da UEPG, utilizando as amostras deformadas previamente preparadas. Os indicadores químicos do solo foram determinados empregando os métodos sugeridos por Pavan *et al.*,

(1992), exceto para P disponível, avaliado conforme Van Raij *et al.*, (1986) e carbono orgânico total (método Walkey-Black), avaliado conforme Cantarella *et al.*, (2001).

Para a determinação do pH em H₂O, CaCl₂ (0,01M) e KCl (1M), foi utilizada a relação solo:solução de 1:2,5 (10 cm³ de solo para 25 ml de cada solução). Após a leitura do pH em CaCl₂, adicionou-se 4 ml da solução tampão SMP, para determinação da acidez potencial (H+Al). Os teores de alumínio (Al) trocável foram determinados através da solução extratora de KCl 1M, na relação solo:solução de 1:10.

Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis foram determinados através da solução extratora de KCl 1M, na relação solo:solução de 1:10. Posteriormente obteve-se a relação Ca/Mg.

Os teores de potássio (K) trocável e fósforo (P) disponível foram extraídos com a solução Mehlich-1, na relação solo:solução de 1:10. Para a determinação de K as leituras das amostras foram realizadas em fotômetro de chama. Para a determinação de P foi efetuada a leitura com espectrofotometria de absorção molecular em modo de transmitância a 660 nm.

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados através do Método de Walkley-Black. A capacidade de troca de cátions (CTC a pH 7) do solo foi obtida pela soma dos cátions trocáveis do solo (Ca⁺², Mg⁺², K⁺, H⁺ e Al⁺³)

Os valores da saturação por bases (V%) foram calculados pela seguinte fórmula:

$$V = [(Ca + Mg + K) / (Ca + Mg + K + H + Al)] \cdot 100$$

Onde:

V = saturação por bases, em %;

Ca = teores de Ca trocável, em cmol_c dm⁻³;

Mg = teores de Mg trocável, em cmol_c dm⁻³;

K = teores de K trocável, em cmol_c dm⁻³;

H+Al = teores de H+Al, em cmol_c dm⁻³.

Os valores de saturação por alumínio (M%) foram calculados pela seguinte fórmula:

$$M = [Al / (Ca + Mg + K + H + Al)] \cdot 100$$

Onde:

M = saturação por alumínio, em %;

Al = teores de Al trocável, em cmol_c dm⁻³;

Ca = teores de Ca trocável, em cmol_c dm⁻³;

Mg = teores de Mg trocável, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

K = teores de K trocável, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

H+Al = teores de H+Al, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para cada local e camada, foi realizada a análise descritiva dos dados. A normalidade foi analisada pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância. Para avaliar a diferença entre os locais para cada variável, adotou-se como critério o intervalo de confiança calculado a 95% para comparar os valores obtidos para cada variável dentro de cada uso do solo, utilizando a distribuição *t* de Student. Na ausência de sobreposição entre os limites superiores e inferiores, considerou-se que as médias populacionais de cada área diferem entre si com 95% de confiança. Para a construção do IQS, há três passos a serem seguidos: I: escolher os indicadores apropriados para compor um conjunto mínimo de dados; II: transformação dos indicadores em escores padronizados, que variam de 0 a 1; III: transformação dos escores no IQS.

4.5.1 Conjunto mínimo de dados

Para a seleção do conjunto mínimo de dados foi realizada a análise matemática, utilizando de técnicas de estatística multivariada. Esta decisão de quais variáveis incluir em um IQS pode ser simplificada por métodos estatísticos (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002), sendo que a utilização de um número excessivo de indicadores pode levar a uma multicolinearidade indesejada nos índices, com a utilização de variáveis com alto grau de correlação (MUKHERJEE; LAL, 2014).

Este foi o critério mais adequado a este trabalho em função do grande número de indicadores medidos e a dificuldade em selecionar estes em função de opinião de especialistas, visto que diferentes opiniões podem dificultar a escolha.

Para a seleção das variáveis e composição do conjunto mínimo de dados (CMD) foi utilizada a técnica de análise fatorial. Esta análise foi utilizada por outros autores para compor o conjunto mínimo de dados visando avaliar a qualidade do solo (RAIESI, 2017). Andrews, Karlen e Mitchell (2002) apresentam que um pequeno número de indicadores de

qualidade do solo cuidadosamente escolhidos podem fornecer adequadamente as informações necessárias para a seleção das melhores práticas de manejo.

Os dados foram inicialmente avaliados, e para atender as pressuposições da análise estatística, foi testada a normalidade dos dados e aplicada uma transformação aquelas que não atendiam ao pressuposto. Após todos os dados apresentarem a distribuição normal, os dados foram normalizados a média zero (0) e variância um (1). Esta padronização é necessária para a análise fatorial, pois as variáveis apresentam unidades diferentes, e com a transformação se evita a dominância de algumas variáveis devido a magnitude de diferentes unidades (VALLE; CARRASCO, 2018; ZUBER *et al.*, 2017).

Para a seleção do CMD, inicialmente foi realizada a correlação entre as variáveis, utilizando da correlação de Pearson, e a partir da análise fatorial foram verificados os autovalores e autovetores. Os autovalores e autovetores foram extraídos da matriz de correlação. Cada autovalor representa um fator. Seguindo o critério de Kaiser (1960), os fatores selecionados são os que apresentam autovalores ≥ 1 . Portanto, apenas os fatores com autovalores ≥ 1 são selecionados e examinados.

A partir da seleção dos fatores, seus autovetores foram avaliados para a seleção das variáveis, sendo selecionadas somente os autovetores com cargas fatoriais altamente ponderadas, ou seja, as que se encontraram dentro de 10% da maior carga fatorial (ANDREWS *et al.*, 2002; RAIESI, 2017). Quando mais de uma variável foi retida em um único fator, a correlação de Pearson foi utilizada. Variáveis bem correlacionadas foram consideradas redundantes e apenas uma foi considerada para a CMD, sendo a variável de maior carga fatorial escolhida para o CMD. Foram consideradas correlações com significância de 1%. Se as variáveis altamente ponderadas não estivessem correlacionadas ambas eram consideradas importantes e retidas no CMD (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002; RAIESI, 2017; VALLE; CARRASCO, 2018; ZUBER *et al.*, 2017).

Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante o uso do programa SAS versão 9.2 (SAS INSTITUTE, 1991).

4.5.2 Padronização em escores

Esta etapa consiste em normalizar os valores em uma escala única, que varia entre 0 e 1. Pode ser linear, onde a observação é dividida pelo maior ou menor valor observado, conforme se a variável possui classificação de mais é melhor ou menos é melhor. Pode ser

não linear, utilizando de curvas para a padronização, sendo esta melhor do que a padronização linear, segundo Andrews, Karlen e Mitchell (2002). Yu *et al.* (2018) citam que o uso de funções não lineares é eficiente para uma melhor avaliação da qualidade do solo.

Portanto foi utilizada para a padronização das variáveis em escores funções não lineares. Para isto, se utiliza da equação de Wymore (1993) para a padronização de escores:

$$v = \frac{1}{1 + ((B-L)/(x-L))^{2S(B+x-2L)}}$$

onde v é a pontuação padronizada; B é o valor crítico ou limite-base do indicador, cujo escore padronizado é 0,5, e que estabelece o limite entre a ruim e a boa qualidade do solo; L é o valor inicial ou mais baixo que uma propriedade do solo possa expressar; S , a inclinação da tangente à curva no ponto correspondente ao valor crítico do indicador; e x , o valor da propriedade ou indicador medido no campo.

É preciso calcular o valor S , sendo a inclinação da tangente à curva no ponto correspondente ao valor crítico do indicador, através da equação:

$$S = \frac{\log(1/v) - 1}{\log(B-L / x-L) \cdot 2(B+x-2 \cdot L)}$$

Há três funções típicas de padronização de escores: mais é melhor, menos é melhor e valor máximo. A curva de padronização do tipo mais é melhor é utilizada para padronização de indicadores em que os maiores valores melhoram a qualidade do solo, a exemplo da CTC e V%, e possui declividade (S) positiva. A curva de padronização do tipo menos é melhor padronizam indicadores em que a qualidade está associada a menores valores destes, como exemplo o Al, e possuem declividade negativa. A curva de valor máximo possui inclinação positiva até o valor máximo e é usada para indicadores que apresentam efeito positivo na qualidade do solo até determinado valor, a partir do qual sua influência começa a se tornar negativa. Como exemplo pode-se citar o pH do solo.

Para a padronização dos indicadores nas funções mais melhor, são utilizados dois valores limites, superior e inferior, e um valor crítico. Os valores limites superiores (U) são valores dos indicadores de qualidade onde a função de pontuação equivale a 1 (um),

quando a propriedade do solo medida está em nível ótimo. Os valores limites inferiores são valores dos indicadores de qualidade onde a função de pontuação equivale a 0 (zero), quando a propriedade do solo está em nível inaceitável (L). Os valores críticos são aqueles nos quais a função de pontuação é igual a 0,5 (B) e equivale aos pontos médios entre os valores limites do indicador de qualidade avaliado (Tabela 12).

Para a padronização dos indicadores nas funções menos melhor, os valores limites superiores (U) são valores dos indicadores de qualidade onde a função de pontuação equivale a 0 (zero), quando a propriedade do solo medida está em nível inaceitável e os valores limites inferiores são valores dos indicadores de qualidade onde a função de pontuação equivale a 1 (um), quando a propriedade do solo está em nível ótimo (L). Os valores críticos são aqueles nos quais a função de pontuação é igual a 0,5 (B) e equivale aos pontos médios entre os valores limites do indicador de qualidade avaliado.

Para a padronização dos indicadores nas funções valor ótimo, que classificam os atributos que têm uma influência cada vez mais positiva na qualidade do solo até um nível ótimo além do qual sua influência é prejudicial, é preciso utilizar dois valores críticos, nos quais a função de pontuação é igual a 0,5, um onde a linha de base inferior tem a pontuação é de 0,5 com relação em forma de sino (B1) e outro onde a linha de base superior tenha a pontuação é de 0,5 com relação em forma de sino (B2). Há o nível ótimo (O) em que pontuação é 1,0 com relação em forma de sino; e o limite inferior e superior, no qual ou abaixo da pontuação é 0 (L ou U). O valor S representa a inclinação da tangente à curva no ponto correspondente ao valor crítico do indicador.

Os limites críticos da avaliação da qualidade do solo referem-se ao valor específico ou intervalo de uma propriedade ou indicador do solo que é necessário para assegurar que um processo ou função do solo não é restrito. Os limites críticos denotam os valores limites ou margens de tolerância exigidos para os indicadores de solo associados ao ótimo funcionamento do solo e indicam se um solo está 'apto' para um uso específico (CARTER, 2006). Para a definição dos valores limites inferior e superior e do valor crítico, primeiramente foi realizada uma revisão prévia sobre a função de cada variável, e se estabeleceu os valores limites utilizando informações de pesquisadores, a partir de bancos de dados divulgados na comunidade científica. As referências utilizadas em cada indicador são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Funções de pontuação padronizada e valores limites para os indicadores de qualidade dos solo.

Indicador	Função	L	B	U	B1	O	B2	S	Referência
Map (%)	Valor ótimo	2	-	40	10	20	30	0,166	Carter (2006), Melo Filho (2007), Reichert (2007)
RP (Mpa)	Menos melhor	0,5	2	4	-	-	-	0,500	Carter (2006), Reichert (2007)
pH (CaCl₂)	Valor ótimo	2,5	-	7,0	4,0	5,5	6,0	1,250	Manual... (2017)
Al (cmolc dm⁻³)	Menos melhor	0	1,5	2,5	-	-	-	1,001	Manual... (2017)
Mg (cmolc dm⁻³)	Mais melhor	0,2	1,0	2,0	-	-	-	1,001	Manual... (2017)
Ca/Mg	Valor ótimo	0	-	8	1	2-3	4	0,715	Manual... (2017), Van Raij (2011)
P (mg dm⁻³)	Mais melhor	3	9	12	-	-	-	0,166	Manual... (2017)
CTC (cmolc dm⁻³)	Mais melhor	5	14	24	-	-	-	0,100	Manual... (2017)

Map: Macroporosidade. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). CTC: Capacidade de troca de cátions. L: limite inferior no qual ou abaixo da pontuação é 0 ou 1 dependendo da função; B: linha de base em que a pontuação é de 0,5; U: limite superior no qual ou acima da pontuação é 1,0 ou 0 dependendo da função; B1: linha de base inferior, em que a pontuação é de 0,5 com relação em forma de sino; O: nível ótimo, em que pontuação é 1,0 com relação em forma de sino; B2: linha de base superior em que a pontuação é de 0,5 com relação em forma de sino.

4.5.3 Índice de qualidade do solo (IQS)

A formação do IQS pode ser de três formas: IQS aditivo, IQS aditivo ponderado e IQS com sistema de apoio a decisão. No IQS aditivo se processa apenas uma soma das pontuações, já no IQS aditivo ponderado, há uma ponderação dentro do índice para o cálculo da qualidade do solo. Yu *et al.* (2018) mostraram que a abordagem aditiva ponderada foi superior à abordagem aditiva por mostrar diferenças entre os quatro tratamentos de uso da terra.

O IQS aditivo ponderado pode ser utilizado a partir de funções do solo, conforme o realizado no trabalho de Melo Filho, Souza e Silva Souza (2007) e Barbosa *et al.*, (2018), que utilizaram o modelo de avaliação do IQS proposto por Karlen & Stott, ou a partir da ponderação obtida através da análise estatística. Para o cálculo do IQS neste trabalho, foram utilizadas as ponderações obtidas por meio da análise fatorial. O IQS foi calculado a partir da seguinte fórmula:

$$IQS: \sum qWi(wt)$$

em que IQS é o índice de qualidade do solo; qW_i , o valor calculado para as funções principais que compõem o índice; e w_t , um peso numérico atribuído a cada função na composição do índice geral de qualidade.

O peso numérico foi obtido para cada fator, usando os resultados da análise fatorial, sendo calculado a partir da relação entre a porcentagem da variância explicada pelo fator e a variância cumulativa. Cada fator explicou uma porcentagem da variância. Esta porcentagem, dividida pela porcentagem de todos os autovalores >1 resulta na ponderação para cada fator, sendo a soma total dos fatores igual a 1.

O valor calculado para cada score foi obtido a partir da ponderação de determinado atributo do solo dentro do fator, ou seja, a proporção do número do autovetor em relação a soma de todos os autovetores incluídos no conjunto mínimo de dados.

Os valores mais altos do IQS significam melhor função do solo e refletem os efeitos positivos das mudanças do preparo e uso do solo (RAIESI, 2017), refletindo a melhor qualidade do solo. Os cálculos foram realizados com planilhas eletrônicas do Excel®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INDICADORES FÍSICOS E QUÍMICOS

Os indicadores físicos e químicos das camadas de 0-10 cm e 10-20 cm para os locais analisados são comparados por intervalo de confiança (95%). Demais parâmetros da estatística descritiva estão no anexo.

5.1.1 Indicadores físicos da camada de 0-10 cm

A Figura 08 mostra os intervalos de confiança dos indicadores físicos da camada 0-10 cm. Verifica-se que o preparo do solo afetou os indicadores físicos de Map, Mip, Kfs e RP. O PC e o PM apresentaram maior Map e Kfs e menor RP. Já o PD apresentou maior Mip, RP e menor Kfs. O PM apresentou maior Mip quando comparado ao PC.

Observa-se que o solo na vegetação secundária (VS) apresentou maior PT e menor Ds na camada de 0-10 cm quando comparada a todos os preparos, sendo a Map similar entre a VS e o PC. Esses menores valores de Ds são comuns em solo sob vegetação natural, e está relacionada a PT, pois quanto maior a porosidade do solo, menor a Ds. Tavares Filho, Barbosa e Ribon (2010) também encontraram menores valores de Ds na vegetação nativa comparando com diferentes usos agrícolas. A ausência de tráfego de máquinas, com maior atividade biológica e maiores teores de carbono favorecem estes resultados em vegetação natural.

A PT e a Ds foram similares entre os preparos, porém diferentes da VS. No PD, a alteração da porosidade do solo é um efeito do tráfego de máquinas para a realização dos tratos culturais atrelado ao não revolvimento do solo, o que leva a redução na Map com maiores valores de Mip. Já no PM e PC, a alteração na porosidade do solo ocorre com a redução dos microporos e aumento dos macroporos, o que pode ser reflexo de uma menor agregação neste solo. Silva *et al.* (2016) estudando um Latossolo Bruno alumínico típico, após três décadas sob diferentes sistemas de manejo do solo, verificaram resultados semelhantes, com maior Mip no PD, e menor Ds e maior porosidade total na VS.

Em reflexo a isto, a RP foi menor no PC e no PM em relação ao PD e também na VS. Tormena *et al.* (2002), avaliaram alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico, dentre eles a RP e verificaram que os sistemas de PM e PC do solo proporcionam

condições físicas menos restritivas ao crescimento das plantas, quando comparado com o PD.

Na VS, a maior RP pode estar relacionada a uma resistência dos agregados, pois apesar da menor Ds encontrada, os valores de RP foram superiores ao PC e ao PM.

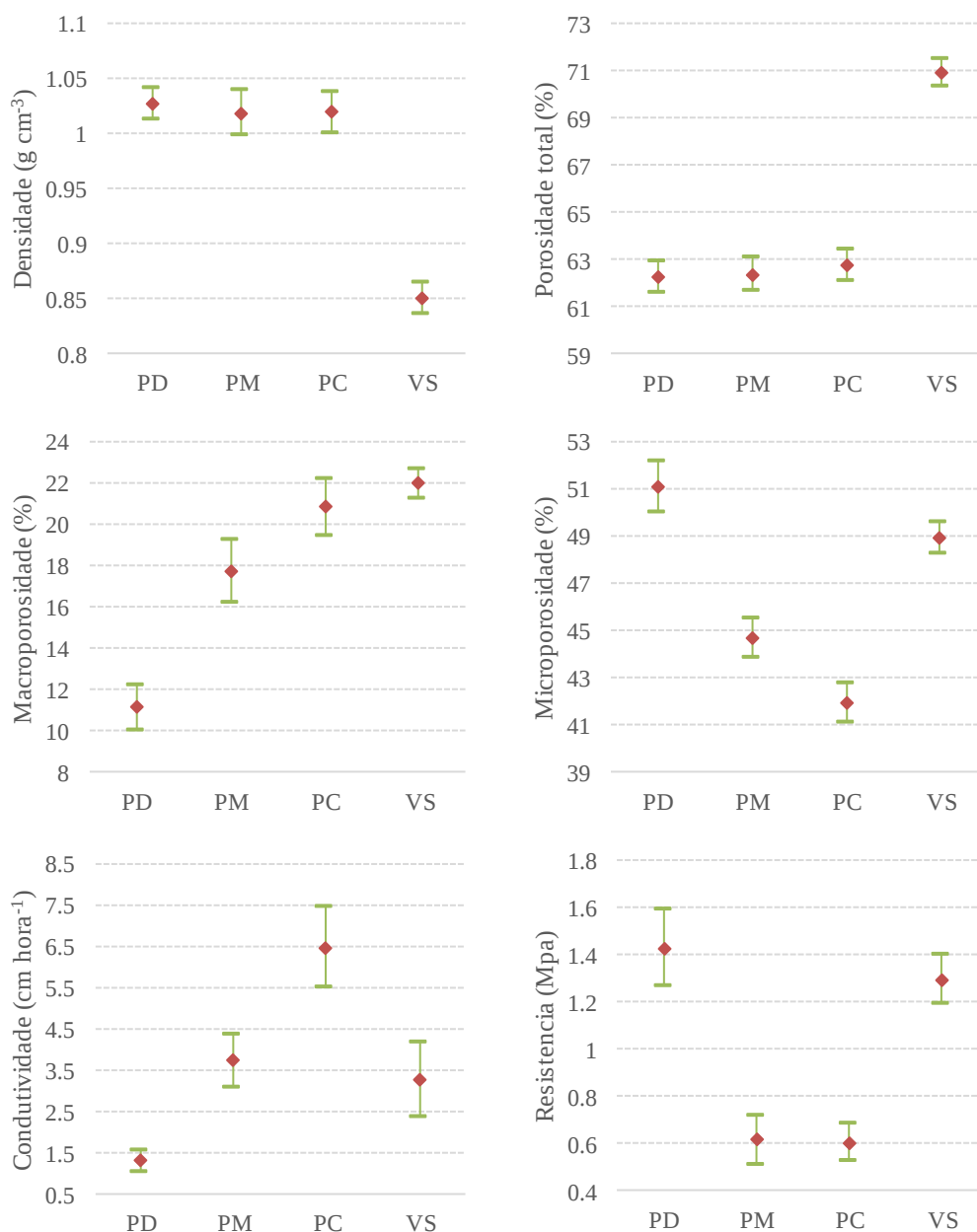


Figura 8: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores físicos em todos os locais, na camada de 0-10 cm. Fonte: A autora (2018).

Para a Kfs, o PC apresentou a maior Kfs, a qual foi similar entre o PM e VS, e menor no PD, demonstrando que o PD, que apresenta menor Map, também apresentou a menor Kfs na camada de 0-10 cm (Figura 08). A menor quantidade de macroporos no PD favoreceu a menor Kfs. Silva *et al.*, (2005) encontraram valores superiores de Kfs na camada superficial

no PC em relação aos demais sistemas de preparo de solo empregados. Isso possivelmente pode ser explicado pelo efeito da mobilização do solo, com tendência ao aumento dos macroporos. Houve grande variação dos dados nesta medida, com coeficiente de variação alto (anexo 01) o que é comum de se observar em dados de Kfs.

5.1.2 Indicadores químicos da camada de 0-10 cm

Com relação aos indicadores químicos, verifica-se que o solo se encontra com acidez elevada e pobreza de alguns nutrientes (Figura 09). Possui CTC alta para todos os preparos e na vegetação secundária (MANUAL..., 2017), sendo maior no PD e no PM e menor no PC e VS, porém seus valores de V% estão entre valores baixos para o PD e PC, valor médio para o PM e valor alto na VS (MANUAL..., 2017). Portanto, apesar de ser um solo com alta capacidade de retenção de cátions, a soma das bases indica que a oferta de nutrientes para as plantas é limitada, assim como a proporção entre eles está desbalanceada.

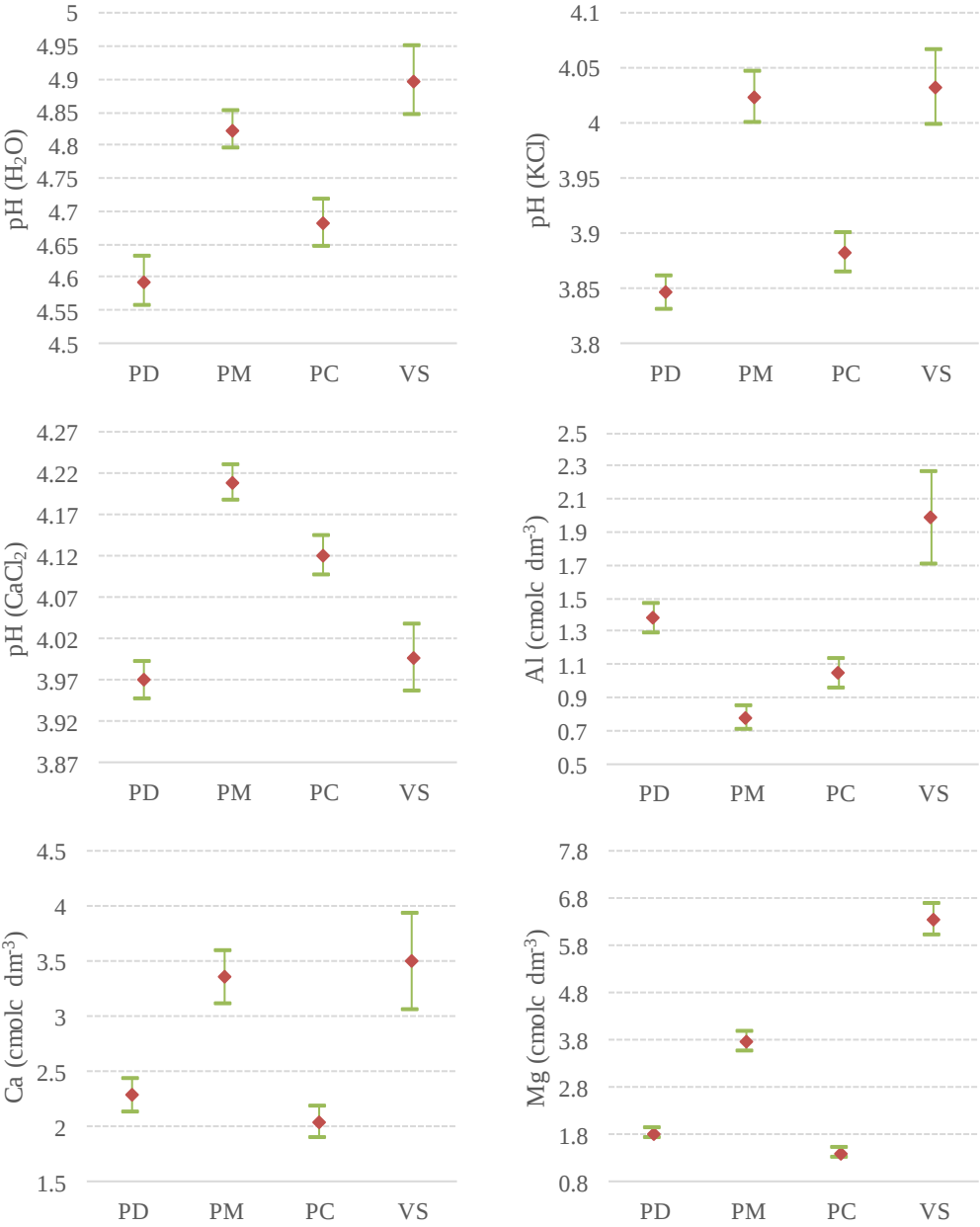
Os valores de pH variam entre baixo e muito baixo entre todos os locais. O intervalo de confiança é apresentado na Figura 09. Verifica-se que o pH em H₂O na VS foi superior em relação ao PC, porém o pH em CaCl₂ foi menor na VS em relação ao PC e PM. Isto ocorre devido ao Ca²⁺ da solução (pH em CaCl₂) liberar o H⁺ retido no solo, reduzindo o pH da solução. O Al apresentou valores médios para PD e PC, valor baixo de Al para PM e alto para a VS. Os solos de regiões de clima tropical e subtropical, em sua maioria, são naturalmente ácidos, por apresentam em sua composição, argilas cauliníticas e óxidos de ferro e alumínio na sua fração argila (BRIEDIS *et al.*, 2012). Ainda, o processo de decomposição dos resíduos vegetais presentes na superfície do solo resulta na liberação de prótons H⁺, diminuindo ainda mais os valores de pH na camada superficial do solo (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002).

Estes solos necessitam de correção com neutralizadores como o calcário, para a correção da acidez, da toxidez por Al, sendo que como efeito indireto há fornecimento de Ca e Mg devido à presença destes elementos nestes materiais, o que melhora as condições para o crescimento radicular das plantas (VAN RAIJ, 2011). As condições químicas encontradas são consequência de um longo período sem a correção do solo na área de estudo.

Os teores de Ca encontram-se em valores altos para o PD, PM e VS e valores médios para o PC (MANUAL..., 2017), sendo superior na VS e no PM. Os teores de Mg estão altos para o PD e PC e muito alto para o PM e VS (MANUAL..., 2017), sendo superior na VS, e a

relação entre estes dois elementos está baixa, variando entre 0,6 e 1,5, sendo menor na VS em relação aos demais.

(continua)



(conclusão)

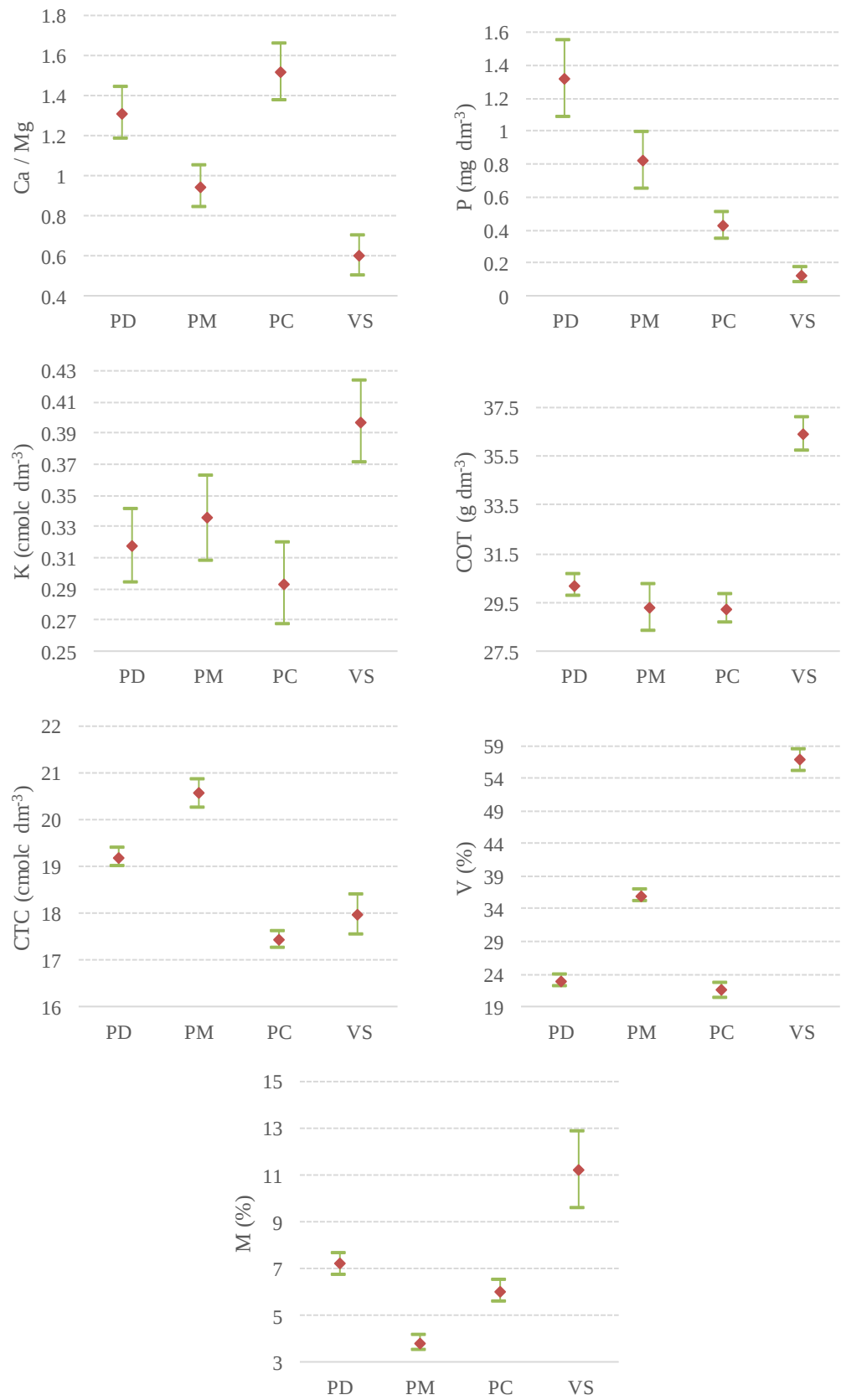


Figura 9: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores químicos em todos os locais, na camada de 0-10 cm. Fonte: A autora (2018).

Os valores médios de P disponível estão muito baixos (MANUAL..., 2017), considerando solos com teores de argila $>400 \text{ g kg}^{-1}$, superior no PD, seguido do PM, PC e VS. A constituição argilo-mineral de solos tropicais e subtropicais leva à predominância de cargas positivas nos coloides do solo, resultando em alta capacidade de adsorção aniônica, especialmente fosfato (FONTES, CAMARGO e SPOSITO, 2001), diminuindo a disponibilidade deste nutriente às plantas. Já os teores médios de K encontram-se em valores altos (MANUAL..., 2017), sendo os teores de K na VS superior aos demais.

Com relação ao COT, na média, os valores estão como muito altos para os três preparos do solo e na VS (MANUAL..., 2017). Na VS, observa-se o maior valor de COT, e similaridade entre o PD, PC e PM. Estes resultados demonstram que como a entrada de resíduos foi igual em todos os preparos, o COT foi pouco afetado.

5.1.3 Indicadores físicos da camada de 10-20 cm

Como já observado na camada de 0-10 cm, o solo da VS apresentou maior PT e menor Ds na camada de 10-20 cm do solo, porém apresentou a maior Mip, o que havia sido constatado para o PD na camada de 0-10 cm (Figura 10). Verifica-se como o PD vem sendo afetado pelo tráfego de máquinas nas camadas superficiais em relação a porosidade do solo, que ao longo de 36 anos o revolvimento do solo é realizado apenas no sulco de plantio. Nas camadas mais profundas, esta influência parece ser menor. Na camada de 10-20, a Mip foi similar entre o PD, PM e PC, e a Map foi similar na VS e PC, superior ao PD e PM.

A RP foi menor no PC, o qual diferiu dos demais, e maior no PD e VS, sendo estes similares. O PM também diferiu dos demais, com menores valores que o PD e a VS. Verifica como o preparo do solo influenciou a camada de 10-20 cm em relação a RP.

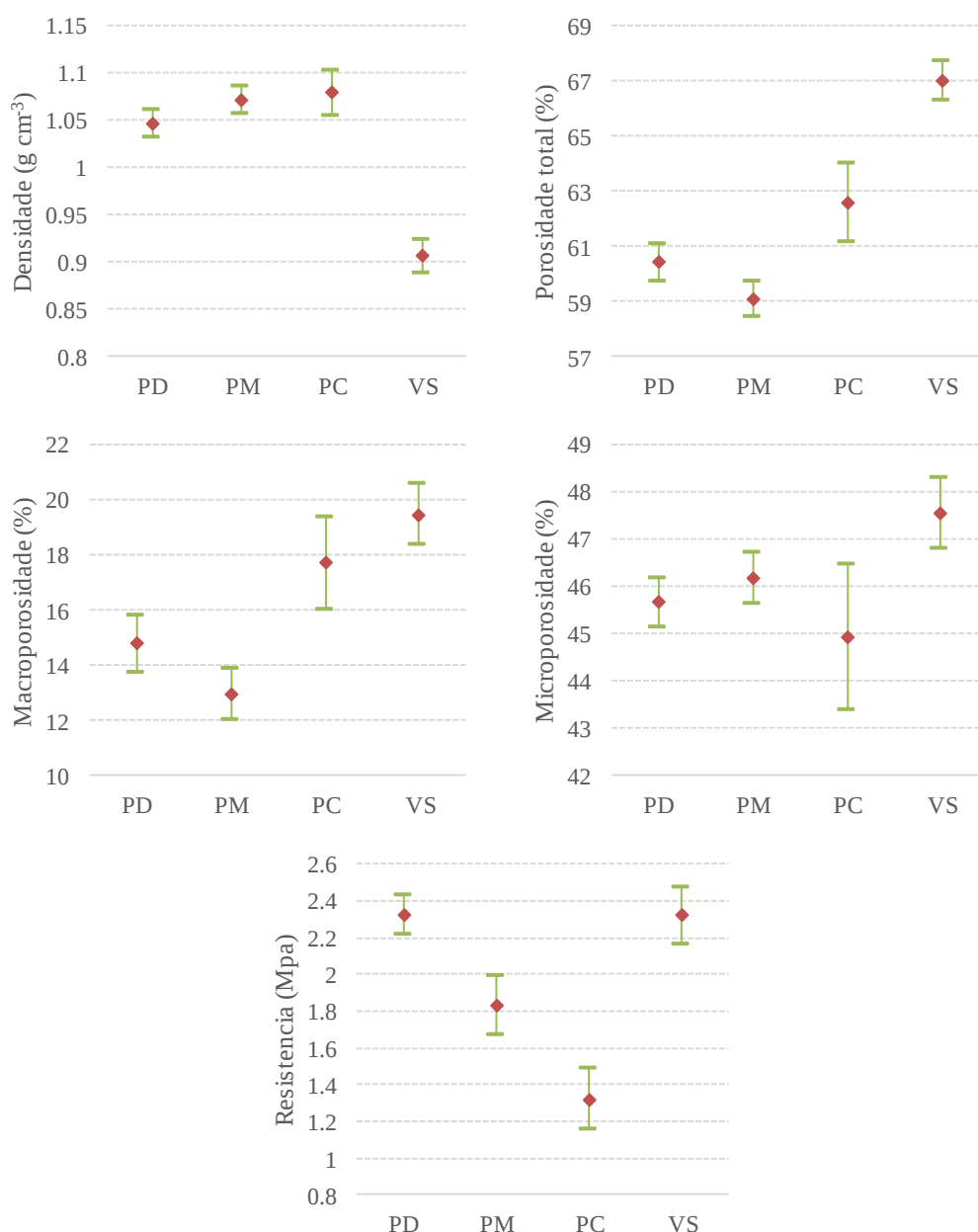


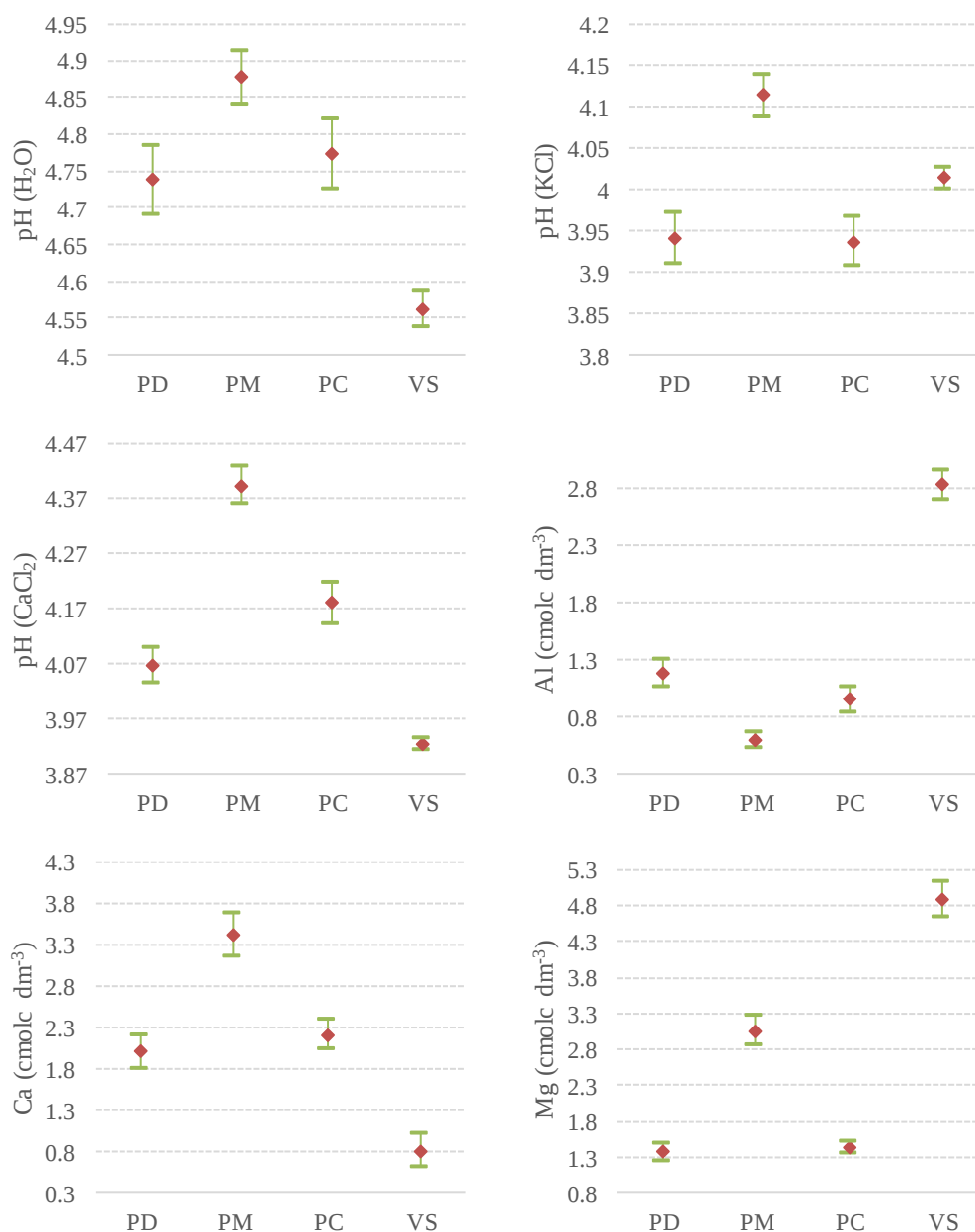
Figura 10: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores físicos em todos os locais, na camada de 10-20 cm. Fonte: A autora (2018).

5.1.4 Indicadores químicos da camada de 10-20 cm

Para os indicadores químicos, verificam-se algumas diferenças com a camada de 0-10, apesar da condição de fertilidade baixa ser semelhante. De forma geral, a VS diferiu dos demais com maior quantidade de Al, maior M%, maior disponibilidade de Mg e menor de Ca, com maior V% e menor relação Ca/Mg. O COT foi maior no PD, com maior quantidade de P no PM, e os teores de K foram similares em todos os locais (Figura 11).

Os valores de pH foram classificados como baixo em todos os preparos e muito baixos na VS, a qual apresentou teores médios de Al muito altos, bem como saturação por Al alta, sendo que nos preparos foram encontrados teores médios de Al para PD e PC e baixos em PM. A saturação por bases foi media na VS e baixa nos preparos (MANUAL..., 2017). O teor médio de Mg foi muito alto na VS e no PM, e alto no PD e PC. Foram ainda verificados teores baixos de Ca na VS, médio no PD e alto no PM e PC (MANUAL..., 2017). Estes resultados contribuíram para uma baixa relação Ca e Mg. O P disponível permaneceu em teores muito baixos, o K passou para médio, e o COT permaneceu em nível muito alto em ambos os locais (MANUAL..., 2017).

(continua)



(conclusão)

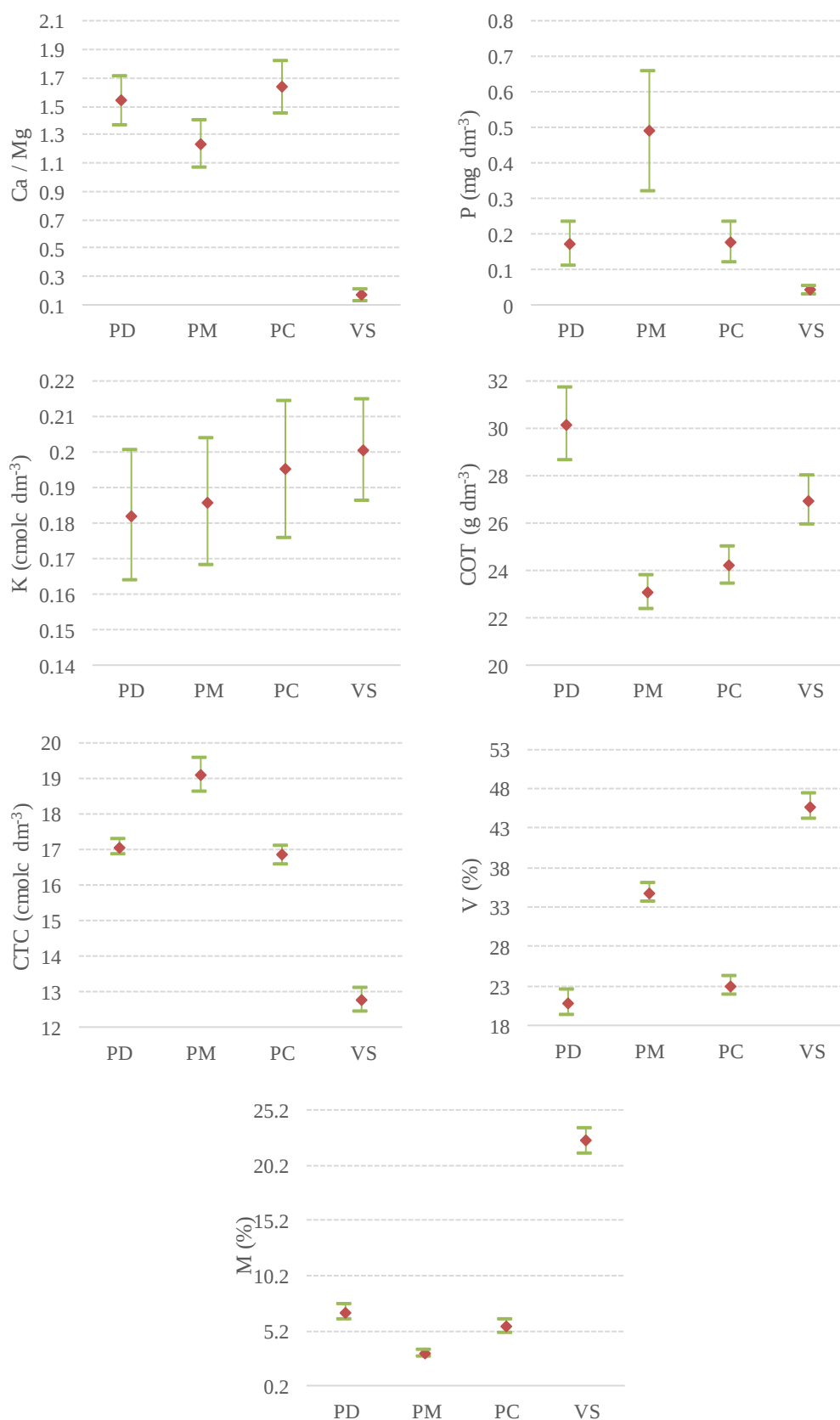


Figura 11: Intervalo de confiança (95%) para os indicadores químicos em todos os locais, na camada de 10-20 cm. Fonte: A autora (2018).

5.2 SELEÇÃO DE INDICADORES DA CAMADA DE 0-10 CM

Para a análise estatística multivariada na camada de 0-10 cm, utilizando a técnica de análise fatorial, foram utilizados os seguintes indicadores do solo: i) Físicos: Ds, PT, Map, Mip, K_{fs} , RP; e ii) Químicos: pH (H_2O), pH (KCl), pH ($CaCl_2$), Al, Ca, Mg, Ca/Mg, P, K, COT, CTC, V% e M%.

Na aplicação da técnica de análise fatorial utilizada neste trabalho, é necessário que o pressuposto de que os dados provêm de uma distribuição normal seja atendido. Foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados. Após verificar que alguns indicadores não apresentavam distribuição normal, foi necessário realizar algumas transformações nos valores de alguns indicadores químicos e físicos em estudo, conforme visto na Tabela 04. Foram utilizadas as transformações que melhor se ajustaram aos dados.

Após as devidas transformações realizadas, foi aplicado novamente o teste de Shapiro-Wilk a 5%, apresentando o resultado na Tabela 04. Após verificar que todos os indicadores apresentaram normalidade nos seus dados, os dados foram padronizados a média zero (0) e desvio padrão um (1), visando padronizar as unidades das variáveis. Com os dados padronizados, procedeu-se a análise fatorial.

Inicialmente foi realizada a correlação de Pearson (Tabela 05), verificando a correlação entre as variáveis, e posteriormente procedeu-se a análise fatorial, calculando os autovalores e autovetores.

Tabela 3: Transformações utilizadas na normalização dos dados e resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk após a normalização dos dados, nos indicadores físicos e químicos, na camada de 0-10 cm em todos os preparos do solo.

			Plantio direto			Preparo mínimo			Preparo convencional			Vegetação Secundária		
Tipo de indicador	Indicador	Unidade	Transf.	Estatística (w)	Valor p	Transf.	Estatística (w)	Valor p	Transf.	Estatística (w)	Valor p	Transf.	Estatística (w)	Valor p
Físico	Ds	(g cm ⁻³)	-	0,9758	0,3937	-	0,9653	0,1486	-	0,9846	0,7564	-	0,9862	0,8246
	PT	(%)	-	0,9736	0,3234	-	0,9772	0,4415	-	0,9825	0,6614	-	0,9759	0,3969
	Map	(%)	log10	0,9824	0,6601	-	0,9605	0,0939	-	0,9699	0,2298	-	0,9866	0,8382
	Mip	(%)	Box Cox	0,9729	0,3042	-	0,9593	0,0832	-	0,9693	0,2169	-	0,9736	0,3247
	K _{fs}	cm/seg	log10	0,9919	0,9814	Box Cox	0,9585	0,0776	Box Cox	0,9812	0,6056	Log10	0,9811	0,6016
	RP	Mpa	-	0,9663	0,1636	Log10	0,9738	0,33	Log10	0,9842	0,7378	-	0,9713	0,2627
Químico	pH	H ₂ O	-	0,9631	0,12	-	0,9792	0,52	-	0,9578	0,0725	-	0,9792	0,52
	pH	KCl	-	0,9653	0,1495	-	0,977	0,4371	-	0,9678	0,1896	-	0,9898	0,9417
	pH	CaCl ₂	-	0,9661	0,1605	-	0,9727	0,2994	-	0,9559	0,0601	-	0,9901	0,9503
	Al	cmolc dm ⁻³	-	0,9821	0,6434	Log10	0,9787	0,5024	Log10	0,9759	0,3979	Log10	0,9755	0,3838
	Ca	cmolc dm ⁻³	-	0,9635	0,1252	-	0,9553	0,056	-	0,9572	0,0684	Log10	0,9755	0,3837
	Mg	cmolc dm ⁻³	-	0,9703	0,2382	-	0,9659	0,158	-	0,9849	0,7683	-	0,987	0,8566
	Ca/Mg		log10	0,9846	0,7553	Log10	0,9877	0,8794	Log10	0,9886	0,9104	Log10	0,9762	0,4078
	P	mg dm ⁻³	Box Cox	0,9678	0,1893	Box Cox	0,9565	0,0638	Box Cox	0,9757	0,391	Log10	0,9595	0,0854
	K	cmolc dm ⁻³	Box Cox	0,9667	0,1704	Log10	0,986	0,8167	Log10	0,9834	0,7043	-	0,9806	0,5778
	COT	g dm ⁻³	-	0,9711	0,258	-	0,9606	0,095	-	0,9632	0,1216	-	0,9565	0,0639
	CTC	cmolc dm ⁻³	-	0,9547	0,0535	-	0,9838	0,7207	-	0,9859	0,8129	-	0,9606	0,0945
	V%	%	-	0,9594	0,0846	-	0,9859	0,8118	(V%) ²	0,9765	0,4172	-	0,9811	0,6006
	M%	%	-	0,9771	0,4379	Log10	0,9805	0,5765	Log10	0,9674	0,1813	Log10	0,9712	0,2603

Ds: Densidade do solo. PT: Porosidade total. Map: Macroporosidade. Mip: Microporosidade. K_{fs}: Condutividade hidráulica saturada. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Ca: Teor de cálcio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). K: Teor de potássio trocável. COT: Carbono orgânico total. CTC: Capacidade de troca de cátions. V%: Saturação por bases. M%: Saturação por alumínio.

Tabela 4: Matriz de correlações de Pearson para os dados de indicadores físicos e químicos, na camada de 0-10 cm em todos os preparos do solo.

	Ds	PT	Map	Mip	Kfs	RP	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	Al	Ca	Mg	Ca/Mg	P	K	COT	CTC	V%	M%
Ds	1	-0,71**	-0,73**	0,49**	-0,04	0,09	0,29**	0,31**	0,31**	-0,33**	0,30**	-0,11	0,27*	0,18	0,01	0,06	-0,02	0,22*	-0,33**
PT		1	0,69**	-0,24*	-0,09	-0,05	-0,23*	-0,32**	-0,32**	0,35**	-0,32**	0,17	-0,31**	-0,16	-0,07	-0,12	0,07	-0,22*	0,34**
Map			1	-0,83**	0,01	-0,10	-0,14	-0,15	-0,14	0,19	-0,16	0,03	-0,12	-0,08	-0,04	-0,14	-0,01	-0,11	0,19
Mip				1	-0,02	0,10	0,01	-0,05	-0,06	0,02	-0,03	0,09	-0,09	0,04	-0,002	0,10	0,06	-0,02	0,02
Kfs					1	-0,09	0,03	0,06	0,09	-0,09	0,23*	-0,01	0,18	0,13	0,10	0,16	0,14	0,12	-0,11
RP						1	-0,005	0,02	0,01	0,04	-0,02	0,04	-0,06	0,01	-0,01	0,07	0,01	0,01	0,04
pH (H ₂ O)							1	0,75**	0,77**	-0,71**	0,57**	-0,08	0,47**	0,08	0,06	0,06	-0,12	0,55**	-0,69**
pH (KCl)								1	0,97**	-0,92**	0,80**	-0,07	0,64**	0,10	0,08	0,11	-0,11	0,75**	-0,90**
pH (CaCl ₂)									1	-0,92**	0,85**	-0,08	0,69**	0,19*	0,12	0,15	-0,09	0,78**	-0,90**
Al										1	-0,82**	0,09	-0,67**	-0,20*	-0,07	-0,20*	0,04	-0,74**	0,99**
Ca											1	-0,09	0,78**	0,31**	0,17	0,25*	0,16	0,79**	-0,85**
Mg												1	-0,64**	-0,11	-0,05	-0,001	0,49**	0,42**	0,01
Ca/Mg													1	0,28**	0,14	0,16	-0,17*	0,36**	-0,64**
P														1	0,31**	0,21*	0,20*	0,21*	-0,22*
K															1	0,22*	0,33**	0,19*	-0,12
COT																1	0,34**	0,15	-0,24*
CTC																	1	0,26*	-0,09
V%																		1	-0,77**
M%																			1

Ds: Densidade do solo. PT: Porosidade total. Map: Macroporosidade. Mip: Microporosidade. K_{fs}: Condutividade hidráulica saturada. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Ca: Teor de cálcio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). K: Teor de potássio trocável. COT: Carbono orgânico total. CTC: Capacidade de troca de cátions. V%: Saturação por bases. M%: Saturação por alumínio. * Significativo a 1%. ** Significativo a 0,01%.

A seleção de um conjunto mínimo de dados foi realizada a partir da análise fatorial e da correlação de Pearson. Os cinco (5) primeiros fatores apresentaram autovalores maiores que 1 e explicaram juntos 75% da variabilidade dos dados (Tabela 06). Portanto os 5 fatores foram examinados e utilizados para a seleção dos indicadores.

Tabela 5: Autovalores associados aos indicadores físicos e químicos da camada de 0-10 cm.

	Autovalor	Diferença	Proporção	Acumulado
1	6,86	4,21	0,36	0,36
2	2,64	0,52	0,13	0,50
3	2,12	0,47	0,11	0,61
4	1,65	0,60	0,08	0,69
5	1,04	0,12	0,05	0,75
6	0,91	0,12	0,04	0,80
7	0,79	0,09	0,04	0,84
8	0,70	0,03	0,03	0,88
9	0,66	0,16	0,03	0,91
10	0,50	0,11	0,02	0,94
11	0,39	0,15	0,02	0,96
12	0,23	0,01	0,01	0,97
13	0,21	0,12	0,01	0,98
14	0,09	0,04	0,004	0,99
15	0,04	0,01	0,002	0,99
16	0,03	0,005	0,001	0,99
17	0,02	0,004	0,001	0,99
18	0,02	0,02	0,001	0,999
19	0,001	0,0001	1	

Autovalor em negrito $\geq 1,00$ são selecionados pelo critério de Kaiser.

O primeiro fator explicou 36% da variância e teve carga alta positiva para pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂), Ca, Ca/Mg e V% e carga negativa alta para Al e M% (Tabela 07). Os indicadores selecionados no fator 01 que apresentaram fator de carga de 10% dentro da maior carga fatorial foram o pH (KCl), pH (CaCl₂), Al, Ca e M%. Devido a correlação entre estes, somente o pH (CaCl₂) foi mantido como indicador neste fator, devido a sua maior carga fatorial (0,948). Como as cargas fatoriais foram maiores para os indicadores químicos relacionados a acidez do solo, este fator foi denominado **acidez do solo**.

No fator 2, que explicou 13% da variância, os indicadores físicos Map e Mip foram os que apresentaram maior carga, sendo este fator denominado **espaço poroso do solo**. Como a Map apresentou maior carga fatorial (0,911), esta foi mantida neste fator.

Tabela 6: Autovetores associados aos autovalores dos indicadores físicos e químicos da camada de 0-10 cm.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
Ds	0,469	-0,732	-0,082	-0,057	-0,025
PT	-0,478	0,627	0,117	-0,079	0,092
Map	-0,317	<u>0,911</u>	-0,024	0,070	0,083
Mip	0,067	-0,806	0,140	-0,127	-0,065
Kfs	0,156	0,071	0,196	0,382	-0,525
RP	-0,0003	-0,180	0,067	-0,114	<u>0,806</u>
pH (H₂O)	0,747	0,113	-0,140	-0,217	0,034
pH (KCl)	0,923	0,170	-0,107	-0,197	0,044
pH (CaCl₂)	<u>0,948</u>	0,182	-0,074	-0,124	0,045
Al	-0,944	-0,134	0,051	0,105	0,009
Ca	0,908	0,144	0,105	0,105	-0,033
Mg	-0,116	0,056	0,746	<u>-0,600</u>	-0,102
Ca/Mg	0,746	0,101	-0,375	0,423	0,020
P	0,291	-0,078	0,246	<u>0,542</u>	0,145
K	0,176	0,014	0,395	0,500	0,174
COT	0,245	-0,092	0,414	0,392	0,163
CTC	0,018	0,001	<u>0,857</u>	0,128	-0,013
V%	0,785	0,189	0,403	-0,276	-0,032
M%	-0,943	-0,136	-0,069	0,094	0,017

Cargas fatoriais em negrito são consideradas altamente ponderadas. Valores sublinhados são referentes às variáveis selecionadas. Ds: Densidade do solo. PT: Porosidade total. Map: Macroporosidade. Mip: Microporosidade. K_{fs}: Condutividade hidráulica saturada. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Ca: Teor de cálcio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). K: Teor de potássio trocável. COT: Carbono orgânico total. CTC: Capacidade de troca de cátions. V%: Saturação por bases. M%: Saturação por alumínio.

O fator 3 explicou 11% da variância e apresentou carga alta para Mg, COT, CTC e V%, com carga positiva para todas as variáveis. Este fator foi denominado **fertilidade do solo**. Como o indicador CTC apresentou maior carga, somente este foi mantido neste fator.

O fator 4 explicou 8% da variância e apresentou carga positiva para Ca/Mg, P e K e carga negativa para Mg, demonstrando que quando se diminui Mg, aumenta a relação Ca/Mg. Pode ser denominado de **disponibilidade de nutrientes**. A maior carga foi para o Mg, selecionando este indicador no fator 4. Foi selecionado o P, por sua carga estar dentro de 10% da maior carga, e como não foi encontrada correlação entre o Mg e o P, os dois foram mantidos.

O fator 5 explicou 5% da variância e apresentou carga alta para a RP, com carga alta também para Kfs, porém não se enquadrando dentro de 10% da carga de RP. Desse modo apenas a RP foi mantida neste fator. Observa-se carga positiva para RP e negativa

para Kfs, podendo inferir que quando aumenta RP, diminui a Kfs. Esse fator pode ser denominado de **condições físicas do solo para o crescimento de raízes**.

Das 19 variáveis, a partir da técnica de seleção por análise fatorial, foram mantidas 5 variáveis, das quais 4 são físicas: Map e RP; e 4 variáveis químicas: pH (CaCl₂), CTC, Mg e P. Percebe-se que embora o preparo do solo possa ter afetado outros indicadores, como por exemplo a Ds, PT e a Mip, estas variáveis não seguem contribuindo para a construção do IQS devido à sua alta correlação com a Map. Dessa forma, verifica-se que a análise para composição do conjunto mínimo de dados foi eficiente em selecionar um menor número de variáveis, retirando variáveis que apresentam o mesmo nível de resposta, o que possibilitou utilizar os indicadores mais sensíveis.

Raiesi (2017), utilizando da análise fatorial, reduziram o conjunto de dados de 15 indicadores iniciais para 3, os quais foram utilizados para avaliar a qualidade de solo sob pastagens. A falta de contribuição de outros indicadores do solo para o IQS deve-se à existência de uma forte correlação entre os indicadores selecionados e as outras variáveis. Valle e Carrasco (2018), realizaram uma seleção de indicadores de qualidade do solo em solos vulcânicos Chilenos, utilizando a análise de componentes principais, reduziram um total de 27 indicadores para 9 indicadores. Yu *et al.* (2018) reduziram para 4 indicadores de 13 indicadores utilizados.

Na Figura 12 são apresentados os gráficos dos fatores, mostrando os pesos entre eles. Verifica-se que o fator 1 foi o fator que apresentou maior peso as variáveis químicas relacionadas a acidez do solo, com cargas negativas para Al e M%, o que demonstra que quando diminui Al e M%, aumenta o pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂), Ca, Ca/Mg e V%.

O fator 2 apresentou maior peso nas variáveis físicas. Verifica-se carga positiva para PT e Map e negativa para Ds e Mip, demonstrando que quando há aumento da Ds aumenta também a Mip, e reduz a Map e PT.

No fator 5, observa-se carga positiva para RP e negativa para Kfs, podendo inferir que quando aumenta RP, diminui a Kfs. Verifica-se a partir da Figura 12 que as variáveis COT, P e K apresentam correlação, pois em todos os fatores estas se encontram próximas. Esta correlação deve estar relacionada a ciclagem do K e P a partir da matéria orgânica do solo.

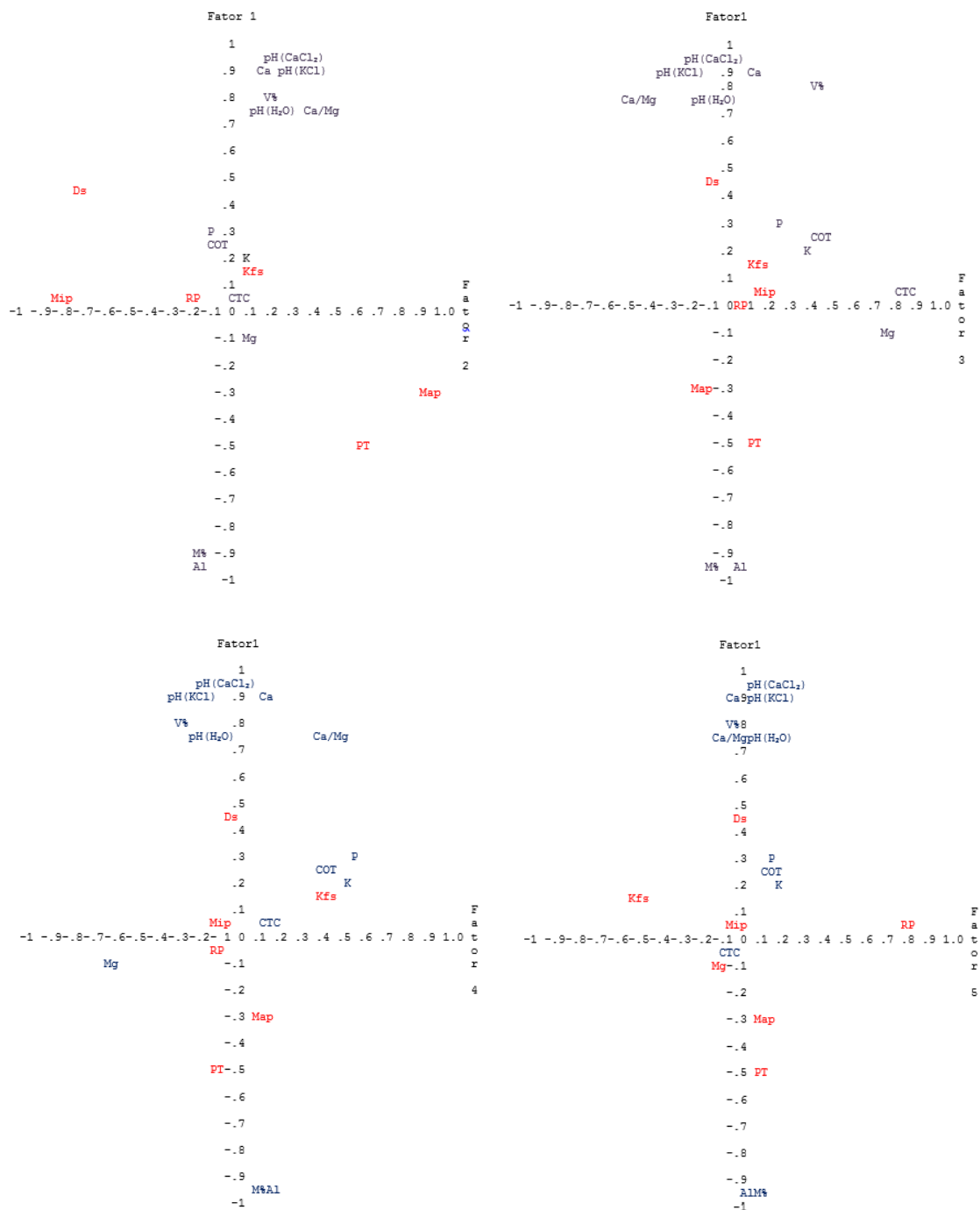


Figura 12: Gráficos com os fatores representando os maiores pesos das variáveis. Camada 0-10. Fonte: A autora (2018).

5.3 SELEÇÃO DE INDICADORES DA CAMADA DE 10-20 CM

Para a análise estatística multivariada na camada de 10-20 cm, utilizando a técnica de análise fatorial, foram utilizados os seguintes indicadores do solo: i) Físicos: Ds, PT,

Map, Mip, RP; e ii) Químicos: pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂), Al, Ca, Mg, Ca/Mg, P, K, COT, CTC, V% e M%.

Assim como na camada 0-10 cm, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e a transformação em alguns dados (Tabela 07). Após encontrar a normalidade para os dados, estes foram padronizados a média zero (0) e desvio padrão um (1), visando padronizar as unidades das variáveis. Com os dados padronizados, procedeu-se a análise fatorial.

Inicialmente foi realizada a correlação de Pearson (Tabela 08), verificando a correlação entre as variáveis, e posteriormente procedeu-se a análise fatorial. Correlações positivas foram verificadas entre a PT e Map, sendo negativas com a Ds e Mip. Ou seja, solos com maior densidade também tendem a aumentar a Mip, e quando se aumenta a Map e a PT, diminui a Ds.

Verifica-se correlações altas e positivas para o pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂) e V%, e negativas para Al e M%, como esperado e semelhante ao que ocorreu na camada de 0-10 cm. Portanto, quando se aumenta o pH, aumenta a saturação de bases e reduz os teores de Al e sua saturação.

Tabela 7: Transformações utilizadas na normalização dos dados e resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk após a normalização dos dados, nos indicadores físicos e químicos, na camada de 10-20 cm em todos os preparos do solo.

			Plantio direto			Preparo mínimo			Preparo convencional			Vegetação Secundária		
Tipo de indicador	Indicador	Unidade	Transf.	Estatística (w)	Valor p	Transf.	Estatística (w)	Valor p	Transf.	Estatística (w)	Valor p	Transf.	Estatística (w)	Valor p
Físico	Ds	(g cm ⁻³)	Box Cox	0,9882	0,8955	-	0,9697	0,2269	-	0,9705	0,2434	-	0,9545	0,0528
	PT	(%)	Log10	0,9551	0,0555	-	0,9925	0,9871	Box Cox	0,9568	0,0658	-	0,9661	0,1599
	Map	(%)	Log10	0,9776	0,4577	-	0,9708	0,2514	Box Cox	0,9551	0,0557	-	0,9711	0,2565
	Mip	(%)	-	0,9613	0,1013	Box Cox	0,9541	0,0506	Box Cox	0,976	0,3998	-	0,9779	0,4688
	RP	Mpa	Log10	0,981	0,5963	Log10	0,9656	0,1533	Log10	0,9717	0,2723	-	0,987	0,8533
Químico	pH	H ₂ O	-	0,984	0,7317	-	0,969	0,2121	-	0,9884	0,9047	-	0,9621	0,109
	pH	KCl	-	0,9629	0,1185	-	0,9624	0,1128	-	0,9787	0,504	-	0,9577	0,0719
	pH	CaCl ₂	-	0,9671	0,1775	-	0,9604	0,0925	-	0,9852	0,7843	-	0,9807	0,5829
	Al	cmol _c dm ⁻³	-	0,9768	0,4264	-	0,9783	0,4837	Log10	0,9786	0,498	-	0,9871	0,8583
	Ca	cmol _c dm ⁻³	Log10	0,9886	0,9086	-	0,9728	0,302	-	0,9703	0,2397	Box Cox	0,9562	0,0617
	Mg	cmol _c dm ⁻³	Log10	0,9807	0,5856	-	0,9761	0,4028	Box Cox	0,955	0,0552	Mg ²	0,9782	0,4795
	Ca/Mg		Log10	0,9852	0,7816	Log10	0,9817	0,6256	Log10	0,974	0,3358	Box Cox	0,9593	0,0834
	P	mg dm ⁻³	Log10	0,9543	0,0518	Box Cox	0,9856	0,8002	Log10	0,9788	0,5035	Box Cox	0,9558	0,0599
	K	cmol _c dm ⁻³	-	0,9574	0,0698	-	0,9788	0,5039	Log10	0,9666	0,1682	-	0,973	0,3068
	COT	g dm ⁻³	Box Cox	0,959	0,0808	-	0,9751	0,3686	-	0,9904	0,956	-	0,9884	0,9035
	CTC	cmol _c dm ⁻³	-	0,9734	0,3179	Box Cox	0,9757	0,3881	-	0,9849	0,7685	-	0,9556	0,0584
	V%	%	Log10	0,9785	0,4938	-	0,9649	0,1428	-	0,9733	0,3159	-	0,9746	0,3524
	M%	%	-	0,9752	0,3741	-	0,9812	0,6041	Log10	0,9789	0,507	-	0,9869	0,8496

Ds: Densidade do solo. PT: Porosidade total. Map: Macroporosidade. Mip: Microporosidade. K_s: Condutividade hidráulica saturada. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Ca: Teor de cálcio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). K: Teor de potássio trocável. COT: Carbono orgânico total. CTC: Capacidade de troca de cátions. V%: Saturação por bases. M%: Saturação por alumínio.

Tabela 8: Matriz de correlações de Pearson para os dados de indicadores físicos e químicos, na camada de 0-10 cm em todos os preparos do solo.

	Ds	PT	Map	Mip	RP	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	Al	Ca	Mg	Ca/Mg	P	K	COT	CTC	V%	M%
Ds	1	-0,64**	-0,69**	0,42**	0,13	0,03	0,04	0,10	-0,12	-0,02	0,06	0,11	0,07	0,02	-0,002	0,13	0,19*	-0,13
PT		1	0,72**	-0,28**	-0,16	0,05	-0,01	-0,07	0,04	0,16	-0,10	0,05	0,001	0,06	0,05	-0,10	-0,06	0,04
Map			1	-0,78**	-0,04	0,08	0,01	0,04	-0,02	0,12	-0,08	0,11	0,01	0,03	0,04	-0,01	0,01	-0,03
Mip				1	-0,08	-0,12	-0,05	-0,15	0,10	-0,05	0,06	-0,16	0,03	0,03	0,01	-0,03	-0,09	0,12
RP					1	-0,09	-0,12	-0,12	0,08	-0,09	-0,08	0,09	0,02	0,05	0,01	0,21*	-0,06	0,04
pH (H ₂ O)						1	0,62**	0,77**	-0,81**	0,45**	-0,002	0,50**	-0,20*	-0,25*	-0,28**	-0,32**	0,62**	-0,78**
pH (KCl)							1	0,77**	-0,73**	0,55**	0,02	0,42**	-0,17	-0,28**	-0,29**	-0,41**	0,61**	-0,67**
pH (CaCl ₂)								1	-0,87**	0,53**	0,03	0,53**	-0,15	-0,33**	-0,33**	-0,38**	0,73**	-0,82**
Al									1	-0,46**	0,01	-0,61**	0,17	0,30**	0,37**	0,35**	-0,73**	0,96**
Ca										1	0,01	0,34**	-0,05	-0,25*	0,01	-0,27*	0,53**	-0,45**
Mg											1	-0,50**	0,16	-0,10	0,03	0,48**	0,47**	-0,13
Ca/Mg												1	-0,03	-0,06	-0,14	-0,28**	0,40**	-0,60**
P													1	0,14	0,18*	0,42**	0,03	0,10
K														1	0,46**	0,39**	-0,21*	0,25*
COT															1	0,46**	-0,16	0,28**
CTC																1	0,05	0,15
V%																	1	-0,83**
M%																		1

Ds: Densidade do solo. PT: Porosidade total. Map: Macroporosidade. Mip: Microporosidade. K_{fs}: Condutividade hidráulica saturada. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Ca: Teor de cálcio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). K: Teor de potássio trocável. COT: Carbono orgânico total. CTC: Capacidade de troca de cátions. V%: Saturação por bases. M%: Saturação por alumínio. * Significativo a 1%. ** Significativo a 0,01%.

Analisando os autovalores da análise fatorial, verifica-se que os cinco (5) primeiros fatores apresentaram autovalores maiores que 1 e explicaram juntos 75% da variabilidade dos dados (Tabela 10). Portanto os 5 fatores foram examinados e utilizados para a seleção dos indicadores.

Tabela 9: Autovalores associados aos indicadores físicos e químicos da camada de 10-20 cm.

	Autovalor	Diferença	Proporção	Acumulado
1	5,96	3,09	0,33	0,33
2	2,86	0,81	0,15	0,49
3	2,04	0,53	0,11	0,60
4	1,51	0,34	0,08	0,68
5	1,17	0,28	0,06	0,75
6	0,88	0,06	0,04	0,80
7	0,82	0,17	0,04	0,84
8	0,64	0,17	0,03	0,88
9	0,47	0,07	0,02	0,91
10	0,39	0,07	0,02	0,93
11	0,31	0,03	0,01	0,94
12	0,27	0,08	0,01	0,96
13	0,19	0,02	0,01	0,97
14	0,17	0,03	0,009	0,98
15	0,13	0,07	0,007	0,99
16	0,06	0,01	0,003	0,99
17	0,05	0,03	0,002	0,999
18	0,01	0,0008	1	

Autovalor em negrito $\geq 1,00$ são selecionados pelo critério de Kaiser.

O primeiro fator explicou 33% da variância e teve carga alta positiva para pH (H₂O), pH (KCl), pH (CaCl₂), Ca, Ca/Mg e V%, e carga negativa alta para Al e M% (Tabela 11). Este fator pode ser denominado de **acidez do solo**.

O Al apresenta a maior carga fatorial, e dentro de 10% desta maior carga estão pH (CaCl₂) e M%. Sendo estes correlacionados, o Al foi mantido como indicador nesse fator, devido a sua maior carga fatorial (-0,945).

No fator 2, que explicou 15% da variância, as variáveis físicas Ds, PT, Map e Mip apresentaram maior carga, sendo este fator denominado **espaço poroso do solo**. A maior carga fatorial foi para a Map, seguida da Ds, porém devido a correlação significativa, apenas a Map foi mantida no segundo fator, pela sua maior carga fatorial (-0,929).

Tabela 10: Autovetores associados aos autovalores dos indicadores físicos e químicos da camada de 10-20 cm.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
Ds	0,075	0,830	-0,015	0,233	-0,037
PT	0,007	-0,805	0,095	-0,080	0,241
Map	0,070	-0,929	0,232	0,021	-0,132
Mip	-0,143	0,686	-0,235	-0,110	0,415
RP	-0,112	0,110	0,054	0,424	-0,674
pH (H₂O)	0,846	-0,030	0,037	0,045	0,018
pH (KCl)	0,823	0,026	-0,023	-0,064	0,131
pH (CaCl₂)	0,924	0,042	0,041	-0,0008	0,005
Al	-0,945	-0,063	-0,034	-0,074	0,031
Ca	0,613	-0,099	0,124	0,001	0,345
Mg	-0,001	0,259	0,692	-0,616	-0,098
Ca/Mg	0,630	-0,095	-0,137	0,627	0,0001
P	-0,211	0,089	0,491	0,160	0,048
K	-0,405	-0,027	0,272	0,520	0,311
COT	-0,406	-0,029	0,420	0,375	0,442
CTC	-0,437	0,184	0,775	0,138	-0,137
V%	0,780	0,177	0,509	-0,085	-0,008
M%	-0,909	-0,091	-0,232	-0,094	0,060

Cargas fatoriais em negrito são consideradas altamente ponderadas. Valores sublinhados são referentes às variáveis selecionadas. Ds: Densidade do solo. PT: Porosidade total. Map: Macroporosidade. Mip: Microporosidade. K_s: Condutividade hidráulica saturada. RP: Resistência do solo a penetração. pH: potencial hidrogeniônico. Al: Teor de alumínio trocável. Ca: Teor de cálcio trocável. Mg: Teor de magnésio trocável. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). K: Teor de potássio trocável. COT: Carbono orgânico total. CTC: Capacidade de troca de cátions. V%: Saturação por bases. M%: Saturação por alumínio.

O fator 3, que explicou 11% da variância, apresentou carga alta para Mg, CTC e V%, com carga positiva para todas as variáveis. Este fator foi denominado de **fertilidade do solo**. A maior carga foi observada para a CTC, seguida de Mg. Como estes apresentam correlação significativa, apenas a CTC foi selecionada neste fator.

O fator 4 explicou 8% da variância e apresentou carga positiva para Ca/Mg e carga negativa para Mg. Ou seja, quando se diminui Mg, aumenta a relação Ca/Mg. O quarto fator pode ser denominado de **disponibilidade de nutrientes**. Como há correlação significativa para estes dois indicadores, apenas a relação Ca/Mg foi mantida, pela sua maior carga fatorial (0,627).

O fator 5 explicou 6% da variância e apresentou carga alta para a RP, a qual foi mantida. Este fator foi denominado **condições físicas do solo para o crescimento de raízes**.

Dos 18 indicadores foram selecionadas 5, sendo 2 físicos: Map e RP; e 3 químicos: Al, Ca/Mg e CTC. A Figura 13 ilustra a relação de cada variável dentro dos fatores conforme abordado anteriormente, semelhante ao já discutido na camada de 0-10 cm.

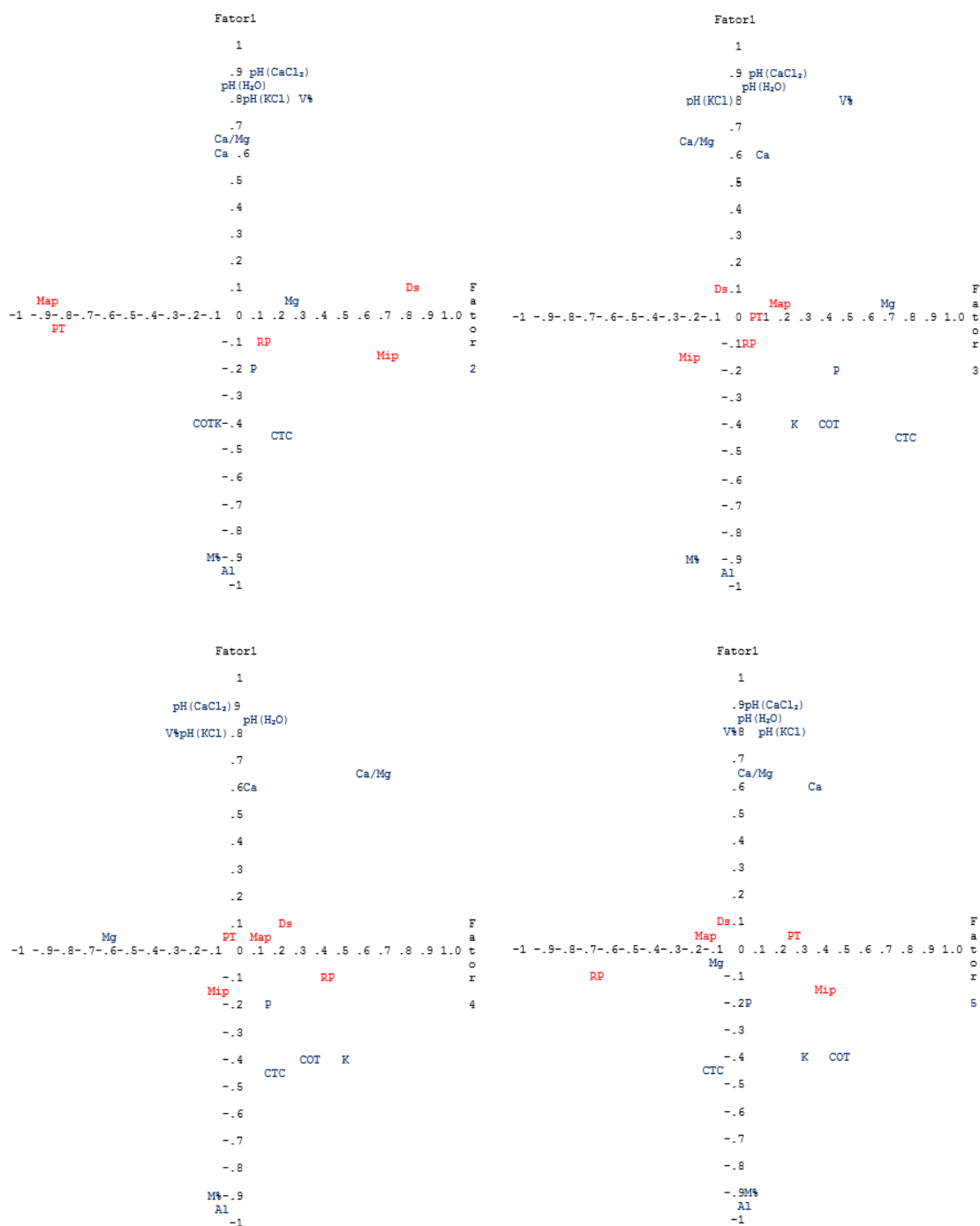


Figura 13: Gráficos com os fatores representando os maiores pesos das variáveis. Camada 10-20. Fonte: A autora (2018).

5.4 PADRONIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Para cada variável selecionada para compor o conjunto mínimo de dados, foi realizada uma padronização não linear, para seu valor variar entre 0 e 1. Para isto, foi utilizada a função de padronização de escores descrita no item 4.5.2. As três funções de padronização utilizadas foram: mais é melhor, valor ótimo e menos é melhor.

Para Map, pH (CaCl_2) e Ca/Mg foram utilizadas funções de valor ótimo. Para RP e Al, foram utilizadas funções menos melhor. Para as variáveis químicas Mg, P e CTC utilizou-se a função mais melhor (figura 14). Fernandes *et al.* (2011) também utilizaram a função mais melhor para os indicadores relacionados a fertilidade do solo.

Tanto as curvas de padronização quanto os valores limites, superior, inferior e crítico devem ser criteriosamente estabelecidos. Para isso, buscou-se informações na literatura para estabelecer estes limites. As referências utilizadas em cada indicador são apresentadas na Tabela 2.

Para o estabelecimento dos valores nos indicadores físicos, houve maior dificuldade visto não haver na literatura valores que descrevam cada indicador para determinado tipo de solo e cultura, e os dados de pesquisa são abrangentes quanto a locais avaliados e metodologias utilizadas. Bunemann *et al.* (2018) citam que o estabelecimento de faixas adequadas permanecerá sempre controversa, o que se deve em parte à falta de dados, em parte devido ao padrão curvilíneo que muitos indicadores seguem e em parte porque há controvérsia em resultados. Destacam que para muitos atributos do solo, curvas de pontuação dependentes da textura precisam ser desenvolvidas, o que é possivelmente um dos maiores desafios.

Para os indicadores químicos e de fertilidade do solo houve maior facilidade, e para isto utilizou-se como parâmetro o Manual de Adubação e Calagem do Estado do Paraná, (MANUAL..., 2017). O parâmetro químico mais difícil de ser estabelecido foi a relação Ca/Mg, visto que os autores citam grande variação de resultados quanto a este parâmetro na literatura, devido principalmente a diferentes respostas das culturas.

A partir do estabelecimento de todos os parâmetros, as curvas de padronização foram realizadas, e estão apresentadas na Figura 14. A partir das equações padronizadas com suas respectivas curvas, o valor médio de cada indicador foi padronizado variando entre 0 e 1. Estes escores padronizados foram utilizados para a construção do IQS.

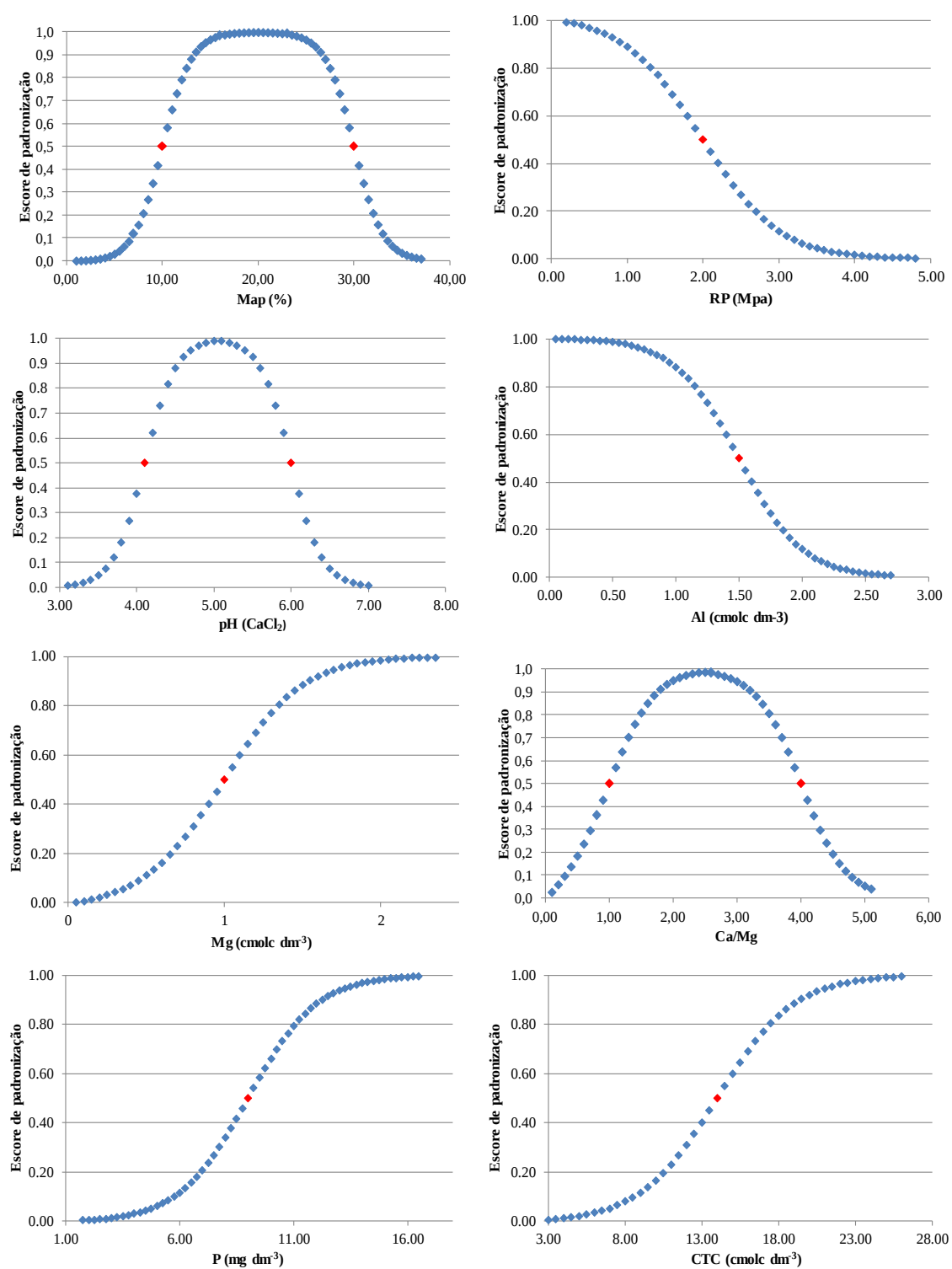


Figura 14: Curvas de padronização para os indicadores de qualidade do solo. Fonte: A autora (2018).

5.5 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO

Com os indicadores selecionado e padronizados, foi possível calcular o IQS para os três preparos do solo e a vegetação secundária, utilizando como ponderadores os parâmetros advindos a análise fatorial, conforme descrito no item 4.5.3.

O primeiro ponderador foi resultado da contribuição da variância de cada fator em relação a variância comum entre todos os fatores. Foram utilizados os 5 fatores, e este ponderador multiplicou a soma do escore absoluto dentro de cada fator. Para se chegar a soma do escore absoluto dentro de cada fator, como alguns fatores selecionaram mais de um indicador, foi utilizado um ponderador para cada indicador, sendo que este representa a pontuação do indicador dentro dos autovetores do seu autovalor (fator).

Na Tabela 11 é ilustrado os ponderadores calculados para cada fator (ponderador A), e os ponderadores para cada indicador (ponderador B), e o cálculo do IQS para a camada de 0-10 cm.

Na primeira camada do solo, o PM foi o que apresentou a maior qualidade do solo (IQS: 0,76), seguido do PC (IQS: 0,67). O PD apresentou um IQS de 0,54. O PM foi o que apresentou maior qualidade do solo entre os preparos, e isto demonstra que em solos argilosos cultivados em clima subtropical, a realização de operações de preparo do solo se mostram viáveis em aumentar a qualidade do solo. Apesar disto, pelos resultados obtidos para a camada de 0-10 cm, preparos mais intensivos realizados no PC não são os mais adequados, porém a manutenção do solo sem revolvimento não se mostra a prática mais adequada nestas condições.

Avaliando a qualidade de um Argissolo em diferentes preparos do solo, Fernandes *et al.* (2011) verificaram que os IQS variou entre 0,64 e 0,68 para os dois sistemas de PD, 0,86 para o PM e 0,79 para o PC. Estes resultados são similares aos encontrados neste trabalho, com maior qualidade do solo no PM. Os autores citam que os indicadores físicos como RP e a Map aumentaram o IQS em PM e PC em relação ao PD. Concluem que com os resultados do IQS, o PM é o manejo mais adequado para aumentar a qualidade do solo para o local analisado.

Verifica-se que de forma semelhante neste trabalho, o preparo do solo tem favorecido alguns indicadores do solo, mantendo estes dentro de uma faixa adequada para as culturas agrícolas.

Tabela 11: Cálculo do índice de qualidade do solo (IQS) para a camada de 0-10 cm no plantio direto, preparo mínimo, preparo convencional e vegetação secundária.

(continua)

PLANTIO DIRETO									
	Pond. (A)	Indicador	Pond. (B)	Esc. Pad. (C)	Esc. Abs. (B X C)	Soma (B) X (C) =(D)	Total fatores (A)X(D)	Total fatores (%)	IQS
Fator 1	0,479	pH (CaCl ₂)	1	0,343	0,343	0,343	0,164	31	0,54
Fator 2	0,185	Map	1	0,683	0,683	0,683	0,126	23	
Fator 3	0,148	CTC	1	0,891	0,891	0,891	0,132	25	
Fator 4	0,115	Mg	0,52	0,966	0,507	0,508	0,059	11	
		P	0,48	0,001	0,001				
Fator 5	0,073	RP	1	0,760	0,760	0,760	0,055	10	
PREPARO MÍNIMO									
Fator 1	0,479	pH (CaCl ₂)	1	0,633	0,633	0,633	0,303	40	0,76
Fator 2	0,185	Map	1	0,995	0,995	0,995	0,184	24	
Fator 3	0,148	CTC	1	0,935	0,935	0,935	0,139	18	
Fator 4	0,115	Mg	0,525	0,999	0,525	0,525	0,061	8	
		P	0,475	0,000	0,00019				
Fator 5	0,073	RP	1	0,956	0,956	0,956	0,070	9	
PREPARO CONVENCIONAL									
Fator 1	0,479	pH (CaCl ₂)	1	0,525	0,525	0,525	0,251	37	0,67
Fator 2	0,185	Map	1	0,999	0,999	0,999	0,184	27	
Fator 3	0,148	CTC	1	0,799	0,799	0,799	0,118	18	
Fator 4	0,115	Mg	0,525	0,837	0,439	0,439	0,051	8	
		P	0,475	0,000	0,000				
Fator 5	0,073	RP	1	0,958	0,958	0,958	0,070	10	
VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA									
Fator 1	0,479	pH (CaCl ₂)	1	0,374	0,374	0,374	0,179	30	0,61
Fator 2	0,185	Map	1	1,000	1,000	1,000	0,185	30	
Fator 3	0,148	CTC	1	0,831	0,831	0,831	0,123	20	
Fator 4	0,115	Mg	0,525	1,000	0,525	0,525	0,061	10	
		P	0,475	0,000	0,000				
Fator 5	0,073	RP	1	0,806	0,806	0,806	0,059	10	

(conclusão)

Pond.: Ponderador. Esc. Pad.: Escore padronizado. Esc. Abs.: Escore absoluto. IQS: Índice de qualidade do solo. pH: potencial hidrogeniônico. Map: Macroporosidade. CTC: Capacidade de troca de cátions. Mg: Teor de magnésio trocável P: Teor de fósforo disponível (Mehlich). RP: Resistência do solo a penetração.

Cherubin, Tormena e Karlen (2017) verificaram que na camada de 0-15 cm, o PD apresentou índice de 0,75, o PM de 0,78 e o PC de 0,72. Verifica-se a tendência semelhante ao encontrado, com maior índice no PM, diferenciando da tendência entre o PC e o PD. Os autores citam que os indicadores físicos contribuíram mais nos preparos do solo quando comparados ao PD. Cavalieri *et al.* (2006) verificaram uma influência negativa na qualidade física do solo com a diminuição da intensidade de preparo do solo.

Na camada de 15 a 30 cm, Cherubin, Tormena e Karlen (2017) verificaram que o PM e o PC apresentaram o mesmo índice (0,52) e o PD apresentou um índice de 0,41, o qual diferiu significativamente dos demais. Houve limitação química, física e biológica no PD em relação aos demais.

Ao estudar a QS de Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, com 450 g kg⁻¹ de argila, Cherubin, Tormena e Karlen (2017) puderam constatar pelo IQS que os solos estavam funcionando a 77, 81 e 84% de sua capacidade potencial sob plantio direto, preparo mínimo e escarificação. Verifica-se uma tendência em aumento da qualidade do solo com o preparo. A área estudada por estes autores já se encontrava há 10 anos sob plantio direto, e o período de tempo entre o preparo do solo e a amostragem do solo foi de um ano. Os escores obtidos mostraram uma estreita relação com o rendimento de milho que para essa mesma área, apresentaram médias de 5,95, 6,80 e 6,90 Mg ha⁻¹ para plantio direto, preparo mínimo e escarificação, respectivamente, conforme relatado no trabalho de Pinto *et al.* (2014).

Costa, Goedert e Sousa (2006) não encontraram diferença entre a qualidade dos solos cultivados sob PC e PD, avaliando a qualidade do solo com modelos gráficos radiais, e concluem que os indicadores biológicos são mais sensíveis para detectar a mudança de qualidade do solo sob cultivo. Hussain *et al.* (1999) verificaram que as práticas de plantio direto resultaram na melhor qualidade geral do solo. Com o uso de indicadores biológicos, o PD pode apresentar um melhor IQS.

O declínio na qualidade do solo pode comprometer a produção agrícola. Alguns autores acreditam que a produtividade é a expressão final da qualidade de um solo, pois a alta produtividade das culturas ocorre quando indicadores biológicos, físicos e químicos estão em boas condições (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Muitas vezes quando se

observa apenas indicadores individuais do solo não se chega a respostas claras sobre a influência destas sobre a produtividade. Quando se consegue usar os dados de vários indicadores diferentes do solo em um único valor, como o IQS, este pode explicar muito melhor a variação na produtividade, pois muitos fatores interferem na produção (BEARE, 2006).

A produção da cultura do milho na safra 2017-2018 foi consistente com esta afirmação. A produção média foi de 7315 kg ha⁻¹ no PM; 6574 kg ha⁻¹ no PC e 6096 kg ha⁻¹ no PD. Comparando estes resultados com a média de produção da safra de milho 2017-2018, verifica-se que em ambos os preparos do solo, o rendimento do milho está abaixo do rendimento médio da cultura no estado do Paraná, de 8.748 kg ha⁻¹, segundo a CONAB (2018).

A avaliação da qualidade do solo mostrou-se consistente com os resultados de produtividade. Para o PM, que apresentou o melhor IQS nas duas camadas, a produtividade foi maior, seguido pelo PC, com o segundo maior IQS e a segunda maior produtividade, e o PD apresentou a menor produtividade, e o menor IQS nas duas camadas. Cherubin, Tormena e Karlen (2017) também verificaram que a avaliação da qualidade do solo foi consistente com os rendimentos das culturas.

Essas baixas produtividades são resultado das condições de fertilidade do solo encontradas no local, havendo necessidade de correções químicas para o incremento das produções, porém de modo geral, a produtividade mostra-se afetada pelo preparo do solo, portanto tanto as propriedades químicas quanto as físicas estão comprometendo a produção. O PM, pela incorporação de resíduos ao solo, porém mantendo um pouco de cobertura do solo, pode favorecer a ciclagem de nutrientes e desse modo favorecer o desenvolvimento das plantas, além de melhorar as condições físicas, favorecendo a qualidade do solo nas condições estudadas.

Na vegetação secundária, o IQS para a camada de 0-10 cm foi de 0,61, o que foi superior ao PD e inferior ao PC e PM (Tabela 11). Já na camada de 10-20 cm, a VS apresentou o menor IQS (0,30) (Tabela 12). Solos sobre vegetação nativa demonstram tanto suas limitações quanto suas potencialidades. Solos de clima tropical e subtropical, por serem bem desenvolvidos apresentam maior acidez devido a sua composição, com argilas cauliníticas e óxidos de ferro e alumínio na sua fração argila, resultando em elevados valores de Al disponível (BRIEDIS *et al.*, 2012). O alto teor de Al na VS neste estudo foi o que proporcionou menor IQS na segunda camada.

Solos sob condições naturais, por possuírem limitações químicas, com baixa disponibilidade de alguns nutrientes e elevada acidez, unida a presença de Al trocável em altas concentrações, podem apresentar, sob condição natural, baixo IQS para crescimento das plantas e produção vegetal (MELO FILHO; SOUZA; SILVA SOUZA, 2007).

Solos de clima tropical naturalmente apresentam condições químicas desfavoráveis ao desenvolvimento de culturas agrícolas potencialmente produtivas. No entanto, o ecossistema funciona corretamente desempenhando seu papel ambiental, e sustentando as culturas nativas locais (CARDOSO *et al.*, 2013). Bunemann *et al.* (2018) citam que os valores de referência para um determinado indicador podem ser os de um solo nativo, mas que esse pode não ser adequado para a produção agrícola, e que a referência pode não ser ótima em todos os parâmetros.

Estas condições químicas desfavoráveis para culturas comerciais são facilmente manipuladas, com correção do pH do solo e fornecimento de nutrientes (VAN RAIJ, 2011). Por esta razão, avaliando a qualidade do solo em uma visão mais produtiva, é comum que esta condição natural desencadeie menores IQS. Bunemann *et al.* (2018) ressaltam que a avaliação da qualidade do solo precisa incluir valores de referência para permitir a identificação dos efeitos de manejo, pois cada solo apresenta seu potencial diferenciado devido a diferentes influências de material de origem, solo, clima e topografia.

Porém em algumas condições, a conversão do solo para a agricultura pode diminuir a qualidade do solo. Cherubin, Tormena e Karlen (2017) e Cherubin *et al.* (2016) verificaram uma redução na qualidade do solo quando este foi convertido de vegetação natural para a agricultura. Encontraram um IQS de 0,80 na vegetação nativa e de 0,64 na agricultura. A vegetação natural era uma floresta estacional semidecidual do bioma Mata Atlântica, e a área agrícola compreendia uma área com diferentes manejos, distintos preparos do solo e culturas implantadas ao longo das safras. Os resultados do trabalho indicaram significativa degradação física e biológica do solo sob a agricultura.

O que é considerado boa qualidade do solo em um contexto agrícola pode não ser tão bom em outro e isso torna a avaliação da qualidade do solo uma grande tarefa (ADEYOLANU; OGUNKUNLE, 2016). Além disso, ao se comparar a qualidade do solo em sistemas produtivos e a vegetação secundária, deve ser levado em consideração as práticas adotadas no sistema produtivo. Costa, Goedert e Sousa (2006) destacam que como com as práticas produtivas o equilíbrio do solo sob vegetação natural é rompido e que um

novo equilíbrio é estabelecido, não parecendo pertinente a comparação da qualidade do solo cultivado com a do solo sob vegetação nativa.

Melo Filho, Souza e Silva Souza (2007) citam que os solos em condições referenciais, sem ações antrópicas, expressam tanto o seu potencial, suas limitações e sua qualidade de referência, pois, quando ocorre a modificação de sistemas naturais para agrícolas, muitos indicadores do solo são alterados para melhor ou pior, e sua qualidade também é modificada. No seu trabalho, verificando a qualidade de um Latossolo Amarelo coeso argissólico dos Tabuleiros Costeiros sob floresta natural, verificaram neste solo um IQS baixo, de 0,4620, indicando que o solo possui baixa qualidade para produção vegetal e seu uso em sistemas agrícolas exige melhorias nos indicadores de qualidade para o suprimento de nutrientes e condução e armazenamento de água. Em sistemas agrícolas, a qualidade do solo é monitorada com a visão de administrar o sistema para melhorar a produção sem degradar os solos e o meio ambiente (GREGORICH, 2006).

Na Tabela 12 são ilustrados os ponderadores calculados para cada fator e o cálculo do IQS para a camada de 10-20 cm, conforme a equação descrita no item 4.5.3. Nesta camada, comparando os preparos do solo, foi constatado que o PC apresentou o maior IQS (0,89), seguido do PM (0,87). Assim como na camada de 0-10, o PD apresentou qualidade do solo inferior ao PM e ao PC, com IQS de 0,78. No PC, o arado utilizado revolve camadas mais profundas do solo em comparação a grade utilizada no PM. Portanto, de forma semelhante a camada de 0-10 cm, o revolvimento do solo foi eficiente em aumentar o IQS na condição de solo e clima estudado, sendo o PC e o PM com QS superior ao PD.

Tabela 12: Cálculo do índice de qualidade do solo (IQS) para a camada de 10-20 cm no plantio direto, preparo mínimo, preparo convencional e vegetação secundária.

(continua)

PLANTIO DIRETO								IQS
	Pond. (A)	Indicador	Pond. (B)	Esc. Pad. (C)	Esc. Abs. (B X C)	Total fatores (A) X (D)	Total fatores (%)	
Fator 1	0,439	Al	1	0,783	0,783	0,344	44	
Fator 2	0,211	Map	1	0,962	0,962	0,203	26	0,78

(conclusão)							
Fator 3	0,151	CTC	1	0,775	0,775	0,117	15
Fator 4	0,111	Ca/Mg	1	0,826	0,826	0,092	12
Fator 5	0,086	RP	1	0,343	0,343	0,030	4
PREPARO MÍNIMO							
Fator 1	0,439	Al	1	0,979	0,979	0,430	49
Fator 2	0,211	Map	1	0,877	0,877	0,185	21
Fator 3	0,151	CTC	1	0,887	0,887	0,134	15
Fator 4	0,111	Ca/Mg	1	0,663	0,663	0,074	8
Fator 5	0,086	RP	1	0,581	0,581	0,050	6
PREPARO CONVENCIONAL							
Fator 1	0,439	Al	1	0,903	0,903	0,396	45
Fator 2	0,211	Map	1	0,995	0,995	0,210	24
Fator 3	0,151	CTC	1	0,758	0,758	0,114	13
Fator 4	0,111	Ca/Mg	1	0,863	0,863	0,096	11
Fator 5	0,086	RP	1	0,799	0,799	0,069	8
VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA							
Fator 1	0,439	Al	1	0,004	0,004	0,002	1
Fator 2	0,211	Map	1	0,999	0,999	0,211	69
Fator 3	0,151	CTC	1	0,381	0,381	0,057	19
Fator 4	0,111	Ca/Mg	1	0,049	0,049	0,005	2
Fator 5	0,086	RP	1	0,344	0,344	0,030	10

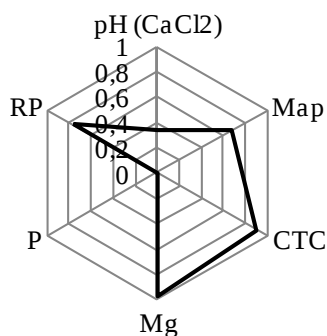
Pond.: Ponderador. Esc. Pad.: Escore padronizado. Esc. Abs.: Escore absoluto. IQS: Índice de qualidade do solo. Al: Teor de alumínio trocável. Map: Macroporosidade. CTC: Capacidade de troca de cátions. Ca/Mg: Relação Ca/Mg. RP: Resistência do solo a penetração.

A Figura 15 mostra as contribuições de cada indicador dentro dos locais de estudo na camada de 0-10 cm. A baixa fertilidade química está refletida no IQS. Houve pouca contribuição do pH na qualidade do solo em todos os locais, sendo ainda menor esta contribuição no PD e na VS. A ausência de insumos como o calcário influencia na baixa qualidade do solo.

Os teores de P tiveram baixa contribuição no IQS em todos os locais, mostrando que correções de P são necessárias, visando disponibilizar este nutriente as plantas,

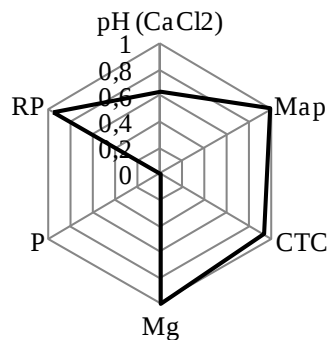
melhorando a qualidade do solo. Apesar do solo em ambos os locais apresentar uma alta CTC, esta contribuiu menos no IQS do PC e da VS. Para o Mg, houve menor contribuição no PC.

PLANTIO DIRETO



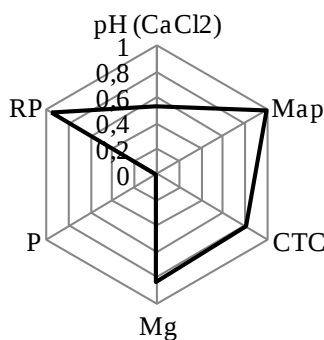
IQS: 0,54

PREPARO MÍNIMO



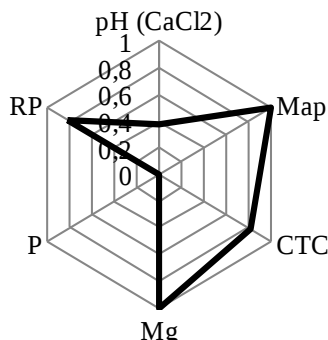
IQS: 0,76

PREPARO CONVENCIONAL



IQS: 0,67

VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA



IQS: 0,61

Figura 15: Contribuição dos indicadores no índice de qualidade do solo para a camada de 0-10 cm no plantio direto (PD), preparo mínimo (PM) preparo convencional (PC) e vegetação secundária (VS). Fonte: A autora (2018).

As limitações físicas estão refletidas no IQS. Verifica-se uma baixa contribuição da RP e da Map no PD na camada de 0-10 cm. Juntamente com o pH (CaCl_2), a RP e a Map foram os indicadores que mais contribuíram para a menor QS no PD. Na VS não houve limitação pela Map, porém a contribuição da RP foi menor quando comparado ao PM e ao PC.

Da mesma forma que na camada de 0-10 cm, na camada de 10-20 cm a RP teve baixa contribuição para a QS no PD (Figura 16). O PD é classificado como manejo de conservação, devido à ausência de preparo do solo e à manutenção dos resíduos da cultura

na superfície do solo. Porém, o não revolvimento do solo pode causar diminuição da sua qualidade física, reduzindo a capacidade das raízes das plantas de explorarem as camadas do solo para buscar água e nutrientes. Portanto, práticas de manejo que aliviem a compactação do solo se tornam necessárias para aumentar a qualidade física.

Verifica-se melhor contribuição da RP na QS do PC seguida do PM. Operações de preparo do solo podem ser favoráveis em algumas condições, e neste trabalho, se tratando de um solo argiloso, se mostraram favoráveis. Outros trabalhos também citam contribuições positivas do revolvimento do solo para a QS. Avaliações realizadas apenas no plantio direto, em posições de linha e na entrelinha de semeadura mostraram IQS de 0,85 na linha e 0,82 na entrelinha na camada de 0-10 cm, e índices de 0,70 e 0,69 na linha e entrelinha na camada de 10-20 cm, respectivamente. Verifica-se que um mínimo revolvimento do solo na linha de semeadura causou uma pequena melhora no IQS, e que a necessidade de práticas de manejo para aliviar a compactação do solo pode ser favorável (CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017).

Da mesma forma que no PD, houve menor contribuição da RP na VS na camada de 10-20 cm. Além da maior resistência de agregados, que pode contribuir para uma maior RP na VS, a presença de raízes em profundidade do solo sob culturas perenes pode contribuir para maiores valores de RP. A Map se mostrou semelhante em todos os locais, sendo sua contribuição no IQS um pouco menor do PM.

Na camada de 10-20 cm, o Al foi selecionado como indicador. Este contribuiu para reduzir a qualidade do solo na VS (Figura 16), e também no PD, em menor proporção. Verifica-se como no PM, os teores de Al não reduziram a QS, reduzindo muito pouco no PC.

A relação Ca/Mg teve a menor contribuição na VS, o que é devido aos altos teores de Mg da VS. Verifica-se que no PM a relação Ca/Mg contribuiu menos na QS do solo em relação ao PC e PD. A CTC contribuiu em aumentar o IQS no PM em relação aos demais locais, que se reduziu em maior proporção na VS.

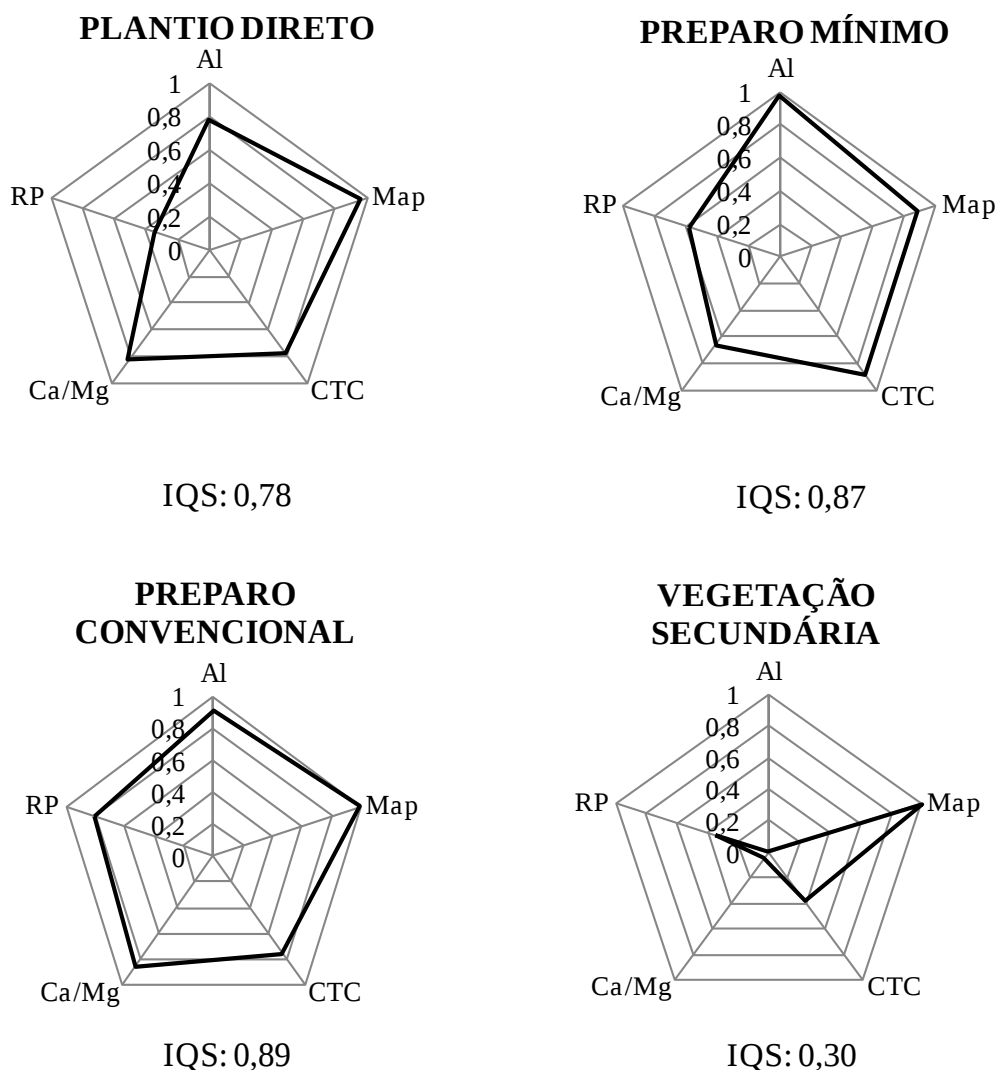


Figura 16: Contribuição dos indicadores no índice de qualidade do solo para a camada de 10-20 cm no plantio direto (PD), preparo mínimo (PM) preparo convencional (PC) e vegetação secundária (VS). Fonte: A autora (2018).

Com a análise do IQS nas duas camadas, verifica-se que houve maior qualidade na camada de 0-10 em relação a camada de 10-20 cm somente na VS, e nos preparos do solo a qualidade foi superior na camada de 10-20 cm em relação a camada de 0-10 cm (Figura 17). Este resultado não é o esperado, pois naturalmente camadas mais superficiais apresentam maior quantidade de raízes das plantas, sendo as camadas mais exploradas por estas.

A menor qualidade do solo na camada de 10-20 cm da VS é atribuída principalmente pelo aumento nos teores de Al nesta, o qual tende a reduzir a qualidade do solo. Porém, para as espécies nativas, a limitação pelo Al é reduzida.

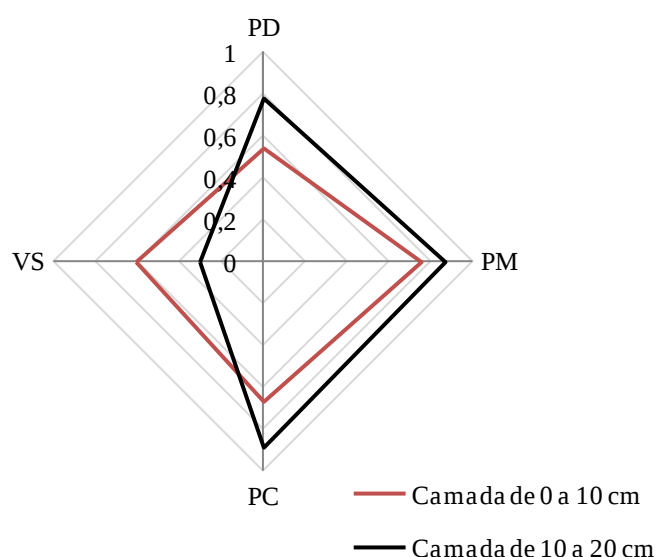


Figura 17: Comparação do índice de qualidade do solo na camada de 0-10 cm e na camada de 10-20 cm. Fonte: A autora (2018).

O menor IQS nas camadas superficiais encontrado nos preparos são controversos com resultados da literatura. Em trabalho com cana de açúcar, Cherubin *et al.* (2016) verificou que o IQS diminuía com a profundidade, independentemente do uso da terra e do local. As camadas avaliadas foram de 0-10, 10-20 e 20-30 cm. Os fatores citados como contribuintes para esta melhor qualidade nas camadas mais superficiais foram os resíduos de culturas na superfície do solo, a maior atividade biológica e bioquímica, maiores ciclos de nutrientes e os insumos fertilizantes aplicados.

Cherubin, Tormena e Karlen (2017) avaliando duas camadas de solo (0-15 cm e 15 a 30 cm) em preparo convencional, plantio direto e preparo mínimo, encontraram que de modo geral a qualidade do solo foi maior na primeira camada, e que o plantio direto apresentou maior limitação na camada de 15 a 30 cm, e isto foi devido a limitações químicas, pois a ausência de preparo no sistema plantio direto induziu a maior quantidade de nutrientes na camada superficial, com contribuição também de limitações físicas e biológicas. Estes autores sugerem que as práticas de manejo do solo devem ser priorizadas para reduzir a compactação do solo e melhorar a fertilidade do solo nas camadas mais profundas, e procurar aumentar os teores de carbono em preparos mais intensivos.

As Figuras 18 e 19 mostram a contribuição percentual de cada função do solo para o IQS obtido. Na camada de 0-10 cm, o fator 1, acidez do solo, contribuiu mais no IQS do PM (40%), seguido do PC (37%). O fator 2, espaço poroso do solo, contribuiu mais no IQS da VS (30%).

O fator 3, fertilidade do solo, contribuiu mais no IQS do PD (24%), e menos no PC (17%). O fator 4, disponibilidade de nutrientes, teve a maior contribuição no PD (10%). O fator 5, condições físicas do solo para o crescimento das raízes contribuiu de forma semelhante em todos os locais.

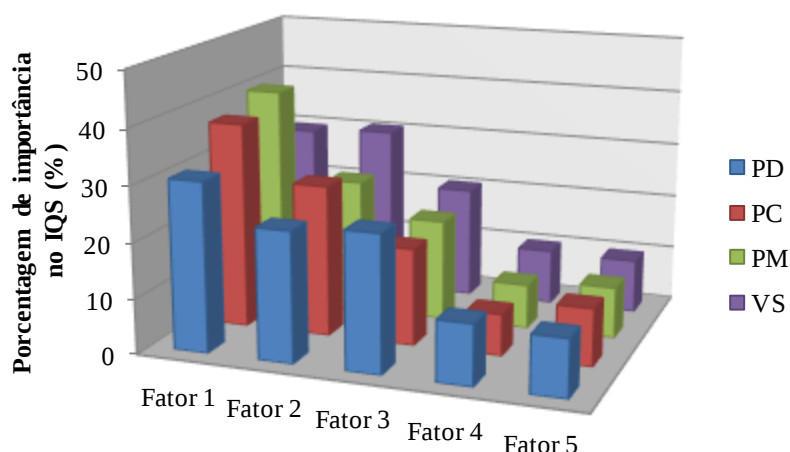


Figura 18: Contribuição percentual de cada função do solo para a avaliação do índice de qualidade do solo para cada sistema de preparo do solo e na vegetação secundária, para a camada 0-10 cm. Fonte: A autora (2018).

Na camada de 10-20 cm (Figura 19), o fator 1, acidez do solo, contribuiu menos no IQS da VS (0,5%) e mais no IQS do PM (49%). Isto foi resultado das maiores concentrações de Al da camada de 10-20 da VS, o que contribui no menor IQS encontrado.

Consequentemente, o fator 2, espaço poroso do solo, contribuiu mais no IQS da VS (69%). Este, representado pela Map, se mostrou adequado na VS. O fator 3, fertilidade do solo, contribuiu 18% no IQS da VS, superior aos demais, e o fator 5, condições físicas do solo para o crescimento das raízes, contribuiu 9% no IQS da VS e apenas 3% no PD. O fator 4, disponibilidade de nutrientes teve menor contribuição na VS e maior no PD.

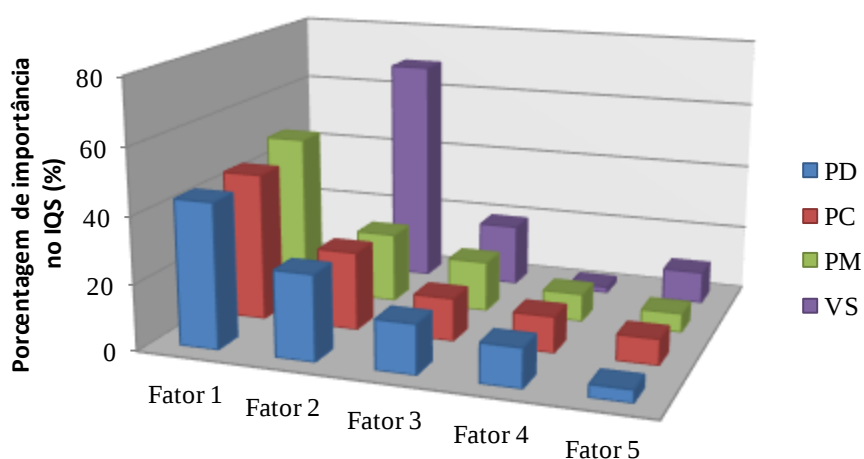


Figura 19: Contribuição percentual de cada função do solo para a avaliação do índice de qualidade do solo para cada sistema de preparo do solo e na vegetação secundária, para a camada 10-20 cm. Fonte: A autora (2018).

O IQS é eficiente na avaliação da qualidade do solo em sistemas de preparo, bem como para avaliar outras práticas de produção agrícola, como diferentes adubações do solo. Cherubin, Tormena e Karlen (2017), verificaram que a adubação orgânica melhorou a qualidade do solo em relação a adubação mineral. BARBOSA *et al.* (2018) avaliaram a qualidade do solo em cana-de-açúcar com o uso de esgoto doméstico para irrigação e o fornecimento de nutrientes às plantas, utilizando indicadores físicos, químicos e microbiológicos, não encontrando diferença na QS.

6 CONCLUSÕES

A ferramenta estatística possibilitou selecionar indicadores para a avaliação da qualidade do solo, reduzindo de 19 indicadores na camada de 0 a 10 cm para 6 indicadores, e de 18 indicadores na camada de 10 a 20 cm para 5 indicadores.

Os indicadores selecionados na camada de 0-10 foram: pH (CaCl_2), Map, CTC, Mg, P e RP; e na camada de 10-20 cm foram: Al, Map, CTC, Ca/Mg e RP.

O preparo do solo modificou a qualidade do solo, sendo encontrado o IQS na seguinte ordem, de maior QS para menor QS: PM>PC>VS>PD da camada de 0-10 cm e PC>PM>PD>VS na camada de 10-20 cm.

O IQS é uma ferramenta eficiente para monitorar a QS em diferentes preparos do solo, e pode ser aplicado em outras condições de estudo.

O preparo de solo melhorou a qualidade do solo nas condições de solos argilosos de ambiente subtropical, sendo portanto uma prática recomendável nestas condições.

7 REFERÊNCIAS

- ADEYOLANU, O. D.; OGUNKUNLE, A. O. Comparison of qualitative and quantitative approaches to soil quality assessment for agricultural purposes in South-western Nigeria. **Cogent Food & Agriculture**, 2016. v. 2, n. 1, p. 1–10.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 2004. v. 26, n. 1, p. 27–34.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. **Soil Science Society of America Journal**, 2004. v. 68, n. 6, p. 1945–1962.
- ANDREWS, S.S. *et al.* On-Farm Assessment of Soil Quality in California's Central Valley. **Agronomy Journal**, 2002. v. 94, n. 1, p. 12–23.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture Ecosystems & Environment**, 2002. v. 90, n. 1, p. 25–45.
- BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, 2004. v. 68, n. 1, p. 66–73.
- BARBOSA, E. A. A. *et al.* Soil attributes and quality under treated domestic sewage irrigation in sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2018. v. 22, n. 2, p. 137–142.
- BEARE, M. H. Quality and Productivity. In: LAL, R. (Org.). **Encyclopedia of soil science**. 2. ed. Ohio, USA: Taylor e Francis Group, 2006, p. 1–1924.
- BOLINDER, M. A. *et al.* The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal of Soil Science**, 1999. v. 79, p. 37–45.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRIEDIS, C. *et al.* Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2012. v. 47, n. 7, p. 1007–1014.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, 2018. v. 120, p. 105–125.
- BUSSCHER, W. J. *et al.* Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, 1997. v. 43, n. 3–4, p. 205–217.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. VAN. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. VAN *et al.* (Org.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas-SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001, p. 173–180.

CARDOSO, E. J. B. N. *et al.* Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, 2013. v. 70, n. 4, p. 274–289.

CARTER, M. R. Quality: Critical Limits and Standardization. In: LAL, R. (Org.). **Encyclopedia of soil science**. 2. ed. Ohio, USA: Taylor e Francis Group, 2006, p. 1–1924.

CARVALHO LEITE, L. F.; MACIEL, G. A.; ARAÚJO, A. S. F. De. **Agricultura conservacionista no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2014.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; ALBERTO, R. Sistema plantio direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. Da; REICHERT, J. M. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, V. 5, p. 333–365.

CAVALIERI, K. M. V *et al.* Eleitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 2006. v. 30, p. 137–147.

CHERUBIN, M. R. *et al.* A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, 2016. v. 80, p. 215–226.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil quality evaluation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2017. v. 41, p. 1–18.

CNPT-EMBRAPA; FUNDACEP-FECOTRIGO; ABC, F. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo - RS: Editora Aldeia Norte, 1993.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos. CONAB Monitoramento agrícola- Safra 2017/18**. CONAB. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. DE. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 2006. v. 41, n. 7, p. 1185–1191.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, 2009. v. 31, n. 3, p. 371–376.

DENARDIN, J. E. *et al.* **Evolução da área cultivada sob sistema plantio direto no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo - RS: Embrapa Trigo, 2001.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. *et al.* (Org.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, USA: SSSA, 1994, p. 1–20.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, 2000. v. 15, p. 3–11.

DROBNIK, T. *et al.* Soil quality indicators-From soil functions to ecosystem services.

Ecological Indicators, 2018. v. 94, p. 151–169.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2° revisad ed. Rio Claro-SP: Embrapa Solos, 2011.

_____. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 rev. e a ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio direto e Irrigação. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/area-de-pd>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

FERNANDES, J. C. *et al.* Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. **Soil and Tillage Research**, 2011. v. 112, n. 2, p. 167–174.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. De; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, 2001. v. 58, n. 3, p. 627–646.

FUNDAÇÃO CARGILL. **Aspetos de manejo do solo**. Campinas-SP: [s.n.], 1985.

GABRIEL FILHO, A. *et al.* Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, 2000. v. 30, n. 6, p. 953–957.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Embrapa Meio Ambiente, 2006.

GONÇALVES, A. D. M. De A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 2013. v. 37, n. 5, p. 1174–1184.

GONÇALVES, D. *et al.* Mineralogia de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes manejos por 24 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2008. v. 32, p. 2647–2652.

GRABLE, A. R.; SIMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, 1968. v. 32, p. 180–186.

GREGORICH, E. G. Quality. *In*: LAL, R. (Org.). **Encyclopedia of soil science**. 2. ed. Ohio, USA: Taylor e Francis Group, 2006, p. 1–1924.

HEMMAT, A.; AHMADI, I.; MASOUMI, A. Water infiltration and clod size distribution as influenced by ploughshare type, soil water content and ploughing depth. **Biosystems Engineering**, 2007. v. 97, n. 2, p. 257–266.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. California, USA: Elsevier, 1998.

HUSSAIN, I. *et al.* Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. **Soil & Tillage Research**, 1999. v. 50, n. 3–4, p. 237–249.

IBRAHIM, M. M.; ALIYU, J. Comparison of Methods for saturated hydraulic conductivity determination: field, laboratory and empirical measurements (A Pre-view).

British Journal of Applied Science & Technology, 2016. v. 15, n. 3, p. 1–8.

INSTITUTE, S. **SAS/STAT procedure guide for personal computers**. 5ed. NC: Cary, 1991.

IVO, W. M. P. M.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1999. v. 23, n. 1, p. 135–143.

JÓNSSON, J. Ö. G. *et al.* Soil indicators for sustainable development: A transdisciplinary approach for indicator development using expert stakeholders. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 16 set. 2016. v. 232, p. 179–189.

KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educ. Psychol. Meas**, 1960. v. 29, p. 141–151.

KIANI, M. *et al.* Quantifying sensitive soil quality indicators across contrasting long-term land management systems: Crop rotations and nutrient regimes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 2017. v. 248, p. 123–135.

LEITE CHAVES, H. M.; CONCHA LOZADA, C. M.; GASPAR, R. O. Soil quality index of an Oxisol under different land uses in the Brazilian savannah. **Geoderma Regional**, 2017. v. 10, p. 183–190.

LEPSCH, I. F. **Manual de levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas-SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo-SP: Universidade Estadual de São Paulo, 2005.

MANUAL DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DO PARANÁ. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Curitiba, PR: SBCS/NEPAR, 2017.

MARIA, I. C. DE; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1999. v. 23, n. 1, p. 703–709.

MAZUCHOWSKI, J. Z.; DERPSCH, R. **Guia de preparo do solo para culturas anuais mecanizadas**. Curitiba, PR: ACARPA, 1984.

MEDEIROS, J. C. *et al.* Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant and Soil**, 2011. v. 338, n. 1, p. 5–15.

MELO, M. S. Análise Sedimentológica dos depósitos da Lagoa Dourada, Vila Velha, Ponta Grossa, PR. Ponta Grossa: UEPG. **Relatório final da Pesquisa**, 1999. p. 74.

MELO FILHO, J. F. De; SOUZA, A. L. V.; SILVA SOUZA, L. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um latossolo amarelo coeso dos tabuleiros costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 2007. v. 31, n. 6, p. 1599–1608.

MIELNICZUK, J. . *et al.* Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de

carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N. . *et al.* (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. v. 3 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, p. 209–248.

MILLAN, E. R. *et al.* Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2014. v. 18, n. 10, p. 1003–1009.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 2002. v. 45, n. 3, p. 251–256.

MONDARDO, A. . *et al.* **Erosão no Estado do Paraná, Fundamentos, estudos experimentais e desafios**. Londrina: IAPAR, 2016.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of soil quality index using three methods. **PLOS ONE**, 2014. v. 9, n. 8.

NESS, B. *et al.* Categorising tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**, 2007. v. 60, n. 3, p. 498–508.

PARANÁ, Á. INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioDiasChuva.do?action=carregarInterfaceInicial>>. Acesso em: 8 maio 2018.

PAVAN, M. A. *et al.* **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agrônomo do paraná, 1992.

PINTO, M. A. B. *et al.* Aplicação de dejetos líquidos de suínos e manejo do solo na sucessão aveia/milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 2014. v. 44, n. 2, p. 205–212.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo-SP: Nobel, 2002.

RAIESI, F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. **Ecological Indicators**, 2017. v. 75, p. 307–320.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba, SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 2011.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. . Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by anion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 1986. v. 17, p. 547–566.

RAMOS, M.; DEDECEK, R. Efeitos de sistemas de preparo do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 1979. v. 14, n. 2, p. 149–153.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo-SP: Manole, 1987.

_____; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2º ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e

sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, 2003. v. 27, p. 29–48.

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**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 49–134.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. **Sistema Plantio Direto**. Brasília: Embrapa SPI, 1998.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistema de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). Campinas: **Revista brasileira de ciência do solo**, 1995. v. 19, n. 2, p. 313–319.

SCHWARTZ, R. C.; EVETT, S. R.; UNGER, P. W. Soil hydraulic properties of cropland compared with reestablished and native grassland. **Geoderma**, 2003. v. 116, p. 47–60.

SILVA, F. R. Da *et al.* Physical properties of a Hapludox after three decades under different soil management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2016. v. 40, p. 1–14.

SILVA, M. A. S. Da *et al.* Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, 2005. v. 35, n. 3, p. 544–552.

STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2013. v. 17, n. 12, p. 1301–1309.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre-RS: Artmed, 2013.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. D. C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic Red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2010. v. 34, n. 3, p. 925–933.

TORMENA, C. A. *et al.* Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, 2002. v. 59, p. 795–801.

VALLE, S. R.; CARRASCO, J. Soil quality indicator selection in Chilean volcanic soils formed under temperate and humid conditions. **Catena**, 2018. v. 162, p. 386–395.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2009. v. 33, n. 4, p. 743–755.

WYMORE, A. W. Model-based systems engineering: An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design. **Boca Raton, CRC Press**, 1993.

YU, P. *et al.* Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. **Science of the Total Environment**, 2018. v. 616–617, p. 564–571.

ZUBER, S. M. *et al.* Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. **Soil and Tillage Research**, 2017. v. 174, p. 147–155.

8 ANEXO

Anexo 01: Análise descritiva dos dados da camada de 0-10 cm e 10-20 cm.

(continua)

	Tratamento	Camada (cm)	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Assimetria	Curtose	Valor w	Valor p*
Densidade (g cm⁻³)	PD	0 a 10	1,03	1,03	1,13	0,93	0,05	4,86	-0,01	-0,67	0,9758	0,3937
	PM	0 a 10	1,02	1,02	1,17	0,81	0,08	7,48	-0,39	-0,15	0,9653	0,1486
	PC	0 a 10	1,02	1,02	1,20	0,87	0,07	6,46	-0,03	0,49	0,9846	0,7564
	VS	0 a 10	0,85	0,85	0,97	0,72	0,05	6,19	-0,13	0,30	0,9862	0,8246
Porosidade total (%)	PD	0 a 10	62,25	62,49	68,40	54,71	2,35	3,78	-0,32	1,65	0,9736	0,3234
	PM	0 a 10	62,39	63,03	68,83	57,31	2,63	4,22	0,11	-0,55	0,9772	0,4415
	PC	0 a 10	62,77	62,81	69,21	58,36	2,33	3,71	0,25	0,22	0,9825	0,6614
	VS	0 a 10	70,95	70,93	74,39	64,94	2,08	2,93	-0,36	0,06	0,9759	0,3969
Macroporosidade (%)	PD	0 a 10	11,15	10,06	20,92	4,00	3,87	34,69	0,77	0,07	0,9437	0,019
	PM	0 a 10	17,72	16,83	33,31	8,35	5,38	30,37	0,63	0,04	0,9605	0,0938
	PC	0 a 10	20,85	20,84	32,47	11,57	4,96	23,81	0,20	-0,50	0,9699	0,2288
	VS	0 a 10	22,01	22,06	27,68	16,98	2,59	11,78	-0,01	-0,62	0,9866	0,8382
Microporosidade (%)	PD	0 a 10	51,10	51,73	56,24	41,52	3,74	7,33	-0,90	0,15	0,9217	0,0027
	PM	0 a 10	44,67	45,43	50,75	35,52	3,10	6,95	-0,68	0,38	0,9593	0,0832
	PC	0 a 10	41,92	41,99	47,35	36,74	2,90	6,91	0,01	-0,80	0,9692	0,2156
	VS	0 a 10	48,94	49,08	53,08	42,13	2,32	4,73	-0,58	0,44	0,9736	0,3247
Condutividade hidráulica saturada (cm/hora)	PD	0 a 10	1,29	1,09	4,89	0,25	0,87	67,76	2,05	5,65	0,8210	<0,0001
	PM	0 a 10	3,71	3,10	9,75	0,68	2,31	62,19	1,09	0,33	0,8723	<0,0001
	PC	0 a 10	6,47	5,68	15,06	0,50	3,48	53,82	0,64	-0,27	0,9488	0,0305
	VS	0 a 10	3,26	2,70	21,48	0,36	3,20	98,15	3,98	21,38	0,6325	<0,0001

(continua)												
Resistência do solo a penetração (Mpa)	PD	0 a 10	1,43	1,39	2,55	0,48	0,57	39,85	0,15	-0,95	0,9663	0,1636
	PM	0 a 10	0,62	0,49	2,05	0,17	0,37	59,79	1,86	4,08	0,8159	<0,0001
	PC	0 a 10	0,60	0,52	1,51	0,23	0,28	46,88	1,22	1,46	0,9010	0,0005
	VS	0 a 10	1,30	1,27	2,28	0,46	0,39	29,80	0,43	0,43	0,9713	0,2627
Umidade Gravimétrica (g g ⁻¹)	PD	0 a 10	0,24	0,24	0,39	0,16	0,05	20,67	1,00	1,24	0,9376	0,0109
	PM	0 a 10	0,21	0,20	0,31	0,13	0,04	19,34	0,49	0,17	0,9735	0,3200
	PC	0 a 10	0,21	0,21	0,29	0,15	0,04	17,04	0,23	-0,63	0,9802	0,5606
	VS	0 a 10	0,32	0,31	0,58	0,17	0,08	25,53	1,04	1,77	0,9380	0,0113
pH (H ₂ O)	PD	0 a 10	4,59	4,57	4,94	4,37	0,13	2,93	0,57	-0,16	0,9631	0,1200
	PM	0 a 10	4,82	4,82	5,03	4,54	0,10	2,08	-0,49	0,25	0,9792	0,52
	PC	0 a 10	4,68	4,70	4,88	4,36	0,13	2,68	-0,53	-0,37	0,9578	0,0725
	VS	0 a 10	4,90	4,89	5,24	4,51	0,19	3,85	-0,06	-0,83	0,9792	0,52
pH (KCl)	PD	0 a 10	3,85	3,84	4,00	3,74	0,05	1,43	0,67	0,44	0,9653	0,1495
	PM	0 a 10	4,02	4,04	4,14	3,58	0,08	2,05	-3,28	16,58	0,9770	0,4371
	PC	0 a 10	3,88	3,89	4,00	3,74	0,06	1,64	-0,38	-0,70	0,9678	0,1896
	VS	0 a 10	4,03	4,03	4,30	3,77	0,12	2,98	0,07	-0,46	0,9898	0,9417
pH (CaCl ₂)	PD	0 a 10	3,97	3,96	4,20	3,81	0,08	1,99	0,65	0,85	0,9661	0,1605
	PM	0 a 10	4,21	4,22	4,35	4,00	0,08	1,90	-0,50	-0,08	0,9727	0,2994
	PC	0 a 10	4,12	4,14	4,26	3,94	0,09	2,08	-0,40	-0,75	0,9559	0,0601
	VS	0 a 10	4,00	4,00	4,30	3,64	0,15	3,64	-0,16	-0,42	0,9901	0,9503
Al (cmolc dm ⁻³)	PD	0 a 10	1,38	1,37	2,01	0,72	0,32	23,24	-0,06	-0,42	0,9821	0,6434
	PM	0 a 10	0,78	0,71	1,40	0,35	0,24	30,48	0,84	0,17	0,9342	0,008
	PC	0 a 10	1,05	0,95	1,86	0,52	0,32	30,22	0,80	-0,01	0,9340	0,0079
	VS	0 a 10	1,99	1,71	4,70	0,54	1,01	50,77	0,67	-0,32	0,9406	0,0142

(continua)												
Ca (cmolc dm ⁻³)	PD	0 a 10	2,28	2,17	3,81	1,30	0,55	24,30	0,70	0,26	0,9635	0,1252
	PM	0 a 10	3,35	3,33	4,73	1,75	0,88	26,21	-0,08	-1,19	0,9553	0,056
	PC	0 a 10	2,04	2,17	3,11	0,92	0,52	25,66	-0,42	-0,32	0,9572	0,0684
	VS	0 a 10	3,49	3,24	7,62	1,22	1,59	45,49	0,65	-0,27	0,9491	0,0316
Mg (cmolc dm ⁻³)	PD	0 a 10	1,81	1,88	2,46	1,13	0,34	18,75	-0,26	-0,78	0,9703	0,2382
	PM	0 a 10	3,75	3,74	4,97	1,39	0,73	19,32	-0,56	0,90	0,9659	0,158
	PC	0 a 10	1,40	1,43	2,09	0,41	0,33	23,84	-0,36	0,48	0,9849	0,7683
	VS	0 a 10	6,34	6,46	8,85	3,62	1,19	18,78	-0,19	-0,17	0,9870	0,8566
Relação Ca/Mg	PD	0 a 10	1,31	1,21	2,68	0,67	0,45	34,22	1,14	1,47	0,9151	0,0016
	PM	0 a 10	0,95	0,91	2,17	0,38	0,37	38,86	0,89	1,15	0,9477	0,0276
	PC	0 a 10	1,52	1,46	3,01	0,62	0,50	33,12	1,01	1,09	0,9352	0,0088
	VS	0 a 10	0,60	0,49	1,61	0,17	0,37	61,39	1,17	0,59	0,8717	<0,0001
P (mg dm ⁻³)	PD	0 a 10	1,32	1,14	5,60	0,26	0,81	61,44	3,27	15,62	0,7150	<0,0001
	PM	0 a 10	0,82	0,76	2,35	0,00	0,63	76,22	0,56	-0,39	0,9428	0,0176
	PC	0 a 10	0,43	0,36	1,36	0,02	0,29	68,44	1,09	1,11	0,9121	0,0012
	VS	0 a 10	0,13	0,07	0,61	0,01	0,16	125,14	1,84	2,32	0,7017	<0,0001
K (cmolc dm ⁻³)	PD	0 a 10	0,32	0,29	0,59	0,18	0,08	26,18	1,26	1,50	0,8873	0,0002
	PM	0 a 10	0,34	0,33	0,62	0,18	0,10	29,20	0,84	0,75	0,9496	0,0329
	PC	0 a 10	0,29	0,28	0,59	0,15	0,09	32,31	0,86	0,74	0,9438	0,0191
	VS	0 a 10	0,40	0,40	0,61	0,22	0,09	23,90	0,19	-0,72	0,9806	0,5778
COT (g dm ⁻³)	PD	0 a 10	30,19	30,43	33,08	26,81	1,56	5,18	-0,43	-0,37	0,9711	0,258
	PM	0 a 10	29,27	29,54	35,47	20,06	3,39	11,59	-0,71	0,42	0,9606	0,095
	PC	0 a 10	29,24	29,22	34,01	22,04	2,16	7,38	-0,57	1,51	0,9632	0,1216
	VS	0 a 10	36,40	37,05	39,05	30,47	2,39	6,57	-1,21	0,43	0,9565	0,0639

(continua)												
CTC (cmolc dm ⁻³)	PD	0 a 10	19,20	19,31	20,38	17,42	0,67	3,48	-0,74	0,35	0,9547	0,0535
	PM	0 a 10	20,57	20,52	23,12	18,29	1,13	5,48	0,20	-0,54	0,9838	0,7207
	PC	0 a 10	17,43	17,38	19,17	15,93	0,67	3,83	0,20	-0,08	0,9859	0,8129
	VS	0 a 10	17,96	17,68	23,86	15,78	1,54	8,56	1,52	3,55	0,9606	0,0945
V (%)	PD	0 a 10	22,95	22,59	30,10	17,98	2,99	13,03	0,60	-0,25	0,9594	0,0846
	PM	0 a 10	36,03	36,13	43,97	25,86	3,62	10,06	-0,22	0,48	0,9859	0,8118
	PC	0 a 10	21,46	22,16	28,55	11,09	4,05	18,88	-0,76	0,21	0,9470	0,0258
	VS	0 a 10	56,80	56,23	68,76	45,49	5,73	10,08	-0,03	-0,47	0,9811	0,6006
M (%)	PD	0 a 10	7,21	7,16	10,19	3,73	1,67	23,10	-0,18	-0,60	0,9771	0,439
	PM	0 a 10	3,82	3,43	6,96	1,77	1,24	32,37	0,78	-0,03	0,9382	0,0115
	PC	0 a 10	6,01	5,58	9,70	3,08	1,69	28,19	0,66	-0,32	0,9343	0,0081
	VS	0 a 10	11,23	9,79	25,26	2,92	5,88	52,32	0,64	-0,51	0,9387	0,012
Densidade (g cm ⁻³)	PD	10 a 20	1,05	1,05	1,13	0,87	0,05	4,92	-1,22	2,44	0,9221	0,0028
	PM	10 a 20	1,07	1,07	1,16	0,94	0,05	4,99	-0,40	0,01	0,9697	0,2269
	PC	10 a 20	1,08	1,09	1,23	0,88	0,09	7,90	-0,44	-0,43	0,9705	0,2434
	VS	10 a 20	0,91	0,90	1,14	0,73	0,07	7,27	0,52	2,76	0,9545	0,0528
Porosidade total (%)	PD	10 a 20	60,42	60,00	68,86	56,49	2,47	4,10	1,10	1,34	0,9103	0,0011
	PM	10 a 20	59,09	59,02	63,90	53,70	2,20	3,72	-0,03	-0,14	0,9925	0,9871
	PC	10 a 20	62,62	61,55	90,66	57,82	5,15	8,22	3,49	17,50	0,6828	<0,0001
	VS	10 a 20	67,02	67,02	71,55	58,56	2,57	3,83	-0,57	0,88	0,9661	0,1599
Macroporosidade (%)	PD	10 a 20	14,76	14,17	29,82	8,96	3,55	24,07	1,62	5,32	0,8962	0,0004
	PM	10 a 20	12,93	12,33	23,06	6,69	3,41	26,37	0,59	0,73	0,9708	0,2514
	PC	10 a 20	17,71	15,77	33,31	10,83	6,02	33,97	0,95	0,05	0,8918	0,0003
	VS	10 a 20	19,46	19,04	28,53	11,98	4,04	20,77	0,43	-0,38	0,9711	0,2565

(continua)												
Microporosidade (%)	PD	10 a 20	45,65	45,62	49,60	39,04	1,89	4,13	-0,48	1,96	0,9613	0,1013
	PM	10 a 20	46,16	46,38	50,82	40,85	1,95	4,22	-0,23	1,40	0,9516	0,0398
	PC	10 a 20	44,91	45,41	77,13	36,46	5,54	12,34	3,93	23,58	0,6264	<0,0001
	VS	10 a 20	47,56	47,36	52,92	41,42	2,70	5,69	-0,27	-0,49	0,9779	0,4688
Resistência do solo a penetração (Mpa)	PD	10 a 20	2,32	2,28	3,44	1,64	0,37	15,95	0,96	1,35	0,9448	0,0210
	PM	10 a 20	1,84	1,66	3,67	0,65	0,58	31,44	0,97	1,18	0,9292	0,0052
	PC	10 a 20	1,32	1,25	2,93	0,42	0,60	45,68	0,73	0,25	0,9458	0,0234
	VS	10 a 20	2,32	2,29	3,74	1,17	0,56	24,00	0,29	-0,14	0,9870	0,8533
Umidade Gravimétrica (g g ⁻¹)	PD	10 a 20	0,34	0,35	0,43	0,25	0,04	11,72	-0,12	-0,09	0,9933	0,9936
	PM	10 a 20	0,34	0,34	0,44	0,25	0,04	12,85	0,34	-0,12	0,9701	0,2353
	PC	10 a 20	0,28	0,28	0,39	0,18	0,05	18,52	0,18	-0,58	0,9859	0,8100
	VS	10 a 20	0,30	0,29	0,39	0,20	0,04	14,55	0,06	-0,45	0,9887	0,9129
pH (H ₂ O)	PD	10 a 20	4,74	4,74	5,17	4,42	0,16	3,44	0,30	-0,10	0,9840	0,7317
	PM	10 a 20	4,88	4,87	5,12	4,56	0,13	2,65	0,03	0,02	0,9690	0,2121
	PC	10 a 20	4,77	4,78	5,12	4,29	0,17	3,58	-0,31	0,40	0,9884	0,9047
	VS	10 a 20	4,56	4,57	4,73	4,30	0,09	1,91	-0,72	0,83	0,9621	0,109
pH (KCl)	PD	10 a 20	3,94	3,93	4,23	3,78	0,11	2,70	0,57	-0,12	0,9629	0,1185
	PM	10 a 20	4,11	4,10	4,32	3,94	0,09	2,17	0,54	-0,16	0,9624	0,1128
	PC	10 a 20	3,94	3,93	4,20	3,74	0,11	2,76	0,36	-0,25	0,9787	0,5004
	VS	10 a 20	4,01	4,00	4,22	3,95	0,05	1,24	2,15	5,97	0,9577	0,0719
pH (CaCl ₂)	PD	10 a 20	4,07	4,06	4,36	3,88	0,11	2,77	0,49	-0,29	0,9671	0,1775
	PM	10 a 20	4,39	4,36	4,67	4,13	0,12	2,83	0,48	-0,26	0,9604	0,0925
	PC	10 a 20	4,18	4,19	4,48	3,89	0,13	3,17	0,07	-0,47	0,9852	0,7843
	VS	10 a 20	3,92	3,92	4,03	3,83	0,04	0,93	0,23	0,82	0,9807	0,5829

(continua)												
Al (cmolc dm ⁻³)	PD	10 a 20	1,18	1,15	1,99	0,26	0,42	35,40	-0,05	-0,76	0,9768	0,4264
	PM	10 a 20	0,60	0,60	1,28	0,15	0,26	42,72	0,17	-0,26	0,9783	0,4837
	PC	10 a 20	0,95	0,87	2,10	0,34	0,41	43,06	0,78	-0,08	0,9319	0,0066
	VS	10 a 20	2,84	2,86	3,81	1,64	0,46	16,14	-0,004	0,16	0,9871	0,8583
Ca (cmolc dm ⁻³)	PD	10 a 20	2,01	1,87	4,20	0,85	0,73	36,51	0,79	0,49	0,9514	0,039
	PM	10 a 20	3,42	3,52	5,45	1,73	0,95	27,68	0,12	-0,79	0,9728	0,302
	PC	10 a 20	2,22	2,33	3,73	1,06	0,65	29,24	-0,07	-0,68	0,9703	0,2397
	VS	10 a 20	0,81	0,48	3,39	0,14	0,73	89,74	1,64	2,78	0,7986	<0,0001
Mg (cmolc dm ⁻³)	PD	10 a 20	1,37	1,27	2,38	0,72	0,40	28,98	0,68	-0,10	0,9496	0,0329
	PM	10 a 20	3,06	3,13	4,67	0,70	0,76	24,93	-0,52	0,90	0,9761	0,4028
	PC	10 a 20	1,44	1,52	2,03	0,88	0,30	21,11	-0,16	-0,97	0,9508	0,0368
	VS	10 a 20	4,88	4,88	6,76	2,30	0,86	17,67	-0,76	1,75	0,9483	0,0293
Relação Ca/Mg	PD	10 a 20	1,54	1,37	3,78	0,60	0,60	38,95	1,37	3,07	0,9066	0,0008
	PM	10 a 20	1,24	1,11	3,26	0,43	0,60	48,48	1,45	2,33	0,8758	<0,0001
	PC	10 a 20	1,63	1,62	3,81	0,67	0,67	41,22	0,86	0,92	0,9406	0,0142
	VS	10 a 20	0,17	0,08	0,60	0,03	0,15	86,84	1,24	0,76	0,8181	<0,0001
P (mg dm ⁻³)	PD	10 a 20	0,17	0,09	1,02	0,00	0,22	126,99	2,11	4,54	0,7329	<0,0001
	PM	10 a 20	0,49	0,31	3,22	0,00	0,61	124,92	2,56	8,02	0,7158	<0,0001
	PC	10 a 20	0,18	0,09	1,05	0,01	0,21	118,35	2,30	6,04	0,7306	<0,0001
	VS	10 a 20	0,04	0,03	0,22	0,01	0,04	92,84	2,44	9,18	0,7677	<0,0001
K (cmolc dm ⁻³)	PD	10 a 20	0,18	0,18	0,35	0,08	0,06	34,98	0,53	-0,43	0,9574	0,0698
	PM	10 a 20	0,19	0,19	0,34	0,07	0,06	34,30	0,30	-0,26	0,9788	0,5039
	PC	10 a 20	0,20	0,17	0,44	0,11	0,07	35,59	1,33	2,13	0,8928	0,0003
	VS	10 a 20	0,20	0,20	0,30	0,10	0,05	25,70	0,18	-0,67	0,9730	0,3068

(conclusão)												
COT (g dm ⁻³)	PD	10 a 20	30,18	33,01	36,70	20,44	5,51	18,24	-0,53	-1,48	0,8243	<0,0001
	PM	10 a 20	23,05	23,14	29,53	17,32	2,56	11,12	0,07	-0,44	0,9751	0,3686
	PC	10 a 20	24,22	24,17	30,25	18,16	2,76	11,40	0,005	-0,43	0,9904	0,956
	VS	10 a 20	26,97	26,98	35,21	17,94	3,74	13,88	0,12	-0,27	0,9884	0,9035
CTC (cmolc dm ⁻³)	PD	10 a 20	17,08	17,00	18,61	15,49	0,75	4,40	0,11	-0,81	0,9734	0,3179
	PM	10 a 20	19,10	19,63	21,53	14,74	1,64	8,59	-0,80	-0,01	0,9355	0,009
	PC	10 a 20	16,84	16,88	19,24	15,12	0,87	5,18	0,32	0,26	0,9849	0,7685
	VS	10 a 20	12,79	12,81	15,97	9,35	1,21	9,45	-0,31	1,74	0,9556	0,0584
V (%)	PD	10 a 20	20,90	19,59	34,99	12,25	5,60	26,80	0,68	-0,18	0,9479	0,0281
	PM	10 a 20	34,78	35,62	43,02	20,11	4,28	12,30	-0,67	1,41	0,9649	0,1428
	PC	10 a 20	22,99	23,14	31,68	15,06	4,34	18,89	0,08	-0,85	0,9733	0,3159
	VS	10 a 20	45,72	46,03	59,59	28,53	5,93	12,98	-0,40	1,13	0,9746	0,3524
M (%)	PD	10 a 20	6,88	6,72	11,35	1,68	2,33	33,91	-0,14	-0,74	0,9752	0,3741
	PM	10 a 20	3,13	3,11	6,53	0,79	1,30	41,60	0,21	-0,19	0,9812	0,6041
	PC	10 a 20	5,57	5,11	10,91	2,17	2,16	38,80	0,64	-0,45	0,9428	0,0175
	VS	10 a 20	22,43	22,34	33,77	12,39	4,36	19,44	0,11	0,36	0,9869	0,8496

* Valor-p obtido pelo teste de normalidade Shapiro-Wilk ($p < 0,05$).