

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

**ISABELA MALAQUIAS DALTO DE SOUZA**

**METODOLOGIAS DE RECOMENDAÇÃO DE USO DE GESSO AGRÍCOLA EM  
DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

Ilha Solteira

2022

## **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ISABELA MALAQUIAS DALTO DE SOUZA**

### **METODOLOGIAS DE RECOMENDAÇÃO DE USO DE GESSO AGRÍCOLA EM DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor. Especialidade Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Marcelo Andreotti

**Orientador**

Pesquisador Dr. Wander Luis Barbosa Borges

**Coorientador**

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729m Souza, Isabela Malaquias Dalto de.  
Metodologias de recomendação de uso de gesso agrícola em diferentes sistemas de produção / Isabela Malaquias Dalto de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022

160 f. : il.

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

Orientador: Marcelo Andreotti

Coorientador: Wander Luis Barbosa Borges

Inclui bibliografia

1. Análise multivariada. 2. Fertilidade do solo. 3. Gessassem. 4. Pastagem. 5. Sistema agropastoril. 6. Sistema semeadura direta.

  
Raiane da Silva Santos

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

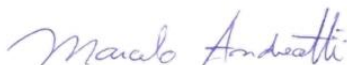
TÍTULO DA TESE: Metodologias de recomendação de uso de gesso agrícola em diferentes sistemas de produção

**AUTORA: ISABELA MALAQUIAS DALTO DE SOUZA**

**ORIENTADOR: MARCELO ANDREOTTI**

**COORIENTADOR: WANDER LUÍS BARBOSA BORGES**

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



Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual)  
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)  
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)  
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena - UNESP

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL (Participação Virtual)  
Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participação Virtual)  
Faculdade de Engenharia Agrícola / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ilha Solteira, 18 de março de 2022

## **DEDICO**

À minha avó, Vanda Aparecida Malaquias (in memoriam), pelo amor, carinho, atenção e educação dados durante toda a vida e por me guiar e proteger, sempre.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha tia, Fernanda Malaquias Mourão, pelo carinho, suporte, apoio, torcida e incentivo durante toda caminhada até aqui.

Ao meu pai, Marco Antônio Dalto de Souza, e avó, Maria Vanilda Dalto de Souza, pelo apoio, torcida e suporte oferecidos.

Aos meus amigos Danielle Bolandim Costa que esteve comigo nos melhores e piores momentos desses quatro últimos anos, Pedro H. Gatto Juliano e Deyvison Asevedo Soares pelo auxílio no desenvolvimento de algumas partes desse trabalho.

Ao pesquisador Dr. Wander Luis Barbosa Borges Pela disponibilidade e disposição em me ensinar e auxiliar em meu crescimento profissional. Sempre foi um grande exemplo como pessoa e profissional.

Ao Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Seringueira e Sistemas Agroflorestais, do Instituto Agronômico de Campinas - IAC, da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA/SAA-SP por possibilitar a execução deste trabalho.

Aos funcionários e estagiários do Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Seringueira e Sistemas Agroflorestais por todo auxílio prestado no decorrer do experimento.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Agronomia de Ilha Solteira e aos técnicos Carlos e Silvia do Laboratório de Fertilidade do Solo e Marcelo do Laboratório de Nutrição de Plantas.

Aos colaboradores da Seção Técnica de Pós-Graduação, da Biblioteca, da Seção Técnica de Apoio, Ensino, Pesquisa e Extensão e do Gabinete do Diretor, por toda ajuda no decorrer destes anos.

Aos integrantes do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos – DEFERS e aos integrantes da Equipe Andreotti, pelo convívio e apoio.

Ao professor Dr. Antonio Paz-Gonzalez por me receber durante o período de estágio na Universidade da Coruña.

À todos os amigos e familiares pelo incentivo e torcida pelas minhas conquistas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudos e por todo apoio financeiro concedido (Processo nº 2018/07979-6 e Processo BEPE nº 2020/03951-0) para a realização deste estudo. Este apoio fez toda diferença

para o resultado final do trabalho e também para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, prof. Dr. Marcelo Andreotti por, além de ser um grande professor, ser também um excelente orientador, que encoraja, dá voz e espaço, respeita e ensina seus orientados diariamente. Você é um espelho para as novas gerações que, assim como eu, sonham com um ensino de qualidade para todos.

É preciso força pra sonhar e perceber  
Que a estrada vai além do que se vê  
Marcelo Camelo



## RESUMO

O uso de gesso agrícola em sistemas conservacionistas de produção como os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs), ainda gera dúvidas em relação a metodologia a ser utilizada. O presente trabalho teve por objetivo avaliar qual dentre as cinco metodologias de recomendação de uso de gesso agrícola em diferentes sistemas sustentáveis de produção agropecuária é o mais eficiente em relação a movimentação do gesso no perfil do solo e correlacionar com a produtividade agrícola de um solo arenoso. Foram utilizadas as metodologias de Sousa, Lobato e Rein (2005), Vitti *et al.* (2008), Demattê (1986), Rajj *et al.* (1996) e Caires e Guimarães (2016), em três sistemas sustentáveis de produção agropecuária: sistema de semeadura direta (SSD), sistema agropastoril (SAP) e pastagem convencional (PAST). Foram realizadas avaliações dos atributos químicos nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40m, em outubro no ano de 2017 e abril de 2018, 2019 e 2020, e dos atributos físicos nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,20 e 0,20-0,40m em outubro de 2017 e abril de 2020, e avaliações das características agronômicas da cultura do milho e da soja, bem como da produtividade de matéria seca da pastagem e da crotalária. As metodologias de Rajj *et al.* (1996), Sousa, Lobato e Rein (2005) e de Caires e Guimarães (2016) foram utilizadas em um projeto paralelo. Para tal, em abril de 2020 foram coletadas amostras de solo na camada de 0-0,10m, nos três sistemas sustentáveis de produção agropecuária, e realizou-se as seguintes avaliações: superfície específica (SE), granulometria a laser (GL), espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análise elementar. Buscou-se com essa pesquisa atribuir qual das metodologias de recomendação de uso de gesso agrícola é a mais adequada para os sistemas de produção estudados e avaliar qual dentre as metodologias proporciona melhores condições para a textura do solo arenoso na região do Cerrado. Em sistema de semeadura direta (SSD), pelo uso intensivo do solo arenoso e alta exportação de nutrientes, visando a melhoria da fertilidade e agregação do solo, recomenda-se a gessagem com base nas metodologias de Caires e Guimarães (2016) ou de Rajj *et al.* (1996), entretanto, com variabilidade das metodologias quanto à correlação com a produtividade das culturas em rotação. No sistema agropastoril (SAP), pelo maior tempo de pastagem no sistema, não houve uma metodologia que se destacasse quanto a melhoria da fertilidade do solo, contudo na agregação houve destaque para a metodologia de Rajj *et al.* (1996). Entretanto, independentemente da metodologia, a aplicação de gesso foi superior ao

controle sem gessagem, na melhoria física e química do solo. Apenas a metodologia de Vitti *et al.* (2008), destacou-se para incremento da produção de matéria seca do capim Marandu e da soja em sucessão. Em área de pastagem intensiva (PAST), mas em solo arenoso, destacou-se a metodologia de Raij *et al.* (1996) na recomendação de gessagem anual, visando a melhoria e/ou manutenção da fertilidade do solo. Entretanto, na produtividade de matéria seca do capim Marandu, a metodologia de melhor correlação foi a de Souza, Lobato e Rein (2005). Pelo uso da análise multivariada, em SSD, as metodologias de cálculo da necessidade de gessagem de Caires e Guimarães (2016) ou de Raij *et al.* (1996) melhor se correlacionaram com a V% (atributo de melhor correlação da fertilidade do solo). Para o sistema agropastoril (SAP), na análise multivariada, as metodologias de cálculo da necessidade de gessagem que melhor se correlacionaram com redução da acidez e aumento do pH do solo foram as de Souza, Lobato e Rein (2005) e de Raij *et al.* (1996). Numa pastagem de capim Marandu em solo arenoso, pela análise multivariada, a metodologia de cálculo da necessidade de gessagem de Raij *et al.* (1996) apresentou maior correlação com a V%. Nas análises das características do solo em diferentes sistemas de produção depois do uso do gesso agrícola, não houve efeito da gessagem para C, N e relação C/N, e nem para a granulometria do solo. Entretanto, para incremento dos teores de C e N destaca-se o sistema de semeadura direta (SSD), e para melhoria de agregação, a pastagem perene (PAST).

**Palavras-chave:** análise multivariada; fertilidade do solo; gessagem; pastagem; sistema agropastoril; sistema semeadura direta.

## ABSTRACT

The use of gypsum in conservation production systems as croplivestock systems, still generates doubts about the methodology to be used. The present work aimed to evaluate which among the five methodologies of gypsum use recommendation in different sustainable agricultural production systems is the most efficient regarding the movement of gypsum in the soil profile and correlate it with the agricultural productivity of a sandy soil. The methodologies of Sousa, Lobato and Rein (2005), Vitti *et al.* (2008), Demattê (1986), Raij *et al.* (1996) and Caires and Guimarães (2016) were used, in three sustainable agricultural production systems: no-tillage system (SSD), agro-pastoral system (SAP) and conventional pasture (PAST). Evaluations of chemical attributes in the layers 0-0.20 and 0.20-0.40m were carried out in October in the year 2017 and April 2018, 2019 and 2020, and of physical attributes in the layers 0-0.05, 0.05-0.20 and 0.20-0.40m in October 2017 and April 2020, and evaluations of agronomic characteristics of corn and soybean crops, as well as dry matter productivity of pasture and crotalaria. The methodologies of Raij *et al.* (1996), Sousa, Lobato and Rein (2005) and Caires and Guimarães (2016) were used in a parallel project. For this, in April 2020, soil samples were collected in the 0-0.10m layer, in the three sustainable agricultural production systems, and the following evaluations were performed: specific surface area (SE), laser grain size (GL), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and elemental analysis. This research aimed to attribute which of the gypsum recommendation methodologies is the most appropriate for the production systems studied and evaluate which of the methodologies provides better conditions for sandy soil texture in the Cerrado region. In no-tillage system (SSD), by the intensive use of sandy soil and high export of nutrients, aiming to improve soil fertility and aggregation, gypsum is recommended based on the methodologies of Caires and Guimarães (2016) or of Raij *et al.* (1996), however, with variability of methodologies regarding the correlation with the productivity of crops in rotation. In the agro-pastoral system (SAP), due to the longer time of pasture in the system, there was no methodology that stood out regarding the improvement of soil fertility, however in aggregation there was an emphasis on the methodology of Raij *et al.* (1996). However, regardless of the methodology, the application of gypsum was superior to the control without gypsum, in physical and chemical soil improvement. Only the methodology of Vitti *et al.* (2008), stood out for increasing the dry matter production of Marandu grass and soybean in

succession. In an area of intensive pasture (PAST), but on sandy soil, the methodology of Raij *et al.* (1996) stood out in the recommendation of annual gypsum, aiming to improve and/or maintain soil fertility. However, for the dry matter productivity of Marandu grass, the methodology with the best correlation was that of Souza, Lobato and Rein (2005). By the use of multivariate analysis, in SSD, the methodologies for calculating the gypsum requirement of Caires and Guimarães (2016) or of Raij *et al.* (1996) best correlated with V% (best correlated attribute of soil fertility). For the agropastoral system (SAP), in the multivariate analysis, the methodologies for calculating the need for gypsum that best correlated with reduced soil acidity and increased soil pH were those of Souza, Lobato and Rein (2005) and Raij *et al.* (1996). In a pasture of Marandu grass on sandy soil, by multivariate analysis, the methodology for calculating the need for gypsum by Raij *et al.* (1996) showed greater correlation with V%. In the analysis of soil characteristics in different production systems after the use of gypsum, there was no effect of gypsum for C, N and C/N ratio, nor for soil granulometry. However, the no-tillage system (SSD) stands out for increasing C and N contents, and for improving aggregation, the perennial pasture (PAST).

**Keywords:** multivariate analysis; soil fertility; plaster; pasture; agroforestry system; no-tillage system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Dados de evapotranspiração potencial (ETP), precipitação pluvial e temperatura média mensal em Votuporanga- SP, durante o desenvolvimento do experimento. Fonte: CIIAGRO (2021) .....	33
Figura 2-	Disposição dos tratamentos nas áreas experimentais .....	38
Figura 3-	Alterações nos teores de Ca e Mg nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSP) .....	47
Figura 4-	Alterações nos teores de K e S nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD) .....	50
Figura 5-	Alterações nos teores de MO e P nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD) .....	53
Figura 6-	Alterações no pH e H+Al nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD) .....	55
Figura 7-	Alterações no m%, CTC e V% nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD) .....	58
Figura 8-	Alterações nos teores de Ca e Mg nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP) .....	67
Figura 9-	Alterações nos teores de K e S nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP) .....	70
Figura 10-	Alterações nos teores de MO e P nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP) .....	72
Figura 11-	Alterações no pH e H+Al nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP) .....	75
Figura 12 -	Alterações no m%, CTC e V% nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP) .....	77
Figura 13-	Alterações nos teores de Ca e Mg nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST) .....	85
Figura 14-	Alterações nos teores de K e S nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST) .....	87
Figura 15-	Alterações nos teores de MO e P nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a	

	0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST) .....	90
Figura 16-	Alterações no pH e H+Al nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST) .....	92
Figura 17-	Alterações nos valores de m%, CTC e V%, nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST) .....	94
Figura 18-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho na safra 2017/18 em sistema de semeadura direta (SSD) .....	102
Figura 19-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD) .....	103
Figura 20-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD) .....	106
Figura 21-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho na safra 2017/18 em sistema agropastoril (SAP) .	109
Figura 22-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20m e 0,20 a 0,40 m e produtividade da soja na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP) .....	111
Figura 23-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade da soja na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP) .....	114
Figura 24-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem na safra 2017/18 em pastagem convencional (PAST) .....	117
Figura 25-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST) .....	119
Figura 26-	Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST) .....	121
Figura 27-	Bandas usadas para analisar grupos funcionais orgânicos segundo Parikh <i>et al.</i> 2014 .....	125
Figura 28-	Semeadura da forragem na entrelinha do milho em área de SSD .....	138
Figura 29-	Desenvolvimento do milho em área de SSD .....	138
Figura 30-	Milho em SSD .....	138

Figura 31-	Produção de palhada de capim Marandu em SSD .....	138
Figura 32-	Desenvolvimento da soja sob palhada de capim Marandu em SAP .....	139
Figura 33-	Desenvolvimento do milho em SAP .....	139
Figura 34-	Pastagem em SAP .....	139
Figura 35-	Pastagem convencional .....	139
Figura 36-	Coleta de amostras de forragem .....	140
Figura 37-	Coleta de amostras deformadas de solo para avaliação da fertilidade .....	140
Figura 38-	Mesa de tensão com anéis volumétricos para análise de porosidade e densidade do solo .....	140
Figura 39-	Amostras de solo após passar por peneira de 4mm para avaliação de estabilidade de agregados .....	140
Figura 40-	Preparo das amostras de solo + KBr para análise espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	141
Figura 41-	Análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .....	141
Figura 42-	Sacos de gesso com doses calculadas de acordo com cada metodologia avaliada .....	142
Figura 43-	Distribuição dos sacos com gesso nas subparcelas de acordo com as metodologias avaliadas .....	142
Figura 44-	Aplicação de gesso em cada subparcela de acordo com as metodologias avaliadas .....	142
Figura 45-	Equipe formada no IAC em dia de aplicação de gesso .....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Tabela 1. Caracterização física e química da área experimental, realizada nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, antes da instalação do experimento, Votuporanga, 2017 .....	33
Tabela 2-	Atributos físicos do solo em área de sistema de semeadura direta (SSD), nas profundidades de 0 a 0,05 m, 0,05 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em função das metodologias de recomendação da gessagem, Votuporanga- SP, safra 2019/20 .....	61
Tabela 3-	Produtividade e características agronômicas das culturas em área de sistema de semeadura direta (SSD) nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 .....	63
Tabela 4-	Atributos físicos do solo em área de sistema agropastoril (SAP), nas profundidades de 0 a 0,5 m, 0,5 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em função das metodologias de recomendação da gessagem, Votuporanga- SP, safra 2019/20 .....	80
Tabela 5-	Produtividade e características agronômicas das culturas em área de sistema agropastoril (SAP), após aplicação de gesso por diferentes metodologias, Votuporanga- SP, nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 .....	82
Tabela 6-	Atributos físicos do solo em área de pastagem convencional (PAST), nas profundidades de 0 a 0,5 m, 0,5 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em função das metodologias de recomendação da gessagem, Votuporanga- SP, safra 2019/20 .....	97
Tabela 7-	Produtividade de matéria seca da forragem em área de pastagem convencional (PAST), após aplicação de gesso por diferentes metodologias, Votuporanga- SP, nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 .....	99
Tabela 8-	Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PROD) na safra 2017/18 em sistema de semeadura direta (SSD) .....	100
Tabela 9-	Análise de componentes principais para atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PRODM) e matéria seca da forragem (PRODF) na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD) .....	102
Tabela 10-	Análise de componentes principais para atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PRODM) e matéria seca da forragem (PRODF) na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD) .....	105
Tabela 11-	Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PROD) na safra 2017/18 em sistema agropastoril (SAP) .....	108



Tabela 12-	Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade de soja (PROD) na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP) .....	110
Tabela 13-	Análise de componentes principais para atributos físicos e químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade de soja (PROD) na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP) .....	112
Tabela 14-	Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem (PROD) na safra 2017/18 em pastagem convencional (PAST) .....	115
Tabela 15-	Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem (PROD) na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST) .....	118
Tabela 16-	Análise de componentes principais para atributos físicos e químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem (PROD) na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST) .....	120
Tabela 17-	Acúmulo de matéria orgânica, carbono (C) e nitrogênio (N) e relação carbono nitrogênio no solo em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem .....	122
Tabela 18-	Acúmulo de matéria orgânica, carbono (C) e nitrogênio (N) e relação carbono nitrogênio no solo em diferentes sistemas de produção .....	123
Tabela 19-	Valores de índice I e índice II em relação aos sistemas de produção .....	124
Tabela 20-	Superfície específica do solo em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem .....	125
Tabela 21-	Superfície específica do solo em diferentes sistemas de produção .....	126
Tabela 22-	Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria do espalhamento de Mie em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem .....	127
Tabela 23-	Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria do espalhamento de Mie em diferentes sistemas de produção .....	128
Tabela 24-	Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria de difração de Fraunhofer em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem .....	128
Tabela 25-	Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria de difração de Fraunhofer em diferentes sistemas de produção .....	129
Tabela 26-	Resumo estatístico da análise multifractal a partir da dimensão generalizada para granulometria seguindo a teoria de Mie e fisissorção nos três sistemas de produção .....	130
Tabela 27-	Parâmetros do espectro de singularidade da granulometria seguindo a teoria de Mie e fisissorção nos três sistemas de produção .....	131

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1	Fertilidade do solo em sistemas de produção na região do Cerrado .....	22
2.2	Atributos físicos do solo em sistemas de produção na região do Cerrado .....	25
2.3	Recomendações de uso de gesso agrícola .....	28
2.4	Uso de gesso agrícola na região do Cerrado .....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
3.1	Localização e características da área experimental .....	32
3.2	Histórico e manejo das áreas .....	34
3.2.1	<i>Sistema de semeadura direta</i> .....	34
3.2.2	<i>Sistema agropastoril</i> .....	36
3.2.3	<i>Pastagem convencional</i> .....	37
3.3	Delineamento experimental e tratamentos .....	37
3.4	Avaliações .....	38
3.4.1	<i>Fertilidade do solo</i> .....	38
3.4.2	<i>Densidade, agregação e porosidade do solo</i> .....	38
3.4.3	<i>Granulometria a laser (GL)- método de difração a laser</i> .....	39
3.4.4	<i>Superfície específica (SE)</i> .....	39
3.4.5	<i>Espectroscopia (FTIR) e dados pré- processados</i> .....	40
3.4.6	<i>Análise elementar de C, N, e relação C/N</i> .....	41
3.4.7	<i>Milho</i> .....	41
3.4.8	<i>Soja</i> .....	42
3.4.9	<i>Crotalária juncea</i> .....	42
3.4.10	<i>Pastagem</i> .....	42
3.5	Análise dos resultados .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
4.1	Sistema de semeadura direta .....	46
4.1.1	<i>Fertilidade do solo</i> .....	46
4.1.2	<i>Física do solo</i> .....	60
4.1.3	<i>Planta</i> .....	62
4.2	Sistema agropastoril .....	65
4.2.1	<i>Fertilidade do solo</i> .....	65
4.2.2	<i>Física do solo</i> .....	79
4.2.3	<i>Planta</i> .....	81
4.3	Pastagem convencional .....	83
4.3.1	<i>Fertilidade do solo</i> .....	83
4.3.2	<i>Física do solo</i> .....	96
4.3.3	<i>Planta</i> .....	98
4.4	Multivariada .....	99
4.4.1	<i>Sistema de semeadura direta</i> .....	100

4.4.2	<i>Sistema agropastoril</i> .....	107
4.4.3	<i>Pastagem convencional</i> .....	114
4.5	Características do solo em diferentes sistemas de produção depois do uso do gesso agrícola (BEPE- La Coruña- Espanha) .....	121
4.5.1	<i>Matéria orgânica, C, N e relação C/N</i> .....	121
4.5.2	<i>Espectroscopia FTIR e dados pré-processados</i> .....	124
4.5.3	<i>Superfície específica (SE)</i> .....	125
4.5.4	<i>Granulometria a laser</i> .....	127
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	133
<b>6</b>	<b>APÊNDICE</b> .....	134
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	143

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade agrícola moderna passou a ser caracterizada por sistemas de produção padronizados e simplificados de monocultura devido ao aumento da demanda por alimentos e a evolução tecnológica na produção, mas, por efeito da elevada demanda por energia e recursos naturais que caracterizam esse sistema, as áreas têm apresentado sinais de saturação (BALBINO *et al.*, 2011) e degradação física, química e/ou biológica do solo e, além disso, áreas com textura arenosa apresentam maiores deficiências de fósforo e matéria orgânica. Isso se deve aos elevados teores de areia em sua composição (em média 70%), fazendo com que eles sejam altamente permeáveis, com baixa capacidade de retenção de água, baixos teores de matéria orgânica e adsorção de íons.

Devido a estas características, é importante que se faça uma gestão do uso e manejo adequado para estes solos, além de investir na reposição da matéria orgânica e nas práticas conservacionistas, visando tornar essas áreas menos suscetíveis à erosão e aumentar sua aptidão agrícola (BRADY; WEIL, 2013).

Para evitar a degradação e/ou o desgaste dos solos, os sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema de semeadura direta (SSD) ou o sistema agropastoril (SAP), vem se expandindo por aumentar o acúmulo de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, e portanto, gera vários questionamentos sobre o manejo da fertilidade dos solos.

Nos sistemas agrícolas, de modo geral, o gesso pode ser empregado como fonte de enxofre (S) e de cálcio (Ca) e como condicionador de subsuperfície, promovendo aumentos nos teores de Ca e redução da saturação por alumínio, resultando em maior desenvolvimento do sistema radicular em profundidade no perfil do solo, com consequente melhoria na absorção de água e de nutrientes pelas plantas em sucessão (VITTI; PRIORI, 2009).

Na década de 1990, o gesso começou a ser utilizado em SSD para minimizar problemas de acidez, principalmente na redução da toxicidade por  $Al^{3+}$ . Nesse processo, o  $Al^{3+}$  é precipitado (ZAMBROSI *et al.* 2007) em uma forma menos tóxica ( $AlSO_4^+$ ), além disso, a gessagem aumenta os teores de  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  no subsolo (NEIS *et al.* 2010)

A necessidade de aplicação de gesso é determinada pela análise de solo, em função de vários métodos de recomendação na literatura, e na maior parte deles é

necessária também a determinação do teor de argila. Os principais critérios de recomendação de aplicação de gesso com a finalidade de melhoria de subsuperfície são os baseados na textura do solo (% de argila) (SOUSA; LOBATO, 2004) ou na saturação por bases (V%) e valores de CTC das camadas subsuperficiais (DEMATTE, 1986; VITTI *et al.*, 2008).

As reações do gesso agrícola que ocorrem no subsolo são a dissociação do  $\text{CaSO}_4^0$  lixiviado em profundidade, troca iônica entre o  $\text{Ca}^{2+}$  do gesso e o  $\text{Al}^{3+}$  adsorvido à CTC e complexação do  $\text{Al}^{3+}$  pelo  $\text{SO}_4^{2-}$  e, essas reações melhoram o ambiente radicular, pois promovem o aumento do teor de Ca em profundidade, diminuem a saturação por alumínio (m%) e conseqüentemente a absorção de  $\text{Al}^{3+}$  pelas raízes, devido à formação do par iônico  $\text{AlSO}_4^+$  (VITTI; PRIORI, 2009).

Existem diversas metodologias de recomendação de uso de gesso agrícola no Brasil, o que gera dúvidas quanto à quantidade adequada a ser utilizada e sem correlação direta com a produtividade das culturas em SSD ou SAP nos solos do Cerrado, sendo assim há necessidade de se estabelecer estudos que comprovem sua viabilidade de uso.

O presente trabalho objetivou avaliar qual dentre as cinco metodologias de recomendação de uso de gesso agrícola em diferentes sistemas sustentáveis de produção agropecuária é o mais eficiente em relação a movimentação de nutrientes no perfil do solo e relacionar com a produtividade agrícola em solo arenoso.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Fertilidade do solo em sistemas de produção na região do Cerrado

Solos de áreas da região do Cerrado são característicos por apresentarem baixa fertilidade, baixa reserva mineral e de matéria orgânica, além da baixa atividade de suas argilas e serem naturalmente ácidos, porém são solos profundos, e com elevada estabilidade de agregados, ou seja, têm capacidade produtiva reduzida, mas com elevado potencial quando suas limitações nutricionais são corrigidas (COSTA *et al.*, 2015).

O uso intensivo e inadequado do solo dessas áreas tem causado sua degradação e acarretando em baixas produtividades, e o emprego de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) como os sistemas de semeadura direta (SSD), que exclui as práticas de revolvimento do solo, permitindo o acúmulo de material vegetal na superfície, sobre o qual será semeada ou plantada a cultura seguinte (BERTIN *et al.*, 2005), e agropastoril (SAP), no qual a pastagem aproveita a correção do solo e a adubação residual aplicados na lavoura, que por sua vez se beneficia do condicionamento físico do solo e da palhada proporcionados pela pastagem (VILELA *et al.*, 2003), são alternativas para recuperar essas áreas, melhorando as características físicas, químicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, aumentando a produtividade local.

A melhoria nos atributos químicos e biológicos do solo pelos SIPAs ocorrem por efeito da maior produção de palhada no consórcio que beneficia a cobertura do solo e proporciona maior aporte de matéria orgânica, contribuindo para a ciclagem de nutrientes (FONTANELI *et al.*, 2000; SANTOS *et al.*, 2011; SPERA *et al.*, 2010a; CHIODEROLI *et al.*, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2012).

O uso desses sistemas no cerrado proporciona um ambiente favorável à recuperação ou manutenção das propriedades do solo por conta da palhada acumulada pelas plantas de cobertura ou das pastagens e restos culturais de lavouras comerciais (SANTOS *et al.*, 2008) e, dentre as modalidades de SIPAs utilizadas no Brasil, o cultivo consorciado de espécies forrageiras tropicais, como a *Urochloa brizantha* se destaca devido à sua alta relação C/N, que possibilita a longevidade da cobertura do solo (PORTES *et al.*, 2000; JAKELAITIS *et al.*, 2004).

Um dos principais benefícios das gramíneas para o solo é o acúmulo de matéria orgânica em profundidade, muito em função de seu sistema radicular vigoroso. Entretanto, para que ocorra acúmulo de matéria orgânica em profundidade é necessário manter o sistema radicular ativo no solo por maior parte do tempo (SALTON *et al.*, 2014), e assim, a melhoria do subsolo pela prática da gessagem tem seu potencial de uso nos SIPAs. Os resíduos de biomassa seca das plantas permitem recuperar os teores de matéria orgânica do solo (MOS) a valores próximos ao original (WENDLING *et al.*, 2005), ou até mesmo aumenta-los no médio e longo prazos.

Considerando tais informações, é válido salientar que a adequada nutrição das plantas de cobertura é importante para a concentração dos nutrientes na palhada residual que é acumulada ao longo dos anos, em especial as espécies do gênero *Urochloa*, pois estas apresentam grande potencial para ciclagem de nutrientes, sobretudo de N e K (PARIZ *et al.*, 2011; PACHECO *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2015a; MENDONÇA *et al.*, 2015), sendo então fonte lábil de nutrientes que contribuirão para a melhoria na fertilidade do solo sob SAP associado ao SSD. Por promover uma proteção física para o solo e contribuir para a formação de compostos que servirão como fonte de nutrientes e energia para as plantas (WENDLING *et al.*, 2010; JAMALA e OKE, 2013), a palhada torna-se de fundamental importância para a consolidação e manutenção do SSD (COSTA *et al.*, 2014b).

Nesta linha de pesquisa, Amado *et al.* (2001) e Santos *et al.* (2011), ao avaliarem a qualidade de solo em SAP sob SSD, observaram acúmulos de matéria orgânica, carbono, cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e potássio (K) na camada superficial (0-0,05 m), em relação às camadas mais profundas. Enquanto, Costa *et al.* (2015) constataram que mesmo com alta extração de nutrientes pelas culturas em SAP, os valores dos atributos químicos do solo foram pouco alterados nas camadas de 0 a 0,20 m e melhorados na camada de 0,20 a 0,40 m.

Também Carvalho *et al.* (2005) constataram que o sistema SAP com SSD pode aumentar o teor de matéria orgânica nos solos e elevar o pH, os teores de potássio, carbono e de saturação por bases de um ano para outro, concluindo que o nível de fertilidade do solo aumentou com esse manejo. Esse sistema também pode reduzir a variação no teor de MOS que ocorre com a mudança de componentes, aumentando com a fase pastagem e reduzindo com a fase lavoura de grãos (VILELA *et al.*, 2011).

Considerando principalmente o efeito das adubações nas culturas e a intensificação da utilização da área agrícola com cultivos realizados durante todo o ano,

integrando espécies com diferentes sistemas radiculares, Mendonça *et al.* (2012) verificaram que os resíduos vegetais com diferentes relações C/N contribuíram para alterações das taxas de decomposição e ciclagem de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo no tempo.

Dentre as possíveis técnicas de manejo a serem aplicadas, a utilização do gesso agrícola tem sido uma das melhores alternativas para neutralizar a toxicidade de alumínio na camada subsuperficial do solo (CAIRES *et al.*, 2003; SOUSA; LOBATO, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2007; BROCH; RANNO, 2009).

A movimentação do gesso ao longo do perfil do solo, devido a sua maior solubilidade em relação ao calcário, e à presença de água no solo, contribui para redução da toxidez por Al no subsolo, aumenta a disponibilidade de enxofre e a percolação de bases, proporcionando melhoria do ambiente radicular nas camadas mais profundas do solo (CAIRES *et al.*, 2003; CASTRO *et al.*, 2013).

No cerrado, a deficiência de cálcio, associada ou não à toxidez por alumínio ocorre na camada superficial e subsuperficial. Ao se considerar o valor de saturação por alumínio acima de 10% como prejudicial ao crescimento radicular das plantas, observa-se que, na subsuperfície do solo (camada abaixo de 20 cm), 70% da área agricultável do cerrado apresenta índices superiores a esse valor e, que em 86% da área, em subsuperfície, o teor de cálcio é inferior a  $0,4 \text{ cmol/dm}^3$  (SOUSA *et al.*, 2005).

Em trabalho realizado por Soratto e Crusciol (2008), o gesso havia reduzido os teores de Al trocável nas camadas de 0 a 0,60 m e, foram sugeridas algumas hipóteses para se entender os mecanismos relacionados a diminuição do Al trocável pela aplicação de gesso, dentre elas, a liberação de  $\text{OH}^-$  pelo  $\text{SO}_4^{2-}$ , mediante a troca de ligantes, com a formação de estruturas hidroxiladas de Al (autocalagem) (REEVE; SUMNER, 1972). Outra hipótese seria a de que ocorre precipitação de Al com a formação de minerais (ADAMS; RAWAYFIH, 1977) e, ainda a possibilidade de que ocorra a lixiviação de Al acompanhando o gesso, o que pode ser, em parte, favorecida pela formação, principalmente, de pares iônicos ou complexos  $\text{AlSO}_4^+$  (PAVAN *et al.*, 1984).

Tem-se observado maior produtividade de culturas anuais em resposta ao uso do gesso agrícola. Essas respostas são atribuídas à melhor distribuição de raízes das culturas em profundidade no solo, ocasionando maior aproveitamento da água quando ocorre veranicos no ciclo da cultura e, além de aumentar a absorção de água, os



nutrientes também são absorvidos com mais eficiência, desde o mais móvel (nitrogênio) até aos menos móveis (fósforo e potássio) (SOUSA *et al.*, 2005).

Estudos sobre a dinâmica de nutrientes nos solos do Cerrado e o manejo da fertilidade com o crescimento e desenvolvimento de plantas podem potencializar o uso dos insumos, como fertilizantes e corretivos, contribuindo na tomada de decisões sobre as práticas que aproximam os sistemas de cultivo à sua maior sustentabilidade (GOEDERT; OLIVEIRA, 2007), como por exemplo, o SSD, que propicia um ambiente orgânico onde ocorre a preservação da umidade e da fertilidade do solo e facilita a disponibilidade de nutrientes na solução do solo para absorção pelas plantas (GATIBONI *et al.*, 2007).

## 2.2. Atributos físicos do solo em sistemas de produção na região do Cerrado

Dentre as características dos solos do Cerrado, observa-se que o teor de matéria orgânica é baixo, geralmente entre 1 e 3 % e que, comumente, são solos profundos, sazoados, de cor vermelha ou vermelha amarelada, com capacidade de retenção de água relativamente baixa, porosos, permeáveis, bem drenados e, portanto, intensamente lixiviados. Em sua textura prevalece a fração areia, vindo em seguida a argila e por último o silte. Sendo assim, eles são predominantemente arenosos, areno-argilosos, argilo-arenosos ou, eventualmente, argilosos (COUTINHO, 2000).

As alterações na estrutura dos solos, resultantes do manejo, são de grande importância para a escolha de sistemas que priorizam a conservação das propriedades dos solos e aumentem o potencial produtivo dessas áreas (ROZANE *et al.*, 2010). O contínuo preparo do solo, adubações e calagens intensivas promovem, quando feitas de modo incorreto, alterações físicas do solo, refletindo negativamente nos atributos físicos, químicos, físico-químicos e atividades biológicas (SANTOS *et al.*, 2010).

É possível reverter a degradação do solo por práticas conservacionistas, como o SSD ou o SAP (MORETI *et al.*, 2007; LOSS *et al.*, 2011); Práticas como estas demonstram grande eficácia na preservação de recursos naturais e permitem que seja realizada uma exploração racional dos solos (KLUTHCOUSKI *et al.*, 2007), refletindo positivamente nos atributos químicos, físicos e biológicos desses solos (SPERA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2011; CHIODEROLI *et al.*, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2012). As alterações propiciadas pelo SIPAs ocorrem pelo incremento na MOS, devido à

adição e manutenção de palhada na superfície do solo (SANTOS *et al.*, 2012; BOENI *et al.*, 2014; GAZOLLA *et al.*, 2015).

Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais exerce influência nos atributos indicadores da qualidade física do solo, pois atua diretamente na sua estrutura (HAMZA; ANDERSON, 2005) e, a melhoria nesses atributos com uso dos SIPAs ocorrem por efeito da maior produção de palhada no consórcio e rotação de culturas que beneficia a cobertura do solo, e proporciona maior aporte de matéria orgânica que favorece a ciclagem de nutrientes, melhora a infiltração e armazenagem de água, com a maior exploração do perfil do solo pelas raízes, diminui o processo erosivo, com o efeito residual das adubações nas culturas, e intensifica a utilização da área agrícola (FONTANELI *et al.*, 2000; SANTOS *et al.*, 2011; SPERA *et al.*, 2010a; CHIODEROLI *et al.*, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2012).

O conhecimento sobre a textura do solo é importante para sua classificação, contribuindo para entender os processos pedogenéticos que atuaram no terreno, considerando que as geofomas da paisagem afetam no movimento da água e dos atributos do solo (LEÃO *et al.*, 2011).

A textura está associada a proporção das frações granulométricas, areia, silte e argila que compõem o solo e é a característica mais estável do solo, pois não está sujeita a mudanças temporais rápidas, e interfere nas outras propriedades físicas e químicas (BRADY; WEIL, 2013). Avaliar a textura do solo é um dos itens fundamentais para seu estudo, pois está atrelada aos indicadores de qualidade do solo mais importantes. A textura é uma propriedade básica que influencia significativa e diretamente os atributos físicos e direta ou indiretamente atributos químicos e biológicos (RIBEIRO *et al.*, 2012). Considerado dos atributos físicos mais importantes do solo, a proporção relativa de areia, silte e argila, afeta diretamente a capacidade de retenção de água, o teor de matéria orgânica e a drenagem do solo, sendo componente importante para avaliar sua qualidade e manejo adequado, assim como a sustentabilidade das práticas agrícolas (VILAS-BOAS *et al.*, 2016).

A granulometria do solo determinada a laser (GL) está relacionada com a estrutura e, portanto, com sua porosidade, influenciando diretamente em processos químicos e físico-hídricos, podendo ser definida como a distribuição de tamanho de partículas primárias baseada em diâmetros equivalentes (LUZ *et al.*, 2016). Para melhor entender a composição do solo e as variações que ocorrem horizontalmente no perfil e lateralmente, quando se considera a variação em uma área, para melhor interpretação

dos processos edáficos, principalmente a movimentação da água, é necessário que se faça de maneira detalhada uma análise granulométrica do solo.

A análise da distribuição do tamanho das partículas (PSD) utilizando o método por difração de laser (LDM), se caracteriza pela dispersão das partículas do solo num fluido em movimento, causando descontinuidade no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho da partícula (KOZIŁOWSKI; KOMISAREK, 2017).

Utilizando o LDM, ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre interação entre difração, refração, reflexão e absorção, formando um envoltório tridimensional de luz. O tamanho e formato deste envoltório depende do índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, do tamanho e formato da partícula, e do comprimento de onda da luz (WIDOMSKI *et al.*, 2015). É relevante e necessário a escolha de um modelo matemático para a dispersão da luz pelas partículas, na obtenção de informações sobre o PDS com base na análise da luz registrada pelos detectores e originada do espalhamento das partículas medidas. Para tanto, existem duas teorias, em que a maioria dos instrumentos usa modelos óticos em seus softwares de análise: a teoria de difração de Fraunhofer e a teoria do espalhamento de Mie (BOER *et al.*, 1987).

Ao estudar o solo é de fundamental importância considerar a sua estrutura que, em parte determina sua superfície específica, importante para entender as relações solo-água- planta- atmosfera. A água, o ar, a matéria orgânica e partículas minerais se encontram interligadas em agregados e o conjunto de agregados formam unidades de estrutura que se encontram unidas por forças de coesão e adesão, influenciadas pela presença de agentes cimentantes coloidais (LUZ *et al.*, 2016).

O estudo da matéria orgânica do solo (MOS) e sua relação com o manejo das áreas agrícolas objetiva desenvolver estratégias para utilização sustentável dos solos, reduzindo o impacto das atividades sobre o ambiente.

As formas de uso do solo influenciam no armazenamento do carbono (CARVALHO *et al.*, 2010), com forte controle estrutural (ZINN *et al.*, 2007a), textural e mineralógico (ZINN *et al.*, 2007b) e, a matéria orgânica é fundamental no potencial produtivo dos solos por exercer diversas funções importantes, como a geração de cargas elétricas negativas, disponibilização de nutrientes e a agregação do solo, além de ser considerada como a principal reserva de carbono do solo, tornando-se um compartimento chave do ciclo global deste elemento (SATO, 2013). A redução do carbono orgânico acelera a degradação da estrutura do solo pelo aumento na densidade

e diminuição da agregação, do armazenamento de água e da aeração do solo (FAGERIA, 2012), propiciando uma redução da produtividade das culturas (FUENTES *et al.*, 2009).

### 2.3. Recomendações de uso de gesso agrícola

O gesso agrícola é um subproduto da indústria de produção do ácido fosfórico que contém principalmente sulfato de cálcio e pequenas concentrações de P e F (CAIRES *et al.*, 2003) e, sua aplicação na superfície do solo é considerada complementar à calagem, pois o gesso é relativamente mais solúvel que o calcário, e ocorre lixiviação para camadas subsuperficiais ácidas, ocasionando melhor ambiente para o crescimento radicular e maior eficiência na absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas (SUMNER *et al.*, 1986; CARVALHO; RAIJ, 1997), em decorrência do aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ , da formação de espécies menos tóxicas de Al ( $\text{AlSO}_4^+$ ) e da precipitação de  $\text{Al}^{3+}$  (SHAINBERG *et al.*, 1989).

Ainda hoje existe certa dificuldade na recomendação de uso de gesso agrícola devido à grande diversidade de metodologias existentes na literatura e, ao fato de nenhuma delas atender a todos os requisitos de importância do solo. Para uma melhor recomendação deve-se levar em consideração algumas características do solo como teor de matéria orgânica e espécie vegetal cultivada (LOPES; GUILHERME 1994), a sua textura (% argila) (SOUSA; LOBATO, 2004) e até mesmo sua mineralogia (tipo de argila e conseqüentemente CTC), saturação por bases (V%) e CTC efetiva das camadas subsuperficiais (DEMATTÊ, 1986; VITTI *et al.*, 2008).

De acordo com a metodologia proposta por Sousa, Lobato e Rein (2005), para culturas anuais, deve ser realizada uma análise do solo retirando-se amostras nas profundidades de 0,20 a 0,40 m e de 0,40 a 0,60 m. Essas amostras devem ser encaminhadas para um laboratório para realização da análise química solicitando a determinação do teor de argila. Deve-se verificar a saturação por alumínio (m %) e, se esta for maior que 20 % ou se os teores de Ca forem menores que  $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , é recomendada a aplicação de gesso na área, como fonte de Ca ou corretivo de Al.

Sendo assim, a recomendação da dose de gesso (DG) a ser aplicado para as culturas anuais vai depender apenas do teor de argila do solo e não de sua CTC, podendo-se utilizar a seguinte fórmula:

$$\text{DG (kg ha}^{-1}\text{)} = 50 \times \text{Argila (\%)}$$

Sousa e Lobato (2004), ainda sugerem outra recomendação, baseada na amostragem do solo na camada de 0,20 a 0,40 m ou 0,30 a 0,50 m, e na sua análise química e teor de argila (%), sem correção pela CTC, onde recomenda-se aplicar gesso quando a análise de solo indicar teores de Ca menores ou iguais a  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e saturação por Al (m %) for maior ou igual a 20 %. Essa recomendação pode ser feita pela seguinte fórmula:

$$\text{NG (kg ha}^{-1}\text{)} = 50 \times \text{argila (\%)} \text{ ou } 5 \times \text{argila (g kg}^{-1}\text{)}$$

De acordo com Vitti e Priori (2009), a necessidade de aplicação de gesso é determinada pela análise de solo com amostragem nas profundidades de 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m para as culturas anuais, e de 0,60 a 0,80 m para culturas perenes. Nesta metodologia não é necessária a determinação do teor de argila, não atendendo à critérios mineralógicos do solo e teores de MO. Quando o solo apresentar teores de Ca menor que  $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  ou saturação por Al maior que 20 % ou teor de  $\text{Al}^{3+}$  maior que  $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e saturação por bases menor que 35 %, os resultados em relação a aplicação do gesso serão mais viáveis pela metodologia com a seguinte equação:

$$\text{NG (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{V2} - \text{V1}) \times \text{CTC}}{500}$$

Sendo que, V2 = saturação por bases que se deseja atingir, V1 = saturação por bases atual do solo e CTC = capacidade de troca de cátions (em  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), na camada de 0,20 a 0,40 m e o fator de divisão 500 sem legenda do seu porquê de uso.

Segundo Rajj *et al.* (1996), sob o sistema plantio direto, não há um método de recomendação de gessagem definido, porém, os autores consideraram aplicação de 60 kg de gesso por ponto percentual de argila para solo do estado de São Paulo, quando os teores de Ca forem menores ou iguais a  $4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e/ou saturação por Al (m%) for maior ou igual a 40 % e de acordo com o teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no solo, sem correção pela sua CTC e utilizando a fórmula:

$$\text{NG (kg ha}^{-1}\text{)} = 6 \times \text{g kg}^{-1} \text{ de argila ou } \text{NG (kg ha}^{-1}\text{)} = 60 \times \% \text{ de argila}$$

Recentemente, Caires e Guimarães (2016) propuseram um método que foi baseado na recomendação de gesso agrícola para o sul do Brasil. De acordo com esta metodologia, busca-se elevar a saturação por Ca na CTCe (efetiva) do subsolo a 60 %,

ou seja, aplicar o gesso para o solo com saturação por Ca na CTC efetiva (CTCe) menor que 50 %. Para este método, com base na CTC da camada de 0,20 a 0,40 m é utilizada a seguinte fórmula:

$$NG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = (0,6 \times CTCe - \text{teor de Ca em cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \times 6,4$$

Esses autores sugerem ainda uma metodologia para o uso de doses de gesso agrícola visando a melhoria de solos ácidos em SSD, considerando a camada de solo de 0,20 a 0,40 m, sendo necessário realizar a gessagem segundo os critérios: se o teor de Ca for menor ou igual a  $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , saturação por Ca na CTCe for menor que 60 %, teor de Al for maior que  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e saturação por Al for maior ou igual a 20 %, utilizando as seguintes fórmulas de acordo com esses critérios:

Teor de Argila (%):

$$NG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 5 \times \text{Argila (g kg}^{-1}\text{)}$$

Saturação por Bases (V%):

$$NG \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = (50 - V\%) \times CTC/50$$

Assim, de modo geral, na literatura há uma grande variação de métodos, gerando doses de gesso muito discrepantes para aplicação ao solo em diferentes culturas, sem levar em conta todos os atributos físico-químicos do solo que determinam sua capacidade de retenção de cátions e efeito residual da prática da gessagem. Também deve-se salientar que o gesso agrícola é fonte de Ca e S para as culturas num sistema de rotação, muito indicado nos atuais moldes de sistemas integrados de produção agropecuária, em que pode ser um insumo de extrema importância na longevidade do sistema, pela melhoria do ambiente radicular em profundidade, acarretando em maior absorção de água e nutrientes em camadas de subsuperfície do solo, e conferindo às plantas maior tolerância ao déficit hídrico comum no Cerrado brasileiro.

#### 2.4. Uso de gesso agrícola na região do Cerrado

O gesso beneficia o solo em relação às suas propriedades, aumentando a infiltração e a capacidade de retenção de água. Isso ocorre pela elevação da floculação da argila, possibilitando maior estabilidade de agregados, redução da densidade e a

prevenção do encrostamento superficial (BORGES *et al.*, 1997; FAVARETTO *et al.*, 2006; ROSA JUNIOR *et al.*, 2007). Por favorecer o aproveitamento da água disponível no solo pelas culturas com o aumento do volume das raízes (SOBRAL *et al.*, 2009), pode-se dizer que o uso do gesso gera benefícios nas químicas e físicas no solo.

Tais características tornam o gesso um condicionador de crescimento radicular em profundidade, principalmente para os solos do Cerrado, com alta concentração das raízes em superfície quando só se utiliza o calcário, tornando as culturas altamente susceptíveis aos efeitos de veranicos. Dessa forma, o gesso vem sendo amplamente utilizado com o objetivo de reduzir as perdas de produtividade nessa região, favorecendo o crescimento das raízes na subsuperfície e proporcionando melhor aproveitamento da água no perfil do solo (SOUSA *et al.*, 2004; SORATTO; CRUSCIOL, 2008; RAMOS *et al.*, 2013).

A adoção da gessagem em áreas agrícolas no Cerrado tem evoluído nas últimas décadas, principalmente onde se produzem culturas de elevada importância econômica para o agronegócio brasileiro. No período de 1999 a 2012, o uso do gesso em locais com plantio de soja cresceu em 6,46 vezes, passando de 76 mil para 491 mil toneladas. Em se tratando do milho, a utilização cresceu 3,83 vezes no período de 1999 a 2007 (EMBRAPA, 2013).

O incremento em produtividade, a partir da aplicação do gesso, pode ser observado na maioria das culturas anuais, com destaque para milho, soja, algodão e trigo. Alguns trabalhos têm evidenciado aumento de produtividade, principalmente em gramíneas (RASHID *et al.*, 2008; MICHALOVICZ *et al.*, 2014; PAULETTI *et al.*, 2014; ZANDONÁ *et al.*, 2015) sendo que, de acordo com Caires *et al.* (2004) e Caires *et al.* (2011) houve incremento na produtividade na cultura do milho com diferentes doses de gesso aplicadas no solo. Em algodão e soja, observou-se incremento de 44,4% e 21,2%, respectivamente, em resposta a aplicação de gesso (SOUSA *et al.*, 2008) e, no trigo verificou-se incremento linear para a produtividade em função das doses de gesso (RAMPIM *et al.*, 2013).

Os efeitos positivos alcançados pelas culturas em consequência da melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo resultam dos maiores teores disponíveis de cálcio e da correção da toxidez por alumínio, obtidos a partir da técnica de gessagem (CAIRES *et al.*, 2001; CAIRES *et al.*, 2006; SALDANHA *et al.*, 2007). Tais efeitos são intensificados quando consideradas as características químicas apresentadas pelos solos do Cerrado, que normalmente apresentam baixa fertilidade

natural e elevada saturação por alumínio (CASTRO *et al.*, 2011; CARDUCCI *et al.*, 2012). Essas limitações podem ocasionar a concentração de 90% do sistema radicular da cultura do milho na camada de 0-0,30 m do solo, sem a aplicação do gesso, ocorrendo distribuição do sistema radicular até os 0,75 m, após a aplicação desse produto (SOUSA *et al.*, 2004).

Para gramíneas e leguminosas forrageiras pode-se alcançar maiores rendimentos de matéria seca e absorção de nutrientes, aumentando o seu valor nutritivo (CUSTÓDIO *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2009; GUELFY *et al.*, 2013). Sousa *et al.* (2001) observaram para *Urochloa decumbens* e *Urochloa brizantha*, aumentos de produtividade de MS de 260 e 50%, respectivamente, após aplicação do gesso.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

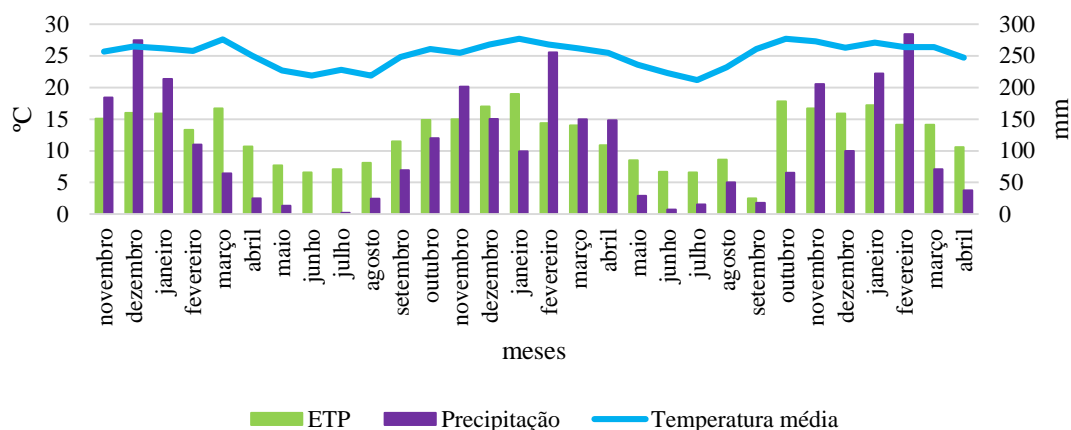
#### 3.1. Localização e características da área experimental

O experimento foi conduzido no Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Seringueira e Sistemas Agroflorestais, do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA/SAA-SP, localizado no município de Votuporanga-SP, com coordenadas geográficas 20° 28' de Latitude Sul e 50° 04' de Longitude Oeste, apresentando relevo suave e altitude de 467 m.

O clima é o tropical com invernos secos (Aw na classificação de Köppen) com temperatura média anual de 24 °C, tendo a média das máximas de 30 °C e a média das mínimas de 18 °C, com precipitação pluvial média anual de 1448,7 mm. Durante o período experimental foram obtidos os dados de precipitação, temperatura média e evapotranspiração mensais (Figura 1) em estação meteorológica instalada na estação experimental do APTA/SAA-SP



Figura 1. Dados de evapotranspiração potencial (ETP), precipitação pluvial e temperatura média mensal em Votuporanga- SP, durante o desenvolvimento do experimento.



Fonte: CIIAGRO (2021)

O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho - Amarelo eutrófico de textura arenosa (segundo o SiBCS, SANTOS *et al.*, 2018), com 815 e 81 g kg<sup>-1</sup> de areia e argila na camada de 0 a 0,20 m e 783 e 75 g kg<sup>-1</sup> de areia e argila na camada de 0,20 a 0,40 m. Antes da instalação do experimento foi realizada a caracterização textural e química (TEIXEIRA *et al.*, 2017) do solo nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m (tabela 1).

Tabela 1. Caracterização física e química da área experimental, realizada nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, antes da instalação do experimento, Votuporanga, 2017.

Profundidade (m)	Areia		Argila								
	g kg <sup>-1</sup>										
0-0,20	815		81								
0,20-0,40	783		75								
Sistemas de produção <sup>(1)</sup>	Profundidade (m)	P mg dm <sup>-3</sup>	S mg dm <sup>-3</sup>	MO g dm <sup>-3</sup>	pH	K	Ca mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	H+Al mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	V %	M %
SSD	0-0,20	34	3	15	4,3	2,8	10	6	31	38	18
SSD	0,20-0,40	9	4	13	4,1	2,7	3	4	28	34	25
SAP	0-0,20	22	4	13	4,5	2,1	7	7	25	39	11
SAP	0,20-0,40	15	5	11	4,1	2,5	5	4	28	29	34
PAST	0-0,20	4	3	18	5,2	1,0	14	11	16	62	0
PAST	0,20-0,40	2	4	14	5,3	1,8	13	8	16	59	0

<sup>(1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta), SAP (sistema agropastoril) e PAST (pastagem convencional). Fonte: Elaboração do própria autora.

### 3.2. Histórico e manejo das áreas

O tratamento com sistema de semeadura direta (SSD) foi implantado em uma área destinada à produção de grãos, com sistema convencional de preparo do solo. Na safra 2008/09 a área foi cultivada com amendoim e sorgo granífero sobre a resteva do amendoim. Desde a safra 2009/10 todas as semeaduras foram realizadas em sistema de semeadura direta e rotação de culturas com soja, milho, *Crotalaria juncea*, sorgo granífero e sorgo forrageiro em consórcio com *U. brizantha* e *U. ruziziensis*.

O sorgo forrageiro e a *U. ruziziensis* foram utilizados como plantas de cobertura na última safra (2016/17) antes da instalação do presente experimento), e não foram retirados da área ou pastejados.

Na safra 2011/12 foi anexada ao campo experimental, uma área com sistema agropastoril (SAP), com alternância entre culturas e pastagem (rotação de culturas com soja, *C. juncea* (pós soja) e milho em consórcio com *U. brizantha* cultivar Marandu (pós *C. juncea*)). Antes esta área (experimento) era destinada à produção de grãos, com sistema convencional de preparo do solo. Neste sistema SAP, bovinos de corte recém-desmamados sempre foram introduzidos sessenta dias após a colheita do milho, permanecem na área por quatorze meses, quando veda-se a área por trinta dias e em seguida é realizada a dessecação da forrageira e semeadura direta da soja sobre a palhada da *U. brizantha*. Na safra 2015/16 foi cultivado milho na primeira safra e *Crotalaria juncea* na segunda safra. Na safra 2016/17 foi cultivado milho em consórcio com *Urochloa ruziziensis* na primeira safra, em sistema de semeadura direta sobre a palhada da *C. juncea*.

O sistema pastagem convencional (PAST) foi implantado em uma área com pastagem reformada após o cultivo de milheto (*Pennisetum glaucum*) (segunda safra 2008/09), soja/*Crotalaria juncea* (safra 2009/10) e milho em consórcio com *Urochloa brizantha* cultivar Marandu (safra 2010/11). Desde setembro de 2011 são introduzidos bovinos de corte recém-desmamados na área, os quais permanecem até o momento do abate. Cabe salientar que a pastagem não foi mais reformada desde então.

#### 3.2.1. Sistema de semeadura direta

Para avaliação neste experimento, realizou-se a semeadura de milho, mecanicamente, em sistema de semeadura direta sobre a palhada da *C. juncea* no dia

24/11/2017, utilizando a cultivar Dow AgroSciences 2B587 PowerCore™ no espaçamento de 0,80 m entre linhas e 6 sementes m<sup>-1</sup>, com adubação de base na dose de 315 kg ha<sup>-1</sup> do adubo formulado 08-28-16 com 1,7% de Ca e 3,6% de S (S-SO<sub>4</sub>).

No dia 11/12/2017 foi realizada a primeira adubação de cobertura, utilizando-se o adubo formulado 20-00-20, na dose de 270 kg ha<sup>-1</sup>.

A semeadura da *U. brizantha* cv. Marandu foi realizada no dia 14/12/2017, utilizando-se 10 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da forrageira, com valor cultural de 50%, misturada com o adubo super fosfato simples, na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo semeadas duas linhas da forrageira nas entrelinhas da cultura do milho, com espaçamento de 0,25 m em relação ao milho e de 0,30 m entre as linhas do capim Marandu.

No dia 18/12/2017 foi realizada a segunda adubação de cobertura, utilizando-se sulfato de amônio (20% de N e 22% de S-SO<sub>4</sub>) na dose de 250 kg ha<sup>-1</sup>. A colheita do milho foi realizada no dia 27/03/2018.

Após 7 dias da dessecação do capim Marandu (glifosato na dose de 1560 kg i.a. ha<sup>-1</sup>), no dia 24/11/2018 foi realizada uma roçada da *U. brizantha* presente na área para facilitar a semeadura da soja, pois a mesma apresentava, em média, 18.840 kg ha<sup>-1</sup> de matéria verde.

Realizou-se semeadura da soja, mecanicamente, em sistema de semeadura direta sobre a palhada da *U. brizantha* no dia 27/11/2018, utilizando a cultivar 74HO112TP IPRO Paranaíba no espaçamento de 0,50 m e população de 14 sementes m<sup>-1</sup>, com adubação de base na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> do adubo formulado 04-20-20. A colheita da soja foi realizada no dia 17/04/2019, e após a colheita da soja foi semeada *C. juncea* na área. Para a safra 2019/20, a *C. juncea* foi colhida para produção de sementes no dia 09/09/2019 e depois roçada no dia seguinte. No dia 12/11/2019 foi semeado ao consórcio de milho com *U. brizantha* cultivar Marandu, entretanto a forrageira foi semeada a lanço (manualmente), na dose de 1000 pontos de valor cultural ha<sup>-1</sup>, juntamente com o milho, cultivar Forseed FS533 PWU, no espaçamento de 0,5 m entre linhas e 4 sementes m<sup>-1</sup>, com adubação de base na dose de 250 kg ha<sup>-1</sup> do adubo formulado 08-28-16. No dia 27/11/2019 foi realizada a primeira adubação de cobertura, utilizando-se o adubo formulado 20-00-20 na dose de 250 kg ha<sup>-1</sup>.

No dia 02/12/2019 foi realizada a segunda adubação de cobertura, utilizando-se sulfato de amônio (20% de N e 22% de S-SO<sub>4</sub>) na dose de 250 kg ha<sup>-1</sup>. A colheita do milho foi realizada no dia 09/03/2020.

### 3.2.2. Sistema agropastoril

A semeadura do milho foi realizada mecanicamente no sistema de semeadura direta sobre a palhada da *Crotalaria juncea* no dia 24/11/2017, utilizando a cultivar Dow AgroSciences 2B587 PowerCore™, no espaçamento de 0,80 m entre linhas e 6 sementes m<sup>-1</sup>, com adubação de base na dose de 315 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 08-28-16. As sementes foram tratadas industrialmente com fludioxonil 25 g L<sup>-1</sup> + metalaxil - com 20 g L<sup>-1</sup> + tiabendazol 150 g L<sup>-1</sup>, na dose de 0,15 L do p.c. 100 kg de sementes<sup>-1</sup>.

Após a semeadura, foi realizada uma dessecação pós-plantio no dia 24/11/2017, utilizando-se paraquat 200 g L<sup>-1</sup>, na dose de 2,0 L ha<sup>-1</sup> do p.c. + adjuvante, na dose de 0,06 L ha<sup>-1</sup> do p.c. No dia 11/12/2018 foi realizada a primeira adubação de cobertura, utilizando-se o adubo formulado 20-00-20, na dose de 270 kg ha<sup>-1</sup> e, a aplicação do herbicida pós-emergente atrazina 500 g L<sup>-1</sup>, na dose de 3,0 L ha<sup>-1</sup> do p.c. + óleo mineral, na dose de 1 L ha<sup>-1</sup> do p.c. No dia 18/12/2017 foi realizada a segunda adubação de cobertura, utilizando-se sulfato de amônio, na dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N. Cada parcela foi composta por quatro linhas de milho (espaçamento de 0,80 m) e 5 m de comprimento, totalizando 16 m<sup>2</sup>.

A semeadura da *U. brizantha* cv. Marandu foi realizada no dia 14/12/2017, utilizando-se 10 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da forrageira, com valor cultural de 50%, misturada com o adubo superfosfato simples, na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo semeadas duas linhas da forrageira nas entrelinhas da cultura do milho, com espaçamento de 0,25 m em relação ao milho e de 0,30 m entre as linhas do capim Marandu.

Sessenta dias após a colheita do milho da safra 2017/2018, foram introduzidos animais bovinos de corte recém desmamados e mantidos até setembro de 2019 e, então, realizou-se a semeadura da soja, mecanicamente, no sistema de semeadura direta sobre a palhada da *U. brizantha* no dia 12/11/2019, utilizando-se a cultivar de soja 74HO112TP IPRO Paranaíba no espaçamento de 0,50 m entre linhas e 16,75 sementes m<sup>-1</sup>. Foi utilizado na semeadura da soja, o adubo formulado 04-20-20 na dose de 310 kg ha<sup>-1</sup>. A colheita da soja foi realizada no dia 11/03/2020.

### 3.2.3. Pastagem convencional

O sistema pastagem convencional foi implantada em área reformada com o cultivo de milheto (*Pennisetum glaucum*) (segunda safra 2008/09), soja/ *Crotalaria juncea* (safra 2009/10) e milho em consórcio com *Urochloa brizantha* cultivar Marandu (safra 2010/11). Desde setembro de 2011 são introduzidos bovinos de corte recém-desmamados na área, os quais permanecem até o momento do abate. A pastagem não foi mais reformada desde então.

### 3.3. Delineamento experimental e tratamentos

No presente trabalho, o delineamento experimental é o de blocos casualizados, com 4 repetições, em esquema de parcelas subdivididas, onde as parcelas são os três sistemas de produção (sistema de semeadura direta (SSD); agropastoril (SAP) e pastagem convencional (PAST)), e nas subparcelas as doses de gesso baseadas em 5 metodologias da literatura (camada de 0,20 a 0,40 m) e um controle (sem gesso) (Figura 2) conforme a seguir:

T1: Metodologia de Caires e Guimarães (2016):  $NG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = (0,6 \times CTCe - \text{teor de Ca em cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \times 6,4$ ;

T2: Metodologia de Sousa, Lobato e Rein (2005):  $DG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 50 \times \text{Argila (\%)}$ ;

T3: Metodologia de Vitti *et al.* (2008):  $NG \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = (V2 - V1) \times CTC/500$

T4: Metodologia de Demattê (1986): (solos com menos de 15% de argila na camada de 0,20 a 0,40 m com  $700 \text{ kg ha}^{-1}$  de gesso);

T5: Metodologia de Rajj *et al.* (1996):  $NG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 6 \times \text{g kg}^{-1}$  de argila ou  $NG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 60 \times \%$  de argila;

T6: Tratamento controle (sem aplicação de gesso agrícola);

O gesso agrícola nas diferentes doses calculadas para cada subparcela (com área de  $25 \text{ m}^2$  cada) foi aplicado em superfície, sem incorporação ao solo, em novembro de 2017, e reaplicações em agosto de 2018 e setembro de 2019.

Figura 2. Disposição dos tratamentos nas áreas experimentais

SSD				SAP				PAST				
Bloco D	1	2	3	Bloco D	1	2	3	Bloco D	x	x	4	3
	6	5	4		6	5	4		2	1	5	6
Bloco C	4	3	2	Bloco C	4	3	2	Bloco C	x	x	4	3
	5	6	1		5	6	1		6	5	2	1
Bloco B	2	1	6	Bloco B	2	1	6	Bloco A/B	5	6	1	2
	3	4	5		3	4	5		4	3	6	5
Bloco A	6	5	4	Bloco A	6	5	4		1	2	3	4
	1	2	3		1	2	3					

Fonte: Elaboração do própria autora.

### 3.4. Avaliações

#### 3.4.1. Fertilidade do solo

A amostragem do solo foi realizada em outubro de 2017, com intuito de realizar a caracterização da área, e posteriormente por subparcela em abril de 2018, abril de 2019 e abril de 2020 nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, retirando-se dez subamostras (amostras simples) por subparcela, as quais foram homogeneizadas em uma amostra composta e analisadas quimicamente para determinação de pH, bases trocáveis, alumínio e hidrogênio extraíveis, fósforo assimilável, e enxofre conforme metodologia proposta por Raij *et al.* (2001).

#### 3.4.2. Densidade, agregação e porosidade do solo

A amostragem de solo para fins de análise física (TEIXEIRA *et al.*, 2017) e estrutural (ANGERS; MEHUYS, 2000) foi realizada em novembro de 2017, para caracterização nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,20 e 0,20-0,40 m. Realizou-se a abertura de trincheiras para coleta de amostras de solo com anéis volumétricos de aproximadamente 0,05 m de diâmetro e 0,04 m de altura para análise de macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo (TEIXEIRA *et al.*, 2017), e de monólitos para análise da estabilidade de agregados com tamisamento via úmida e cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP) (ANGERS; MEHUYS, 2000), em aparelho de oscilação vertical preconizado por Yoder (1936). O mesmo procedimento de amostragem e determinações foi adotado em abril de 2020, com o

intuito de avaliar as condições físicas do solo após 3 anos dos sistemas e aplicação do gesso.

#### *3.4.3. Granulometria a laser (GL) - método de difração a laser*

Amostras de solo coletadas em abril de 2020 na camada de 0-0,10 m, foram destinadas à análise granulométrica pelo método de difração de raios laser.

A técnica de granulometria a laser permitiu conhecer a distribuição do tamanho das partículas de uma amostra, e foi baseada nas teorias de Fraunhofer e Mie da dispersão da luz. Essas teorias consideraram a capacidade que as partículas do solo têm de dispersarem luz em todas as direções com diferentes padrões de intensidade, em função do tamanho das partículas.

Utilizando um granulômetro a laser, as partículas de solo foram dispersas num fluido em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluido, que foram detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho da partícula. A distribuição da intensidade de luz medida é soma dos padrões de dispersão de cada partícula, o que o software transformou em distribuição volumétrica (ENGLAND, 2003).

Inicialmente as amostras deformadas de solo foram moídas em moinho de martelo e posteriormente foi realizado peneiramento das amostras na malha 45 ABNT de abertura 0,35 mm para evitar espalhamento muito alto no espectro de difração, que ocasiona erros de leitura devido a poucas partículas muito grossas. Para esta análise granulométrica utilizou-se o equipamento Mastersizer 2000 da Malvern, na qual uma alíquota da amostra moída foi colocada em solução de água e três gotas de hexametáfosfato de sódio (10%), aplicando 15 segundos de ultrassom com deslocamento ultrassônico de 12,5 conforme escala do equipamento. Os gráficos gerados foram obtidos pelo software Mastersize da Malvern v. 5.60 (MALVERN, 1996).

#### *3.4.4. Superfície específica (SE)*

Foram coletadas, em abril de 2020, amostras de solo de cada subparcela experimental, na camada de 0-0,10 m para serem analisadas, a partir da definição de isotermas de adsorção e de desorção de nitrogênio, combinada com a equação

conhecida por BET de Brunauer, Emmet e Teller (BRUNAUER *et al.*, 1938). A equação de BET implica em uma relação entre pressão e volume do adsorbato (N<sub>2</sub>) em certo limite de escala, gerando isotermas de adsorção e de desorção de nitrogênio, a partir das quais se pode determinar a superfície específica em amostras de agregados dos solos. A determinação da SE foi realizada utilizando um analisador de sorção de gás Thermo Sorptomatic 1990.

#### 3.4.5. Espectroscopia FTIR e dados pré-processados

Das mesmas amostras de solo por subparcelas, na camada de 0-0,10 m, foram efetuadas análises da caracterização qualitativa da matéria orgânica do solo por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).

Os espectros FTIR foram medidos no modo de transmissão. Para tanto, amostras de solo seco foram moídas em argamassa de Agatha. De cada amostra, 1 mg foi misturado com 200 mg de brometo de potássio (KBr), bem misturado e transferido para uma prensa para criar um pellet. A absorvância dos pellets foi medida usando um espectrofotômetro Bruker Vector 22 na região espectral 400–4000 cm<sup>-1</sup> com resolução de 2 cm<sup>-1</sup>. Os espectros registrados foram corrigidos de linha de base e normalizados usando uma Correção de Sinal Multiplicativo Estendido (EMSC) para remover polarização e ruído nos espectros devido à temperatura, espalhamento, variações na concentração do solo ou anomalias do instrumento (GRIFFITHS; DE HASETH, 2007). Todo o processamento do sinal foi feito com o pacote “EMSC” dentro do ambiente R (LILAND, 2016; LILAND; MEVIK, 2015).

Para relacionar as diferenças na composição do grupo funcional com a qualidade do matéria orgânica, foram calculadas duas proporções de bandas. Esses dois índices usam proporções de bandas que representam tipos de grupos funcionais que em estudos anteriores foram estabelecidos como índices de decomposição relativa e recalcitrância de MOS (VEUM *et al.*, 2014):



$$\text{Index I} = \frac{1650+920+840}{2924+2850+1470+1405}$$

$$\text{Index II} = \frac{2924+2850+1650+1470+1405+920+840}{3400+1270+1110+1080}$$

O índice I é como uma métrica de decomposição da proporção de grupos funcionais aromáticos para alifáticos e as proporções das bandas que representam esses dois grupos funcionais aumentam com o aumento do grau de decomposição (CHEFETZ *et al.*, 1998; HSU e LO, 1999). O índice II é uma razão de grupos funcionais C para O, em que o aumento pode estar associado a maior recalcitrância da matéria orgânica (DING *et al.*, 2002; VEUM *et al.*, 2014), ou seja, ao seu tempo de decomposição.

#### 3.4.6. Análise elementar de C, N, e relação C/N

Das mesmas amostras de solo por subparcela, na camada de 0-0,10 m, foram efetuadas análises elementares de C, N e cálculo da relação C/N.

A análise elementar por combustão permite a determinação da concentração de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio em uma ampla gama de compostos orgânicos e inorgânicos. O método analítico é baseado na oxidação completa da amostra por meio de combustão instantânea. Os gases resultantes da combustão são transportados por meio de um gás portador (hélio) através de um forno de redução e uma coluna cromatográfica, onde são separados e, finalmente, um detector de condutividade térmica é utilizado para sua quantificação.

Ao pré-tratar a amostra acidificando-a para remover carbonatos, também é possível determinar o conteúdo de carbono orgânico de diferentes tipos de matrizes.

#### 3.4.7. Milho

Na colheita do milho das duas safras avaliadas no SSD e na única safra do SAP, foram avaliados: altura de inserção da primeira espiga e altura de plantas em 10 plantas por subparcela, contagem do número de plantas nas 2 linhas centrais por subparcela e cálculo do estande final, e após colheita e trilha das espigas destas duas linhas centrais

determinou-se a massa de cem grãos e a produtividade de grãos (13% umidade – base úmida).

#### 3.4.8. Soja

Para avaliação da soja nos sistemas SSD e SAP, foram medidas em 10 plantas por subparcela, a altura de inserção da primeira vagem e a altura de plantas. No momento da colheita, em 4 linhas centrais por subparcela foram contadas as plantas para determinação do estande final, e após colheita e trilha das plantas destas quatro linhas centrais de cada subparcela, determinou-se a massa de cem grãos e a produtividade de grãos (12% umidade – base úmida).

#### 3.4.9. *Crotalária juncea*

A produtividade de matéria seca total foi avaliada após a soja antecessora na área de SSD. Foi utilizado o método do quadrado de metal, lançando-se um quadrado com  $0,5 \times 0,5$  m ( $0,25$  m<sup>2</sup>) aleatoriamente em 3 pontos da área útil das subparcelas. Após o corte das plantas rente ao solo, o material vegetal foi picado e colocado em estufa para secagem a 60°C por 72 horas, para obtenção da MS por ha.

#### 3.4.10. Pastagem

Foi avaliada a produtividade de matéria seca (MS) da *U. brizantha* cv. Marandu, sendo essa avaliação realizada no momento da colheita e sessenta dias após a colheita de grãos de milho nos consórcios com capim Marandu (SSD e SAP), e nos meses de fevereiro e setembro, após instalada na área de PAST. Foi utilizado o método do quadrado de metal, lançando-se um quadrado com  $0,5 \times 0,5$  m ( $0,25$  m<sup>2</sup>), aleatoriamente em 3 pontos da área útil das subparcelas. Após o corte das plantas rente ao solo, o material vegetal foi picado e colocado em estufa para secagem a 60°C por 72 horas, para obtenção da MS por ha.

### 3.5. Análise dos resultados

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste t de Student ( $p < 0,05$ ). As análises dos componentes principais (PCA) foram realizadas com o R versão 4.0.1 software (DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019) utilizando os pacotes “FactoMiner”, “shiny”, “FactoInvestigate” e “ggplot2”.

Paralelo a estas análises, para alguns tratamentos, foi realizada análise multifractal, adotada no presente estudo para a caracterização das propriedades de escala da granulometria laser e dos diagramas de adsorção de nitrogênio.

Para estimar a dimensão multifractal sobre um suporte, o primeiro passo consiste em definir a medida. Para a granulometria laser, o suporte se refere ao tamanho de partículas avaliado pelos métodos de Mie e Fanhoufer; para adsorção de nitrogênio, a escala se refere a pressão relativa  $p/p_0$ , onde  $p_0$  é pressão atmosférica. Então é possível definir uma função de probabilidade de massa normalizada  $\mu_i(\delta)$  que descreve a contribuição de diferentes intervalos de tamanho  $\delta$  para a massa total, sendo determinada pela equação:

$$\mu_i(\delta) = \varphi_i(\delta) / \sum_{i=1}^{n(\delta)} \varphi_i(\delta) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$\varphi_i$  = é o valor da medida no segmento  $i^{\text{th}}$  na escala  $\delta$ ;

$n(\delta)$  = é o número do segmento com tamanho  $\delta$ , que cobre o intervalo total de amostragem;

$\sum_{i=1}^{N(\delta)} \varphi_i(\delta)$  = representa toda a massa ao longo do suporte

O seguinte passo da análise fractal (mono quanto multifractal) consiste em estabelecer se existe uma relação de potência entre a medida e a escala.

Para isso avalia-se a função de partição:

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta) \quad (\text{Eq. 2})$$

A função de partição quando plotada contra tamanho do segmento ou caixa de tamanho  $\delta$  apresenta a seguinte propriedade de escala:

$$\chi(q, \delta) \propto \delta^{\tau(q)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde  $\tau(q)$  é uma função não linear de  $q$ , conhecida como função de expoente de massa sendo calculada pela seguinte equação:

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \chi(q, \delta)}{\log(\delta)} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta)}{\log(\delta)} \quad (\text{Eq. 4})$$

A função de expoente de massa,  $\tau$  está relacionada com o espectro da dimensão generalizada ou dimensão de Rényi,  $D_q$ , (RÉNYI, 1954; HENTSCHEL e PROCACCIA, 1983), que pode ser estimada pela equação:

$$D_q = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log[\chi(q, \delta)]}{\log \delta} \quad \text{para } q \neq 1 \quad (\text{Eq. 5})$$

Ao utilizar a equação acima  $D_1$  torna-se indeterminado assim para o caso particular onde  $q=1$  usamos a seguinte equação:

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} p_i(\delta) \log[p_i(\delta)]}{\log \delta} \quad \text{Para } q = 1 \quad (\text{Eq. 6})$$

Para uma distribuição monofractal,  $D_q$  é uma constante. No entanto, para medidas multifractais, a relação entre  $D_q$  e  $q$  tipicamente apresenta um aspecto semelhante ao de um sigmoide duplo com um ponto de inflexão para  $q=0$ .

As dimensões generalizadas ( $D_q$ ), em  $q=0$ ,  $q=1$  e  $q=2$ , são conhecidas como dimensão de capacidade ( $D_0$ ), informação ou entropia de Shannon ( $D_1$ ) e correlação ( $D_2$ ), respectivamente. Para o caso de monofractalidade  $D_0 \approx D_1 \approx D_2$ ; para o caso de multifractalidade aceita-se que  $D_0 > D_1 > D_2$ . (CANIEGO *et al.*, 2005; VIDAL VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

Para o presente estudo a dimensão generalizada foi calculada usando os intervalos de  $-10 < q < 10$  com incremento de 0,5, tanto para os dados de granulometria a laser como para adsorção de nitrogênio.

As medidas que apresentam uma distribuição multifractal também podem ser caracterizadas por mais outras duas funções de escalonamento,  $f(\alpha)$  e  $\alpha_q$ . Essas duas funções podem ser calculadas a partir da função expoente de massa  $\tau(q)$ .

O uso do  $\tau(q)$  implica utilizar o método de Legendre então os resultados podem estar sujeitos a erros significativo nos cálculos de  $f(\alpha)$  e  $\alpha$ . Por isso, o espectro de

singularidade  $f(\alpha)$  foi determinado segundo metodologia proposta por Chhabra e Jensen (1989). Esse processo baseia-se na quantidade  $\mu_i(q, \delta)$  que corresponde a contribuição individual dos segmentos da função de partição sendo definida como:

$$\mu_i(q, \delta) = \mu_i^q(\delta) / \sum_1^{n(\delta)} \mu_i^q(\delta) \quad (\text{Eq. 7})$$

Então usando um conjunto de números reais  $-\infty < q < \infty$ , as funções  $\alpha_q$  e  $f(\alpha)$  podem ser estimadas como:

$$f[\alpha(q)] \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$(\text{Eq. 9}) \quad \alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)}$$

A plotagem de  $f(\alpha)$  contra  $\alpha_q$  resulta no espectro de singularidade que apresenta curva definida por uma parábola com concavidade voltada para baixo (VIDAL VÁZQUEZ *et al.*, 2013). Os valores do expoente de singularidade mínimo ( $\alpha_{\text{mín}}$ ) no intervalo  $\alpha_0$  até  $\alpha_{\text{mín}}$  corresponde a regiões com maior concentração da medida enquanto os valores do expoente de singularidade máxima ( $\alpha_{\text{max}}$ ) no intervalo  $\alpha_{\text{max}}$  até  $\alpha_0$  corresponde a regiões com medidas de baixa frequência. O gráfico  $f(\alpha)$  contra  $\alpha_q$  é reduzido para 1 ponto no tipo de escalonamento fractal. No presente estudo  $f(\alpha)$  e  $\alpha_q$  foram computados entre  $-3 < q < 10$  com incremento de 0,5 para granulometria a laser e, para adsorção de nitrogênio foi computado entre  $-10 < q < 10$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Sistema de semeadura direta

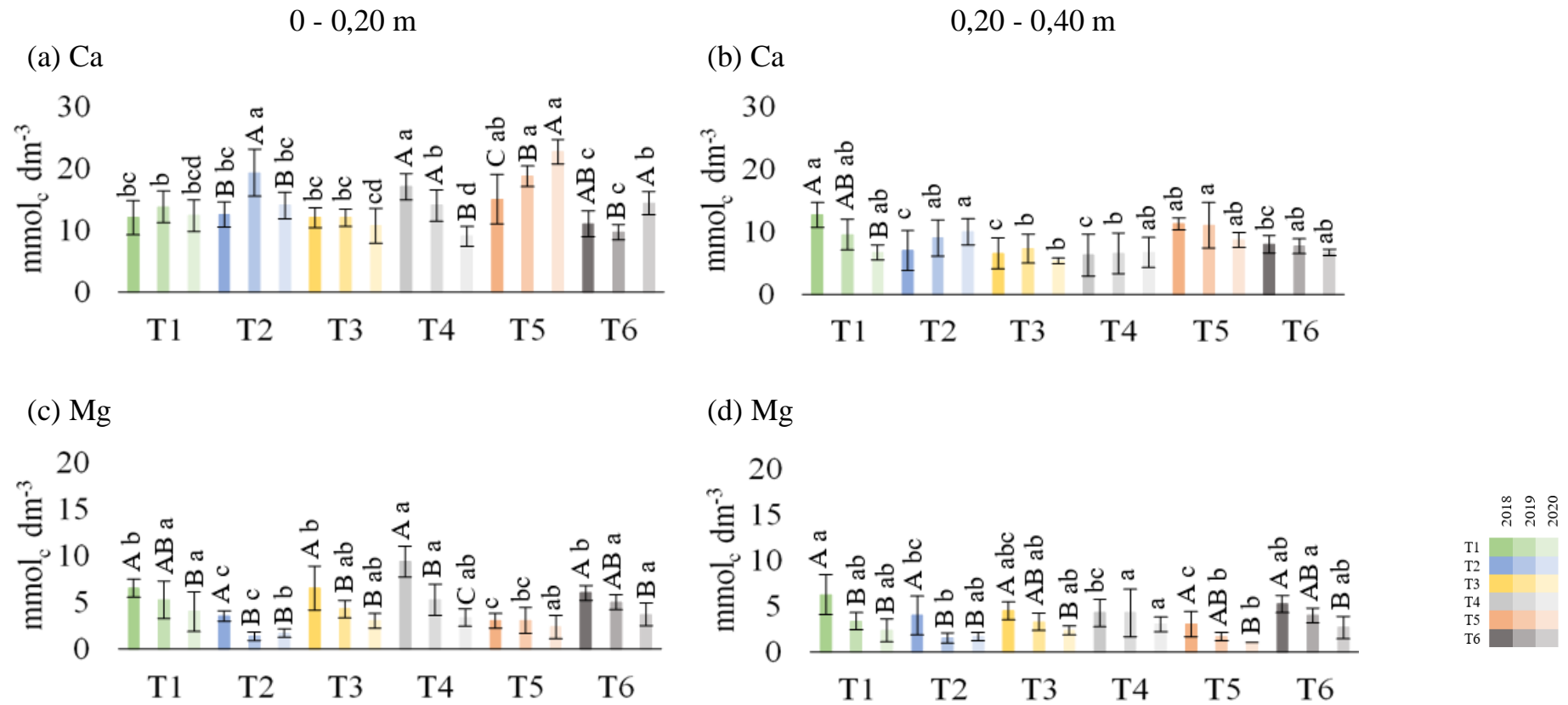
#### 4.1.1. Fertilidade do solo

Considerando os teores de Ca na camada de 0 - 0,20 m (Figura 3a), foi possível observar diferenças ( $p < 0,05$ ) em relação aos anos e aos tratamentos sendo que, o T2 apresentou melhores resultados em 2019, o T4 em 2018 e 2019, T5 em 2020 e o T6 em 2018 e 2020. Esses tratamentos levam em consideração o teor de argila do solo e, a pouca chuva que sucedeu a aplicação do gesso nos anos 2018 e 2019 aliada ao acúmulo

de palhada na superfície do solo fez com que o material acumulasse nessa camada, aumentando assim os teores de Ca. Enquanto que na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 3b) o T1 proporcionou maiores teores de Ca; assim, esse tratamento que considera a CTC no solo e, com a maior dose de gesso associado às chuvas no solo arenoso proporcionou a lixiviação do Ca para a camada subsuperficial.

Em 2018, na camada superficial, o T4 apresentou maiores teores de Ca, quando comparado ao T6, enquanto na camada subsuperficial, novamente o T1 foi o que resultou em maior concentração de Ca, se comparado ao T4. O T1, na metodologia de Caires e Guimarães, considera na sua recomendação, a CTC e o teor de Ca do solo, acarretando em maior quantidade de gesso aplicada nas áreas e, por esse motivo junto ao solo arenoso, foi possível observar uma maior lixiviação do Ca em profundidade. De acordo com Zandoná *et al.* (2015), a aplicação de gesso na superfície do solo tem sido indicada para aumentar a concentração de Ca em subsuperfície, pois ocorre a lixiviação que proporciona considerável aumento de seu teor nas camadas mais profundas do solo.

Figura 3. Alterações nos teores de Ca e Mg nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSP).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Na segunda avaliação, realizada em 2019, observou-se que na camada 0 a 0,20 m o T2 e T5 apresentaram os maiores teores de Ca, principalmente se comparados ao T6, onde não houve aplicação de gesso. Na camada de 0,20 a 0,40 m, o T5 apresentou maiores concentrações se comparado ao T4. Apesar de todos esses tratamentos considerarem a porcentagem de argila no solo para valorar a quantidade de gesso a ser aplicada, deve-se frisar que o T4, metodologia de Demattê, prescreve um valor fixo para gessagem considerando a argila presente na camada de 0,20 - 0,40 m e que este valor é muito baixo nas áreas estudadas ( $75 \text{ g kg}^{-1}$ ). Também é possível verificar elevado teor de Ca relacionado ao T1 na camada subsuperficial, proveniente da dissociação do  $\text{CaSO}_4^0$  lixiviado em profundidade. Crusciol *et al.* (2014), utilizando a dose de  $1,7 \text{ t ha}^{-1}$ , observaram que a aplicação de gesso aumentou o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  ao longo do perfil e em estudo desenvolvido por Michalovicz *et al.* (2014), com 4 doses de gesso ( $1,5, 3,0, 4,5$  e  $6,0 \text{ t ha}^{-1}$ ) e avaliação após 6 meses de aplicação, houve aumento dos teores de Ca no solo em profundidade.

Em 2020 constatou-se maiores teores de Ca com o T5, se comparado ao T4 na superfície e, em subsuperfície, o T2 apresentou elevados teores se comparado ao T3. Nesse caso foi possível observar a lixiviação do Ca em profundidade considerando que os teores de Ca em cada um dos tratamentos na camada de 0 a 0,20 m é inversamente proporcional aos teores encontrados na camada abaixo, ou seja, o T5 que apresentou maiores concentrações de 0 - 0,20 m apresentou também um dos menores valores em 0,20 a 0,40 m, enquanto o T4, com menor teor de Ca em superfície, apresentou maiores valores em subsuperfície.

Se comparada a avaliação de 2020, com a análise inicial, realizada em 2017 (Tabela 1), é possível observar que em todo perfil do solo, o teor de Ca aumentou nos diferentes tratamentos. Zandoná *et al.* (2015) avaliando os atributos químicos do solo 6 meses após aplicação de gesso, notaram aumentos nos teores disponíveis de  $\text{Ca}^{2+}$  em todas as profundidades avaliadas. Também Lima *et al.* (2013), avaliando a influência do gesso na dose de  $1 \text{ t ha}^{-1}$  e tratamento controle sobre características do solo aos 36 e 72 meses após a aplicação, observaram efeito mais acentuado quanto aos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  no maior prazo após a aplicação.

Considerando as avaliações realizadas para o Mg houve diferença ( $p < 0,05$ ) entre os anos e entre os tratamentos nas duas profundidades (Figura 3cd) do solo, sendo que, para todos os tratamentos, exceto o T5 de 0 a 0,20 m, em 2018 foram constatados os



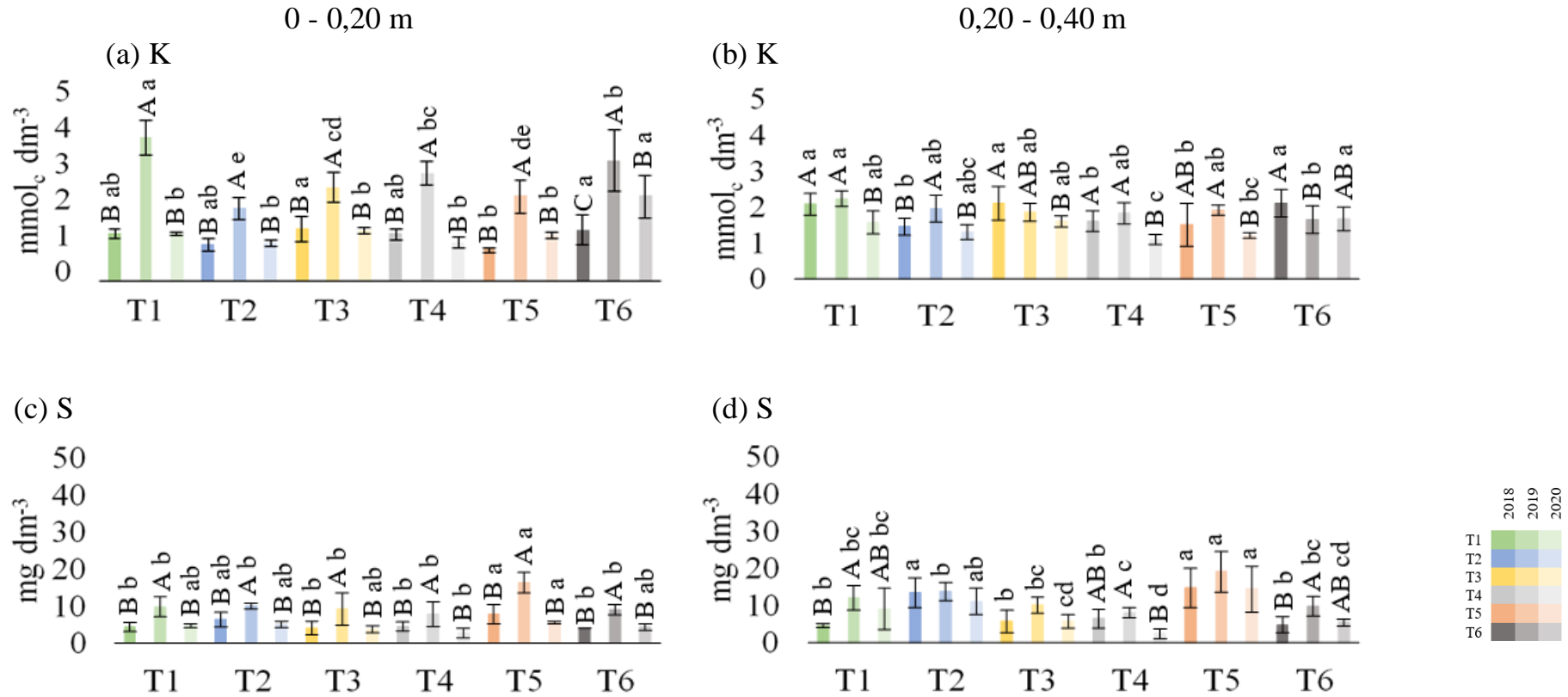
maiores teores de Mg. O fato dos maiores teores terem ocorrido no primeiro ano de avaliação (2018) pode ser explicado pelo o aumento do teor de  $\text{Ca}^{2+}$  nos outros anos provocado pela a aplicação anual de gesso, que promove o deslocamento do  $\text{Mg}^{2+}$  dos sítios de troca, podendo ser lixiviado no perfil do solo na forma de par iônico ( $\text{MgSO}_4^0$ ) com o  $\text{SO}_4^{2-}$  ou na forma de íons  $\text{Mg}^{2+}$ ; isso ocorre pois o  $\text{Ca}^{2+}$  substitui o  $\text{Mg}^{2+}$  nas cargas negativas do solo e sulfato forma pares iônicos com o  $\text{Mg}^{2+}$ , favorecendo sua lixiviação na forma de  $\text{MgSO}_4$  (ZAMBROSI *et al.*, 2007, SOARES, 2016; RESENDE, 2018).

Em 2018, o T4 apresentou maior teor de Mg se comparado ao T5 na camada de 0 a 0,20 m e, na camada de 0,20 a 0,40 m, foi o T1 em relação ao T5 que apresentou teores mais elevados de Mg. Nos anos 2019 e 2020, os tratamentos que proporcionaram maiores e menores teores do nutriente coincidiram para os perfis de solo estudados sendo que, na camada superficial, o T1 apresentou valores mais satisfatórios se comparado ao T2 e, em subsuperfície, o T4 superou o T5.

Comparando a análise inicial (Tabela 1) com a realizada em 2020 é observado uma redução de quase 50% nos teores de Mg nas duas profundidades. Após 3 anos de aplicação de gesso, independente da metodologia utilizada, foi possível observar a diminuição do Mg no perfil do solo e isso pode ser explicado pelas reações que acontecem no solo, sobretudo a lixiviação do Ca e de outras bases que é acelerada devido à alta solubilidade deste insumo. Alguns estudos corroboram com esses resultados mostrando que, após aplicação de gesso, ocorreu movimentação e lixiviação de Ca e Mg no perfil do solo, além de liberação de enxofre e neutralização do Al no subsolo (AMARAL *et al.*, 2017).

Para K, as diferenças ( $p < 0,05$ ) observadas também ocorreram em relação aos anos e aos tratamentos nas duas profundidades, sendo que, em superfície (Figura 4a), os teores mais elevados foram observados em 2019 e, em subsuperfície (Figura 4b), T1, T3, T4 e T5 foram maiores em 2018 e 2019 e, para T2 e T6, em 2018 e 2020. O potássio, por ser bastante móvel no solo, é facilmente lixiviado em solos com baixa CTC como, por exemplo, em solos arenosos, porém, em 2019, a junção de fatores como acúmulo de palhada proporcionado pelo SSD associado a estiagem, podem ter ocasionado o aumento dos teores de K na camada de 0 a 0,40 m do solo. Este resultado é corriqueiro em áreas sob SSD, ou onde se efetue o manejo da “palhada” de gramíneas, em constatar elevação gradual dos teores de K na profundidade de 0 a 0,20 m, mesmo com a aplicação de gesso. (BRASIL *et al.*, 2020).

Figura 4. Alterações nos teores de K e S nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Em 2018, na profundidade de 0 a 0,20 m, o T3 e o T6 superaram o T5 sendo que, em 0,20 a 0,40 m, esses tratamentos coincidiram, mostrando que T1, T3 e T6 foram superiores a T2, T4 e T5 para os teores de K (Figuras 4a e 4b). Portanto, nesse caso, os tratamentos baseados na porcentagem de argila foram mais eficientes. Em 2019, o T1 apresentou maior concentração de K em todo perfil analisado, sendo superior ao T2 e ao T6 na camada de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, respectivamente. Em 2020, o T6, sem aplicação de gesso, apresentou os melhores resultados se comparado aos demais tratamentos. Em estudo com a dose de 1,7 t ha<sup>-1</sup>, observou-se que a aplicação de gesso ocasionou aumento de K<sup>+</sup> nas camadas abaixo de 0,40 m, enquanto que, em outros estudos que avaliaram o perfil do solo 3 meses após a aplicação de gesso, constatou-se que o gesso agrícola não influenciou nos teores de K<sup>+</sup> ao longo do perfil do solo (CRUSCIOL *et al.*, 2014, 2016, MICHALOVICZ *et al.*, 2014). Essa ausência de efeito pode ser explicada em razão da baixa formação do par iônico K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>0</sup> (ZAMBROSI *et al.*, 2008) pois se a concentração do K<sup>+</sup> é baixa em relação às concentrações de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> no solo e na solução, o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> fornecido pelo gesso não vai se ligar ao K<sup>+</sup> devido a competição entre os cátions (NAVA *et al.*, 2012).

Em geral, os teores de K em 2020, após 3 anos de gessagem, foram inferiores aos obtidos na análise inicial (Tabela 1), confirmando a teoria de que o K<sup>+</sup> foi lixiviado para camadas mais profundas do solo, assim como observado por outros autores após aplicação de gesso agrícola (PAULETTI *et al.*, 2014; SERAFIM *et al.*, 2012; NAVA *et al.*, 2012; RAMPIM *et al.*, 2011; CAIRES *et al.*, 2003).

Em relação aos teores de S houve diferença (p<0,05) para os anos e tratamentos com diferentes metodologias de gessagem, em ambas as profundidades do solo, sendo que, na camada de 0 a 0,20 m (Figura 4c) os maiores teores foram obtidos em 2019 para todos os tratamentos e, na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 4d), as diferenças foram observadas somente entre T1, T4 e T6, sendo que os teores mais elevados também foram obtidos neste ano de 2019.

Em se tratando do enxofre, nos anos 2018, 2019 e 2020, e nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo, pode-se destacar o T5, pois nesse tratamento a dose de gesso obtida pela multiplicação de um valor fixo pela porcentagem de argila, se mostrou mais eficiente no fornecimento desse nutriente durante todo período estudado se comparado ao T4 e ao T6, tratamentos onde a dose de gesso é fixa ou não houve aplicação do gesso. É importante salientar que a disponibilidade deste nutriente está estreitamente relacionada com o teor e a velocidade de mineralização da MOS.

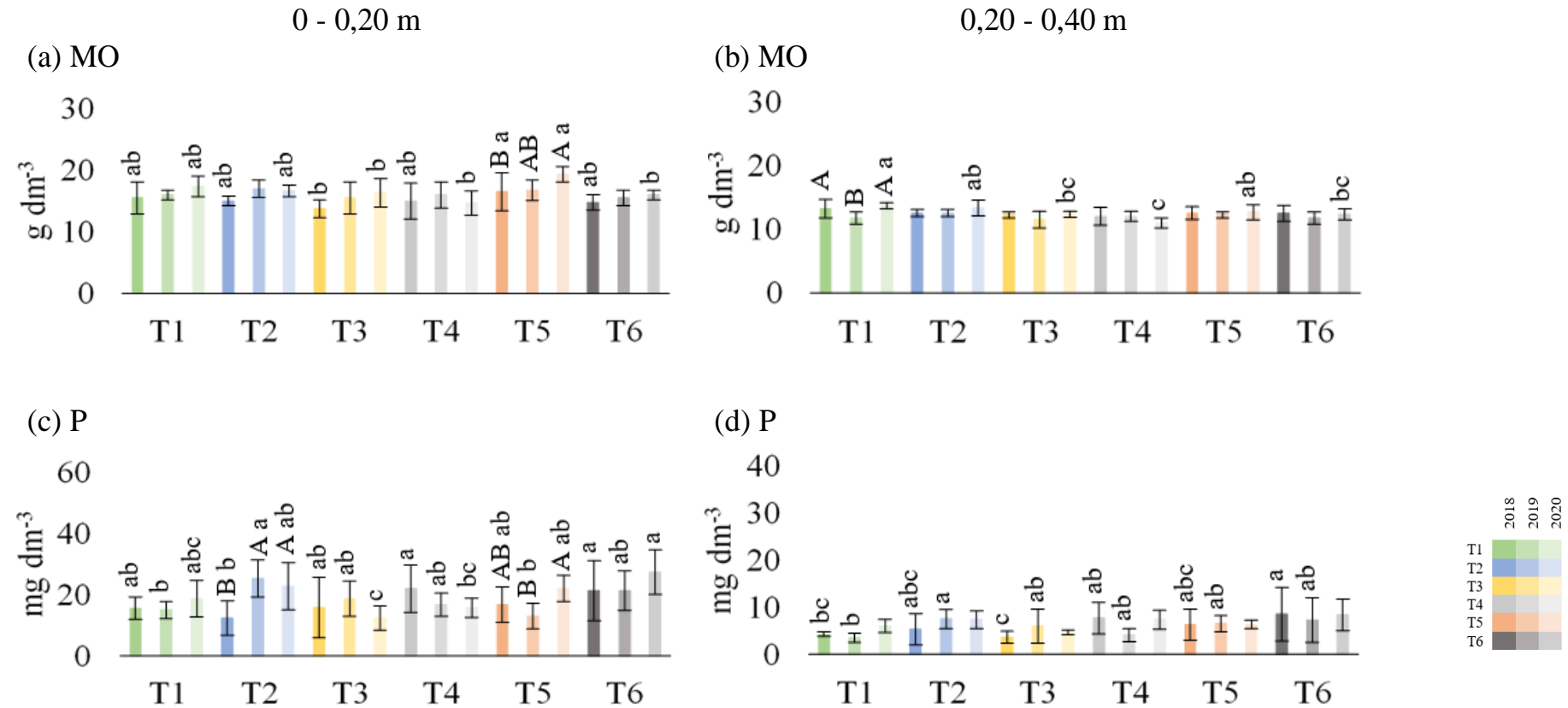
Se comparado a última avaliação, realizada em 2020 com a inicial (Tabela 1), é possível constatar que a prática anual da gessagem aumentou os teores de S nas duas profundidades analisadas. Diversos autores afirmam que a gessagem promove aumento nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  ao longo do perfil do solo (RAMOS *et al.*, 2013; VITTI *et al.*, 2008; RAIJ, 2008; SOUSA *et al.*, 2005; CAIRES *et al.*, 2004). Caires *et al.* (2003) ainda afirmam que o gesso aumentou os teores de Ca e enxofre ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) no subsolo, elevou a concentração de P e reduziu a de Mg na camada superficial do solo. Enquanto Rampim *et al.* (2011) atestaram que o uso de gesso aumenta os teores de Ca em todas as camadas de solo avaliadas (até 0,60 m), reduz o Mg nas camadas superficiais e proporciona acréscimo de S em todas as camadas avaliadas. Também Fois *et al.* (2017) e Moda *et al.* (2013) evidenciaram que o teor de S aumentou no perfil de solo com maior acúmulo na camada mais profunda (0,20- 0,40 m). A migração de S da camada superficial às camadas mais profundas ocorre devido à alta mobilidade do sulfato quando forma par iônico neutro com o íon  $\text{Ca}^{2+}$  (RAIJ, 2008; SORATTO e CRUSCIOL, 2008).

A matéria orgânica apresentou diferença ( $p < 0,05$ ) entre os anos e os tratamentos sendo que, em T5 as maiores concentrações ocorreram em 2019 e 2020, na profundidade de 0 a 0,20 m e, em T1 em 2018 e 2020 de 0,20 a 0,40m. A gessagem não influi diretamente no teor de matéria orgânica no solo; seu benefício está relacionado às melhorias na fertilidade que acarretam ou não no aumento de produtividade das culturas resultando num maior aporte de palhada deixado sobre a área no SSD.

Na camada superficial (Figura 5a) foi possível observar em 2018 e 2020 maiores concentrações de MO no T5 se comparado às parcelas do T3 em 2018, e do T3, T4 e T6, em 2020, enquanto em subsuperfície (Figura 5b), em 2020 o T1 foi superior ao T4.

O T5 proporcionou também elevados teores de Ca e S em profundidade, o que pelo maior crescimento das raízes das culturas em rotação e consórcio e, foi um importante aporte de MO no solo. Se comparada a última avaliação (2020) com a inicial (Tabela 1) é possível observar um pequeno incremento nos teores de MO em superfície do solo.

Figura 5. Alterações nos teores de MO e P nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

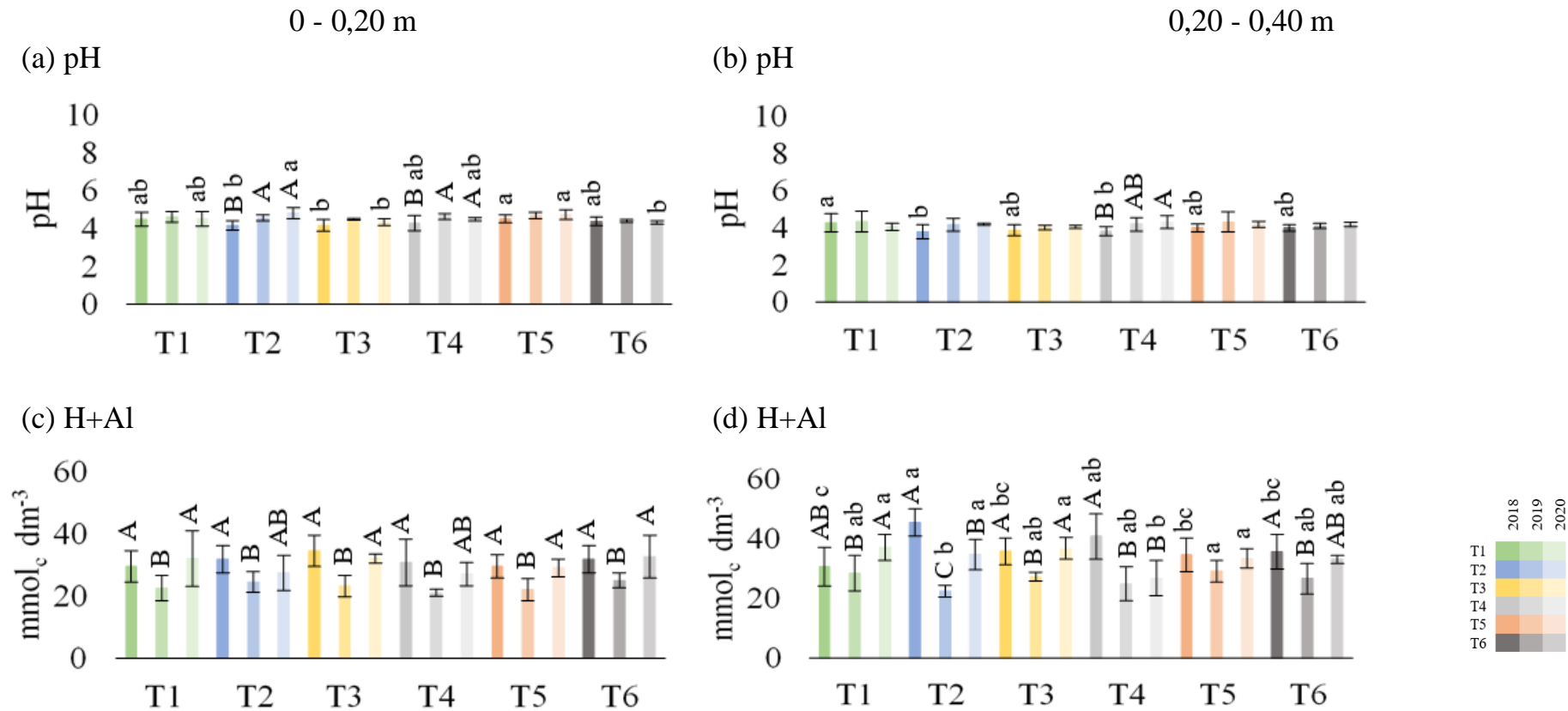
A adoção de práticas como a semeadura direta influencia positivamente o teor e a qualidade da matéria orgânica do solo com reflexos diretos ou indiretos sobre suas características químicas (FRAZÃO *et al.*, 2008), sendo que, a manutenção de resíduos vegetais sobre o solo e o mínimo revolvimento de sua estrutura fazem com que a velocidade de decomposição desses resíduos diminua. Franchini *et al.* (2003) averiguaram que essas práticas em solos arenosos com pouco aporte de matéria vegetal durante o ano, como é o caso das regiões do cerrado brasileiro, acarreta em suprimento de nutrientes pela decomposição dos resíduos e, esses resíduos de cobertura favorecem a mobilização de cátions e sua disponibilização para as culturas posteriores.

Para os teores de P foi observada diferença ( $p < 0,05$ ) entre os anos para T2 e T5 na camada de 0 a 0,20 m, sendo em 2019 e 2020 em relação ao T2, e em 2018 e 2020 para T5. Em 2018, na camada 0 a 0,20 m (Figura 5c), o T4 o T6 foram os tratamentos que apresentaram os teores mais elevados de P se comparado ao T2. Enquanto para a camada mais profunda (Figura 5d), o T6 se mostrou mais eficiente se comparado ao T3. Na segunda análise, realizada em 2019, o T2 apresentou os maiores teores nas duas camadas, sendo maior que T1 e T5 de 0 a 0,20 e que T1 em 0,20-0,40 m. Em 2020 houve diferença nos teores de P somente na camada superficial, sendo que o T6 se demonstrou melhor que o T3.

Ainda, confrontando os teores iniciais (Tabela 1) com os obtidos em 2020 constatou-se redução dos teores de P nas duas profundidades estudadas. Contrariando esse resultado, Caires *et al.* (2003), após 32 meses da aplicação do gesso, verificou aumento nos teores de P na camada superficial do solo (0-0,05 m), entretanto, avaliado em solo mais argiloso. Em solos muito arenosos, o íon  $\text{SO}_4^{2-}$  advindos da gessagem podem minimizar a adsorção de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  deixando maior quantidade deste nutriente em solução, que pode facilitar sua absorção ou perdas por lixiviação.

Para pH observou-se diferença ( $p < 0,05$ ) entre os anos para alguns tratamentos e também entre os tratamentos em cada ano avaliado nas duas profundidades do solo. Os maiores valores de pH, na camada 0 a 0,20 m (Figura 6a), foram proporcionados pelo T2 e T4 em 2019 e 2020 e, na camada 0,20 a 0,40 m (Figura 6b) por T4 também nos anos de 2019 e 2020.

Figura 6. Alterações no pH e H+Al nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Na camada 0 a 0,20 m, em 2018, o T5 demonstrou maiores valores de pH se comparado ao T2 e T3 e, em 2020, foram maiores em T2 e T5 se comparados ao T3 e T6. Na camada de 0,20 a 0,40 m foi possível observar diferenças somente em 2018, quando o T1 apresentou maiores valores de pH se comparado ao T2 e T4.

Embora o gesso não corrija a acidez ativa, ele diminui a concentração do  $Al^{3+}$  trocável do solo, ou seja, ele não é aplicado ao solo com objetivo de elevar o pH, pois é um sal neutro (MASCHIETTO, 2009; RAIJ, 2008). Mas, por vezes ele é utilizado como um complemento ao calcário por reduzir a fitotoxicidade de  $Al^{3+}$  e fornecer  $Ca^{2+}$ , e  $SO_4^{2-}$  em profundidade (RAIJ, 2008), e o aumento dos teores de Ca pode resultar em troca iônica com Al e H nas cargas da CTC, determinando também em aumento do pH. O que acontece no solo é a reação do gesso com o  $Al^{3+}$  formando o sulfato ( $Al_2(SO_4)_3$ ) que é menos solúvel (CREMON *et al.*, 2009; ZAMBROSI *et al.*, 2007), transformando ele em formas menos tóxicas, além de aumentar os teores de  $Ca^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$  no subsolo (NEIS *et al.*, 2010).

Comparando 2020 com a análise inicial do solo (Tabela 1), foi possível constatar pequeno aumento no pH em superfície, sendo que, na camada mais profunda (0,20-0,40 m) não houve alteração nos valores, demonstrando assim que, após os três anos de gessagem, pode ter ocorrido a lixiviação do Al acompanhando o gesso em profundidade no perfil do solo, alterando muito pouco o pH nas camadas mais profundas do solo. Em estudo desenvolvido por Michalovicz *et al.* (2014), utilizando 4 doses de gesso e realizando a avaliação 6 meses após a aplicação, os autores constataram que não houve diferença significativa para o pH até a profundidade 0,80 m.

Em relação a acidez potencial (H+Al), as diferenças ( $p < 0,05$ ) observadas foram, para a camada 0 a 0,20 m (Figura 6c) houve efeito apenas dos anos para cada tratamento, enquanto que na camada 0,20 a 0,40 m (Figura 6d) houve efeito de anos e tratamentos.

Na camada superficial, os menores valores de H+Al foram observados em 2019 para todos os tratamentos estudados, ao passo que, na camada 0,20 a 0,40 m, os menores valores foram em 2019, para T1, T2, T3 e T6, e em 2019 e 2020 no T4.

Além disso, na camada 0,20 a 0,40 m também foi notada diferença entre os tratamentos em cada ano avaliado, sendo que em 2018, o T1 apresentou os menores valores de H+Al, se comparado ao T2. Em 2019, o T2 mais eficiente se comparado ao T5 e, em 2020, o T4 resultou em valores mais satisfatórios de H+Al, se comparado aos T1, T2, T3 e T5. Deve-se considerar o incremento de MO em superfície ocasionado



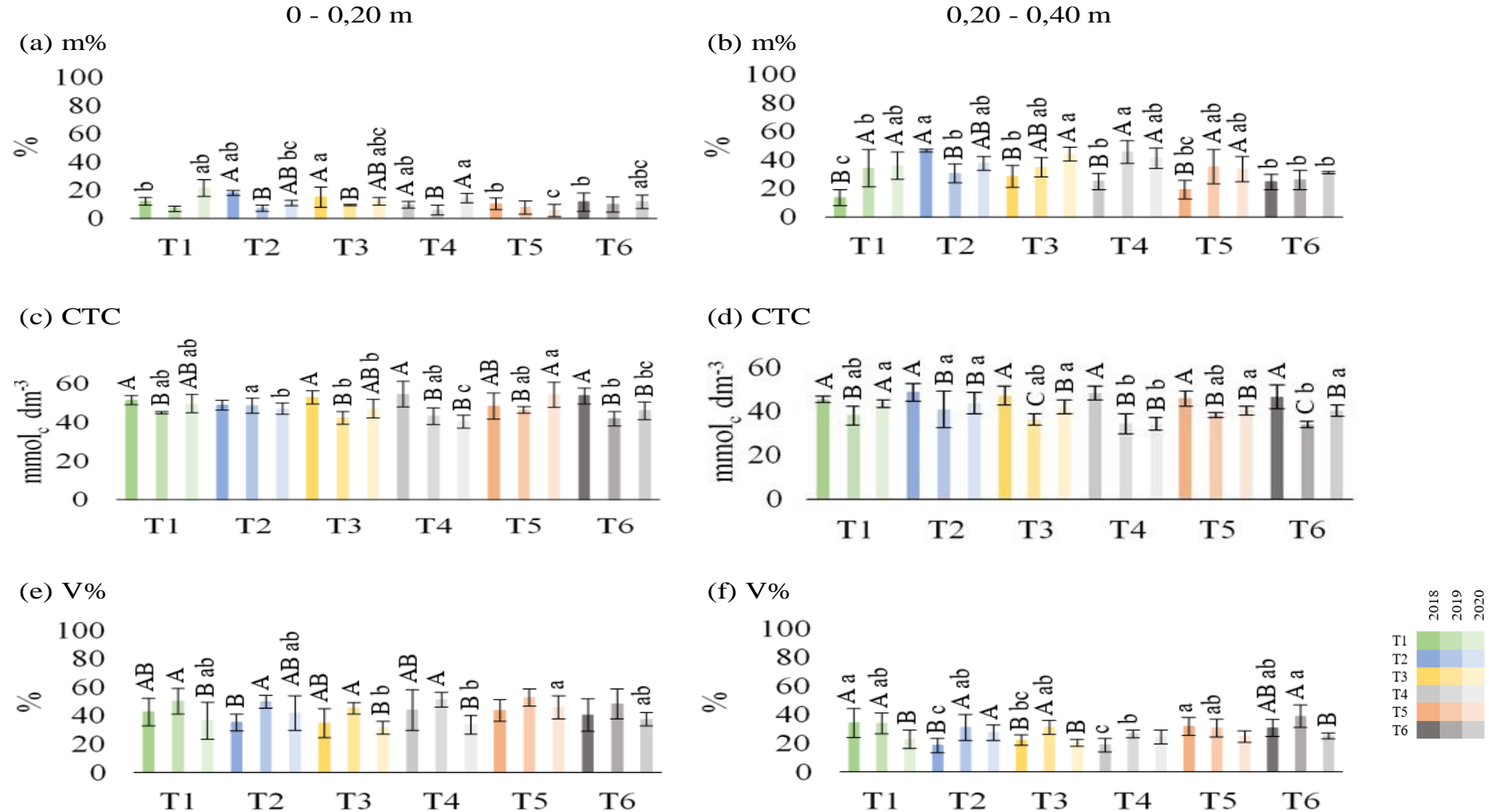
pelo SSD e que sua decomposição é um dos principais processos de adição de íons de  $H^+$  ao solo por meio da formação de compostos orgânicos saturados de  $H^+$ , aumentando a acidez do solo que varia de acordo com a quantidade e qualidade da MO (BARBOSA *et al.*, 2005). O incremento de Ca e  $S-SO_4^{2-}$  ocasionados pela gessagem alteram algumas características do solo (RAIJ, 1992), sendo que o S complexa o Al livre, reduzindo a sua toxidez (BOSSOLANI, 2018), ou seja, ocorre a reação do gesso com o  $Al^{3+}$  por precipitação e, como efeito, resulta em forma menos tóxica ( $AlSO_4^+$ ), ao mesmo tempo, os teores de  $Ca^{2+}$  e S aumentam no subsolo, como observado em 2019.

Comparando a análise final (2020) e inicial (Tabela 1), verifica-se a diminuição da acidez potencial em superfície (0-0,20 m) e, em contrapartida, o aumento da mesma na camada mais profunda, de 0,20-0,40 m, efeito este muito comum em SSD, quando do incremento de material vegetal (raízes) das plantas em rotação e do efeito do gesso de lixiviação de cargas ácidas (H + Al).

Para saturação por alumínio (m%) houve diferenças ( $p < 0,05$ ) para os anos e para os tratamentos. Na profundidade de 0 a 0,20 m (Figura 7a) os menores valores de m% foram constatados em 2019 para T2, T3 e T4, enquanto na profundidade de 0,20 a 0,40 m (Figura 7b), esses valores foram menores em 2018 no T1, T4 e T5, enquanto que em 2019, foram menores em T2 e T3.

Na camada de 0 a 0,20 m, em 2018, T1, T5 e T6 propiciaram as menores saturações por Al, se comparados ao T3. Na última avaliação (2020) foi o T5 que apresentou o menor valor quando comparado ao T4. Em subsuperfície (0,20-0,40 m), em 2018, foi o T1 quem proporcionou valores mais baixos de m% em relação ao T2, por efeito da maior dose de gesso. Em 2019, T1, T2 e T6 alcançaram os menores valores de m% em contraposição ao T4 e, na última análise (2020), novamente o T6 se mostrou mais eficiente se comparado ao T3. Outra observação pode ser feita confrontando as avaliações inicial (Tabela 1) e final, onde foi possível constatar a diminuição da saturação por alumínio em superfície após os três anos de gessagem, e o aumento da mesma em profundidade. Esse efeito, em solos muito arenosos podem ser atribuídos a baixa CTC do solo, que pela lixiviação do Al ligado aos ácidos orgânicos advindos da decomposição da palhada (SSD), retiram o  $Al^{3+}$  da solução e por troca iônica, o Al trocável adsorvido tem seus teores reduzidos e a CTC tende a ser ocupada pelas bases trocáveis mineralização da MO.

Figura 7. Alterações no m%, CTC e V% nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema de semeadura direta (SSD).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

As vantagens da utilização do gesso na agricultura estão relacionadas com a sua fácil penetração no perfil do solo, devido à maior solubilidade, em relação ao calcário. Ademais, ele pode fornecer Ca em profundidade, reduzindo a saturação por Al em subsuperfície (CAIRES *et al.*, 2011), contrariando os resultados aqui obtidos, onde a diminuição da m% ocorreu de forma mais significativa em superfície. De todo modo, a gessagem em superfície vem sendo indicada como alternativa de solução deste problema visto que a lixiviação do Ca ocasiona aumento de sua concentração e diminuição na saturação por Al na subsuperfície do solo após determinado tempo, que é variável com o tipo de solo, dose de gesso e condições climáticas e de manejo dos sistemas de produção (ZANDONÁ *et al.*, 2015). Em virtude dos maiores teores de MO no SSD, a quantidade de Al complexado tem muita importância (ZAMBROSI *et al.*, 2007), pois a interação entre o Al e a MO é uma das reações que mais influencia as propriedades dos solos ácidos, visto que a fração orgânica do solo possui a competência de complexar cátions, pelo maior aporte de palhada no sistema.

Na CTC do solo houve diferença ( $p < 0,05$ ) entre os anos e entre os tratamentos, onde em superfície T1, T3 e T5 propiciaram maior CTC em 2018 e 2020. Enquanto T4 e T6 somente em 2018 (Figura 7c). Em subsuperfície, o T1 exprimi valores elevados em 2018 e 2020, enquanto os demais tratamentos aportaram a maior CTC em 2018 (Figura 7d), demonstrando a maior lixiviação de bases, na maior dose de gesso (T1). Na avaliação realizada em 2019, o T2 proporcionou maior CTC nas duas profundidades, sendo que, na primeira se comparado aos T3 e T6 e, na segunda, ao T4 e T6. Entretanto, em 2020, na camada de 0 a 0,20 m, o T5 se mostrou mais eficaz quando confrontado ao T4. Na camada de 0,20 a 0,40 m, T1, T2, T3, T5 e T6 propiciaram valores superiores se comparados ao T4. Entre os anos 2017 (Tabela 1) e 2020 houve a diminuição da CTC em superfície e, em contrapartida aumento em subsuperfície, demonstrando o efeito da rotação de culturas e incremento de material orgânico (raízes) no SSD.

Os tratamentos que mais se destacaram em relação ao valor da CTC, foram T1, T2 e T5, que foram praticamente os mesmos que se sobressaíram na melhoria dos teores de Ca, Mg e K, em 2019 e 2020, nas duas camadas de solo. É interessante observar que a metodologia proposta por Vitti (T3), se baseia em valores de saturação por bases e CTC de camadas entre 0,20-0,60 m não foi significativo na melhoria da fertilidade do solo, pois, tanto a CTC, como V%, apresentam valores considerados de médio a baixo em subsuperfície, mesmo após 3 anos de gessagem. Entre os atributos químicos que afetam a movimentação dos nutrientes no perfil do solo, estão a CTC, a valência do

cátion e o pH. Solos com alta CTC apresentam maior capacidade de adsorção dos cátions, tornando-os menos suscetíveis à lixiviação. Com o aumento do pH, a CTC do solo aumenta e, como efeito, os cátions disporão de maior concentração de cargas para adsorção (SANTOS *et al.*, 2002), entretanto, aqui foi avaliado um solo arenoso de baixa CTC advindo dos minerais, e portanto, esperava-se efeito mais significativo do incremento da CTC via MO.

Observando a saturação por bases (V%), nota-se diferença ( $p < 0,05$ ) entre os anos e entre os tratamentos, em ambas as profundidades. Na camada de 0 a 0,20 m (Figura 7e) constata-se que T1, T3 e T4 propiciaram maior V% nos anos de 2018 e 2019, enquanto que o T2 em 2019 e 2020. Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 7f), T1 e T6 apresentaram maiores V% em 2018 e 2019, T2 em 2019 e 2020, e T3 em 2018.

Em relação aos tratamentos, em superfície verifica-se diferenças somente em 2020, onde o T5 se sobressaiu quando comparado ao T3 e ao T4. Em subsuperfície, no ano de 2018, houve incremento da V% em T1 e T5, quando comparado ao T2 e T4. Em 2019, foi o T6 que se distinguiu do T4. Comparando as análises realizadas em 2017 (Tabela 1) e em 2020 foi possível constatar que na camada de 0 a 0,20 m a V% se manteve igual enquanto de 0,20 a 0,40 m houve um decréscimo nesse valor.

A metodologia proposta por Demattê (T4) considera somente a porcentagem de argila presente na camada de 0,20 a 0,40 m do solo e, no caso desse estudo, a área experimental se encontra em uma faixa arenosa, com apenas  $71 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, por isso, a quantidade de gesso aplicada pode não ter sido suficiente para fornecer as bases necessárias para se aumentar/manter os valores da CTC e da saturação por bases, fundamental para que o solo mantenha sua fertilidade. Como visto nas figuras anteriores nas áreas onde foi manejado o T4, constata-se, na camada de 0-0,20 m, no ano 2020, baixos teores de Ca, K e valores de CTC e, na camada de 0,20-0,40 m, em 2018, baixos teores de Ca, Mg e K, enquanto que, em 2019, valores inferiores aos demais tratamentos para Ca, Mg e CTC, que interferem diretamente nos altos valões de V%, a ponto de se considerar o solo mais ou menos fértil.

#### 4.1.2. Física do solo

Em relação aos atributos físicos do solo foram analisadas 3 profundidades, sendo elas 0-0,05, 0,05-0,20 e 0,20-0,40 m em 2020, ano final do experimento (Tabela 2). Na camada de 0-0,05 m, foi possível observar os maiores valores de DMP no T4, em

relação ao T3 e, para agregados maiores que 2mm (AG>2) no T1 em comparação ao T2, na camada 0 - 0,05 m. Na camada de 0,05-0,20 m, o T1 apresentou maior DMP se comparado ao T6 e, na maior profundidade, de 0,20-0,40 m, observa-se diferenças para densidade do solo (DS), sendo T3 superior ao T1, para DMP com T5 maior que T1, T2 e T4, enquanto que AG>2, o tratamento T1 foi superior ao T2, T3, T5 e T6.

Tabela 2. Atributos físicos do solo em área de sistema de semeadura direta (SSD), nas profundidades de 0 a 0,05 m, 0,05 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em função das metodologias de recomendação da gessagem, Votuporanga- SP, safra 2019/20.

Tratamentos <sup>(1)</sup>	PT <sup>(2)</sup>	DS <sup>(3)</sup>	DMP <sup>(4)</sup>	AG>2 <sup>(5)</sup>
	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	kg dm <sup>-3</sup>	mm	%
0 - 0,05 m				
T1	43,95 <sup>ns</sup>	1,50	5,02 ab <sup>(6)</sup>	33,21 a
T2	46,49	1,47	4,48 bc	20,08 b
T3	46,75	1,46	4,23 c	29,99 ab
T4	47,24	1,42	5,32 a	28,85 ab
T5	44,93	1,53	4,80 abc	27,14 ab
T6	34,38	1,59	4,42 bc	29,91 ab
DMS	13,09	0,18	0,74	11,63
CV%	20,72	7,90	11,35	24,27
0,05 - 0,20 m				
T1	33,45	1,76	4,83 a	7,07
T2	36,75	1,69	4,71 ab	5,68
T3	35,05	1,74	4,65 ab	4,81
T4	36,07	1,72	4,74 ab	5,08
T5	34,74	1,71	4,63 ab	5,38
T6	35,83	1,75	4,46 b	4,29
DMS	9,89	0,13	0,33	6,04
CV%	19,03	5,48	5,14	23,06
0,20 - 0,40 m				
T1	43,53	1,66 b	4,53 b	10,54 a
T2	37,85	1,69 ab	4,51 b	1,41 b
T3	34,93	1,80 a	4,67 ab	2,27 b
T4	41,67	1,74 ab	4,47 b	4,65 ab
T5	34,93	1,77 ab	4,98 a	2,62 b
T6	38,69	1,77 ab	4,62 ab	4,16 b
DMS	9,71	0,13	0,39	6,38
CV%	18,30	5,17	6,06	29,77

<sup>(1)</sup> Tratamentos: T1: Caires e Guimarães (2016), T2: Sousa, Lobato e Rein (2005), T3: Vitti *et al.* (2008), T4: Demattê (1986), T5: Raij *et al.* (1996), T6: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); <sup>(2)</sup> Porosidade total; <sup>(3)</sup> Densidade do solo; <sup>(4)</sup> Diâmetro médio ponderado; <sup>(5)</sup> Agregados maiores que 2mm; <sup>(6)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Fonte: Elaboração da própria autora.

De maneira geral, pode-se afirmar que quanto mais elevada a densidade do solo, maior sua compactação, maior desagregação da estrutura e menor sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores as restrições para o crescimento do sistema radicular e desenvolvimento das plantas. Por acumular resíduos culturais no solo, a semeadura direta promove o acúmulo de carbono que beneficia a adsorção e infiltração de água e aumenta a sortividade do solo, porosidade total e macroagregação (SÁ *et al.*, 2014) sendo que esses benefícios podem aumentar com o uso da rotação ou sucessão de culturas, mas as respostas aqui avaliadas em 3 anos foram pouco significativas, por ser um solo muito arenoso, com baixa quantidade de agentes cimentantes no curto prazo.

São poucos os estudos sobre a ação de corretivos e condicionantes do solo, como o gesso agrícola, na qualidade dos agregados (OLIVEIRA *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2020) mas, sabe-se que a aplicação de gesso eleva a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo e, juntamente a MO serem considerados agentes cimentantes, que podem promover a maior agregação e estabilização de agregados pela formação de complexos argila -  $\text{Ca}^{2+}$  - MO das partículas da fração coloidal do solo (SIX *et al.*, 2004; SÉQUARIS, 2010), no médio e longo prazos. Assim como Müller *et al.* (2012), que observaram mudanças nas características físicas do solo após 50 meses da aplicação de gesso, como a diminuição da densidade do solo nos primeiros 0,15 m de profundidade, verifica-se que os tratamentos que apresentaram melhorias na estrutura do solo foram os de maior dose de gesso aplicados em 2017, evidenciando que os efeitos da aplicação do gesso podem ser mais pronunciados a médio e longo prazos no perfil do solo (Tabela 2). Resultados positivos na melhoria da estruturação do solo após aplicação de gesso também foram encontrados por Lebron *et al.* (2001) e Chi *et al.* (2012).

#### 4.1.3. Planta

Na safra 2017/18, para cultura do milho, houve diferenças ( $p < 0,05$ ) para altura de inserção da primeira espiga e para produtividade de grãos (Tabela 3), sendo que na primeira variável, o T5 apresentou espigas mais altas se comparado aos demais. Para a produtividade de grãos, o T1 apresentou maior produtividade se comparado ao T2, entretanto similar aos demais. O fornecimento de alguns nutrientes, o transporte de outros e a diminuição do  $\text{Al}^{3+}$  em profundidade ocasionados pelo uso do gesso podem ter induzido o crescimento radicular da planta com conseqüente aumento de

produtividade, na maior dose de gesso (T1). Em regiões de estresse hídrico, como o caso da estudada, o gesso agrícola pode ser utilizado para mitigar perdas de produtividade (ZANDONÁ, 2015).

Em 2018/19, para a cultura da soja, o T4 proporcionou maior altura de plantas se comparado ao T5, sendo essa a única diferença estatística observada para a cultura, ou seja, não houve efeito dos tratamentos para a produtividade da soja nesta safra, a qual, mesmo em solo arenoso foi acima de 4000 kg ha<sup>-1</sup>, considerada satisfatória para solos arenosos. Ainda não existe uma recomendação precisa de critérios de tomada de decisão e de doses de gesso a serem utilizadas na aplicação para a cultura de soja (CAIRES *et al.*, 2011b) e, embora haja benefícios nas propriedades químicas do solo proporcionadas pela aplicação do gesso, vários estudos realizados em solos do estado de Paraná, não constataram incremento na produtividade de soja com aplicação superficial em áreas sob semeadura direta (SORATTO *et al.*, 2010; RAMPIN *et al.*, 2011; NEIS *et al.*, 2010; CAIRES *et al.*, 2011b).

Tabela 3. Produtividade e características agrônômicas das culturas em área de sistema de semeadura direta (SSD) nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20.

Tratamentos <sup>(1)</sup>	Safr 2017/18			
	Milho			
	Altura inserção primeira espiga	Altura de plantas	Estande final	Produtividade
	----- m -----	-----	plantas ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
T1	1,05 b <sup>(2)</sup>	2,10 <sup>ns</sup>	68750	8746 a
T2	1,03 b	1,91	68750	5969 b
T3	1,01 b	2,06	71975	7045 ab
T4	1,04 b	2,11	68750	7459 ab
T5	1,15 a	2,07	68750	7300 ab
T6	1,05 b	2,04	67187	7959 ab
DMS	0,98	0,20	5818	2124
CV%	6,59	6,89	5,87	20,52
	Safr 2018/19			
	Soja			
	Altura inserção primeira vagem	Altura de plantas	Estande final	Produtividade
	----- m -----	-----	plantas ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
T1	0,05	0,77 ab	131667	4621
T2	0,05	0,77 ab	110833	4382
T3	0,05	0,83 ab	137500	5150
T4	0,04	0,85 a	122500	4530
T5	0,04	0,76 b	129166	4806
T6	0,06	0,78 ab	139166	4734

DMS	0,02	0,08	38346	893
CV%	18,17	6,87	16,19	12,96
Crotalária				
Produtividade de matéria seca				
kg ha <sup>-1</sup>				
T1		1983	b	
T2		2070	b	
T3		2284	ab	
T4		1898	b	
T5		2952	a	
T6		2440	ab	
DMS		675		
CV%		19,71		
Safrinha 2019/20				
Milho				
	Altura inserção primeira espiga	Altura de plantas	Estande final	Produtividade
	----- m -----	-----	plantas ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
T1	1,09 ab	2,26 ab	79167	7348
T2	1,03 b	2,22 ab	85833	7198
T3	1,08 ab	2,28 ab	81667	7750
T4	1,19 a	2,32 a	77500	7482
T5	1,06 ab	2,19 b	80833	7012
T6	1,13 ab	2,28 ab	79167	6927
DMS	0,13	0,12	11155	2221
CV%	8,18	3,56	9,17	20,22
Forragem				
Produtividade de matéria seca				
kg ha <sup>-1</sup>				
T1		4607	ab	
T2		4518	ab	
T3		4622	ab	
T4		5996	a	
T5		3325	b	
T6		3180	b	
DMS		1978,58		
CV%		30,01		

<sup>(1)</sup>Tratamentos: T1: Caires e Guimarães (2016), T2: Sousa, Lobato e Rein (2005), T3: Vitti *et al.* (2008), T4: Demattê (1986), T5: Rajj *et al.* (1996), T6: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Fonte: Elaboração da própria autora.

Na safrinha de 2018/19, o T5 conferiu maior produtividade de matéria seca da crotalária, se comparado ao T1, T2 e T4. Enquanto que na safra 2019/20, o T4 proporcionou maior altura de inserção de espigas e maior altura de plantas se comparado ao T2 e ao T5, respectivamente. Esse tratamento também foi o que



proporcionou maior produtividade de matéria seca de forragem se comparado ao T5 e T6.

Além da melhoria nos atributos do solo ocasionados pela rotação de culturas nesse sistema, onde a cultura atual consegue reaproveitar a nutrição realizada na safra antecessora, ocorre uma melhoria na eficiência do uso da água pelo milho (SILVA *et al.*, 2015), pois destaca-se o efeito a longo prazo da gessagem com o crescimento das raízes em profundidade e melhor absorção de nutrientes, propiciando melhor desenvolvimento da planta.

Vale ressaltar que em todas as safras, as produtividades de grãos obtidas foram maiores que a média nacional sendo elas: safra 2017/18 produtividade nacional de 5.169 kg ha<sup>-1</sup> de milho (CONAB, 2018), enquanto a média da área estudada foi 7.412 kg ha<sup>-1</sup>, safra 2018/19 com 3.206 kg ha<sup>-1</sup> de soja (CONAB, 2019) contra 4.704 kg ha<sup>-1</sup> e safra 2019/20 com 6.065 kg ha<sup>-1</sup> de milho (CONAB, 2020) comparado aos 7.286 kg ha<sup>-1</sup> aqui obtidos.

## 4.2. Sistema agropastoril

### 4.2.1. Fertilidade do solo

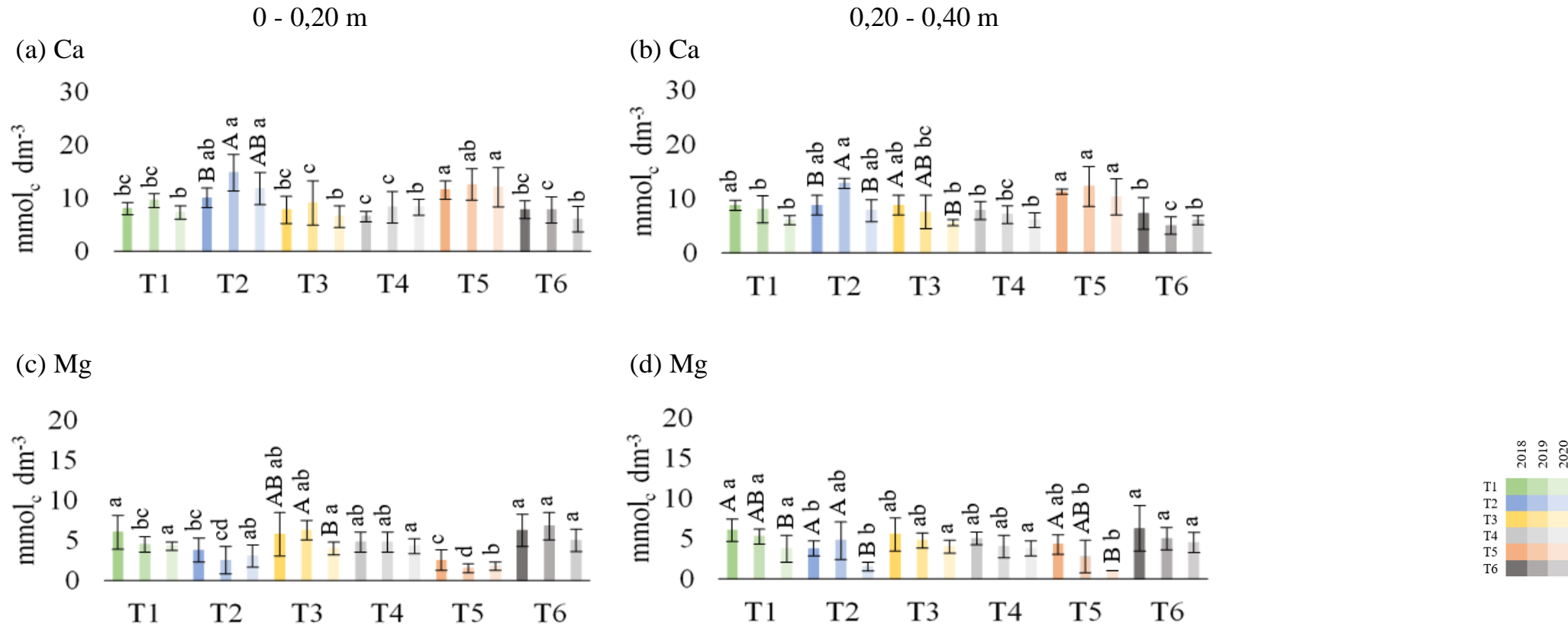
No sistema agropastoril, para os teores de Ca, houve diferenças ( $p < 0,05$ ) entre os anos e tratamentos, sendo que T2 proporcionou os maiores teores desse nutriente em 2019 e 2020, na camada de 0-0,20 m e, em 0,20-0,40 m, novamente o T2 foi mais eficiente em 2019, enquanto T3 foi superior em 2018 e 2019 (Figuras 8a e 8b).

Em relação aos tratamentos de gessagem, na profundidade de 0 a 0,20 m, em 2018, o T5 incrementou os teores de Ca, se comparado ao T4. Em 2019 destacou-se o T2 se comparado ao T3, T4 e T6 e, em 2020, T2 e T5 foram mais eficientes no incremento de Ca se comparados aos demais tratamentos. Na camada de 0,20 a 0,40 m, em 2018, o T5 proporcionou maiores teores de Ca se contraposto ao T4 e T6; enquanto que em 2019, T2 e T5 se mostraram mais eficientes em relação ao T6 e, em 2020, mais uma vez o T5 foi superior no incremento de Ca no solo, se comparado ao T1, T3, T4 e T6. Se comparar a análise inicial (Tabela 1) com a final verifica-se aumentos nos teores de Ca na camada de 0 a 0,40 m após 3 anos de aplicação de gesso. Portanto, de modo geral, os tratamentos onde houve gessagem apresentaram maior teor de Ca no perfil do

solo se comparado ao T6, onde não foi realizada tal prática, com destaque para os tratamentos que se baseiam na porcentagem de argila que foram os mais eficientes.

Explicando esse processo de aumento nos teores de Ca, de acordo com Nuernberg *et al.* (2005), a gessagem fornece Ca, sendo que a aplicação de 1 t/ha de gesso com 15% de umidade adiciona aproximadamente 200 kg do nutriente. Após a dissociação os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  participam do complexo de troca de cátions e ânions, respectivamente e, segundo Pavan e Bigham (1982), o par iônico  $\text{CaSO}_4^0$  move-se no perfil do solo, facilitando a lixiviação de complexos químicos solúveis neutros ( $\text{CaSO}_4^0$ ,  $\text{MgSO}_4^0$  e  $\text{K}_2\text{SO}_4^0$ ) ao subsolo, principalmente em solos arenosos de baixa CTC.

Figura 8. Alterações nos teores de Ca e Mg nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Considerando agora os teores de Mg na camada de 0-0,20 m (Figura 8c) houve diferenças em relação aos anos, sendo que o T3 propiciou os mais elevados teores em 2018 e 2019. Nota-se também que em 2018, T1 e T6 propiciaram maior quantidade desse nutriente se comparados ao T5; enquanto que em 2019, o T6 foi mais eficiente que o T5 e, em 2020 os tratamentos T1, T3, T4 e T6 acumularam mais Mg que o T5.

Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 8d), o T1, T2 e T5 apresentaram mais Mg nos anos de 2018 e 2019. Em 2018 e 2019, T1 e T6 foram melhores que T2 e T5, respectivamente e, em 2020, T1, T3, T4 e T6 foram superiores ao T2 e T5. Confrontando os teores obtidos na avaliação inicial (Tabela 1) aos da avaliação final (2020) constata-se a diminuição desse nutriente nas camadas de solo aqui avaliadas.

Verifica-se que os tratamentos que mais ofereceram Ca, tanto em superfície como em subsuperfície, levaram à redução dos teores de Mg em todo perfil do solo. Em experimento realizado em Latossolo Vermelho no estado do Paraná, Caires *et al.*, (2004) observaram que apesar de aumentar os teores de Ca e S, o gesso diminuiu o teor de Mg no solo. Também Rodrigues *et al.*, (2015) relataram que 24 meses após aplicação de gesso houve aumento nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo, na profundidade de 0 a 0,20 m em função do aumento da dose de gesso, sendo que, para os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  no solo houve relação inversa à apresentada para os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ . Outro estudo evidencia a redução do Mg trocável no solo nas camadas de 0-0,10 e 0,20-0,40 m mostrando a movimentação desse elemento para as camadas mais profundas pela formação do par iônico  $\text{MgSO}_4$  que possui alta mobilidade no perfil do solo (LOPES, 2020). Corroborando com esse resultado, Caires *et al.* (2003) observaram a redução dos teores de Mg nas camadas superficiais, mesmo em solo mais argiloso.

Para os teores de K, as diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) foram notadas em relação aos anos e aos tratamentos. Na camada de 0-0,20 m, o T1 ficou superior, em 2020, em relação aos demais anos. Os tratamentos T2, T3, T4 e T5 apresentaram maiores teores de K em 2019 e o T6 em 2019 e 2020 (Figura 9a). Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 9b), T1, T3, T4 e T6 foram superiores nos anos de 2018 e 2020, quando comparados à 2019, e os tratamentos T2 e T5 foram superiores em 2020.

Na camada de 0-0,20 m, agora analisando a variação dos teores de K em cada tratamento, constata-se que em 2019, o T3 proporcionou maiores teores de K se comparado ao T1 e, em 2020, o T6 foi mais eficiente que o T5. Na camada de 0,20-0,40 m, no ano 2018, T3 e T4 apresentaram teores superiores ao T2 e T5.

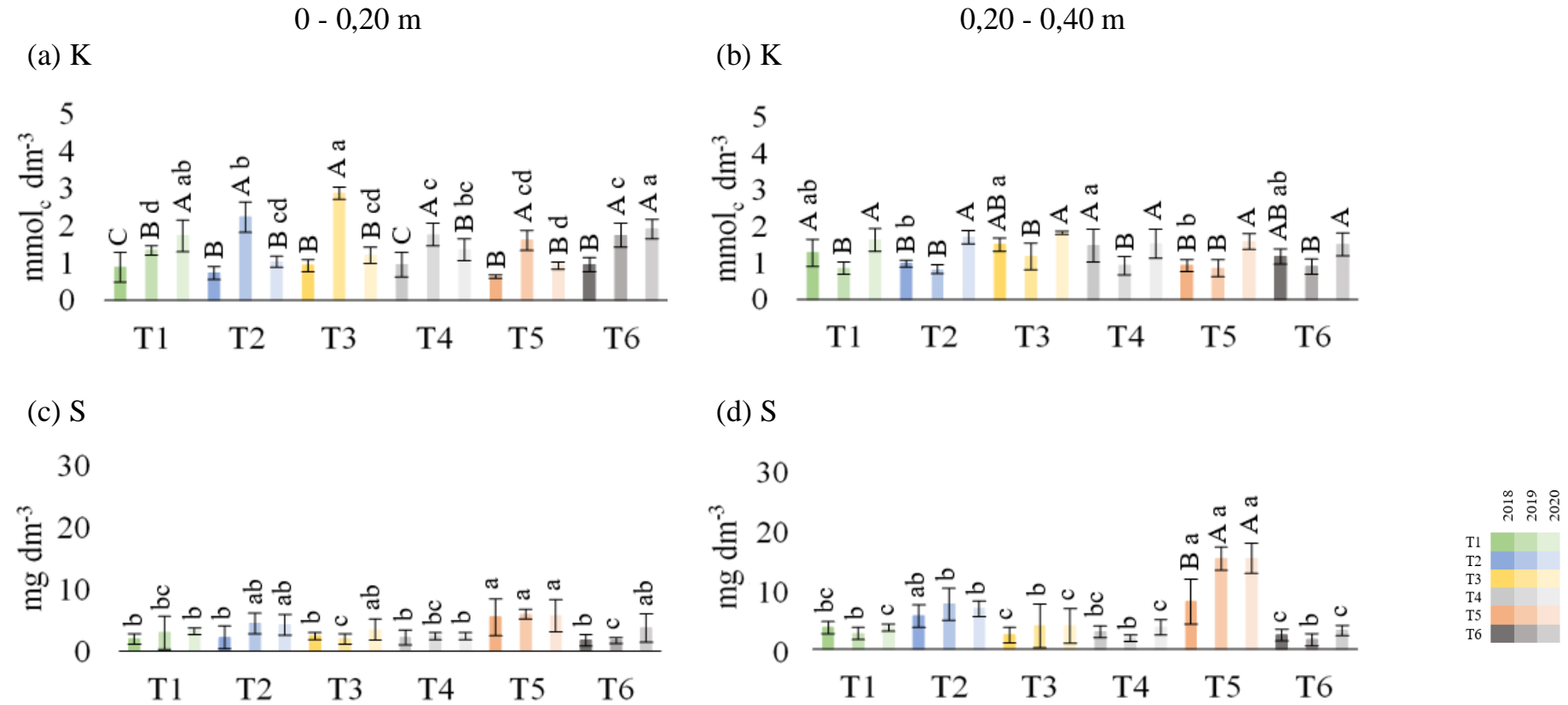
Ainda, ao se confrontar os teores iniciais (Tabela 1) aos finais de K, houve decréscimo nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. A ação do gesso no solo pode apresentar a desvantagem de ocasionar a lixiviação de  $Mg^{2+}$  e de  $K^+$  (CAIRES *et al.*, 2004; RAMPIM *et al.*, 2011), devido a séria liotrópica de afinidade à CTC. O uso de gesso pode resultar em intensa movimentação de nutrientes, especialmente de K e Mg (CAIRES *et al.*, 2003) por ocorrer a redistribuição das bases ao longo do perfil pela presença do sulfato no gesso. Em consequência do aumento significativo das concentrações de  $Ca^{2+}$  pode ocorrer inibição competitiva entre  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$  (RAIJ, 2008) prejudicando a disponibilidade dos mesmos nas profundidades aqui estudadas.

Com relação aos teores de S constata-se diferenças ( $p < 0,05$ ) para os tratamentos nas duas profundidades e para os anos na profundidade de 0,20-0,40 m. O T5 foi o que mais forneceu S ao sistema agropastoril. Em superfície (Figura 9c), na avaliação realizada em 2018, o T5 forneceu mais S ao solo se comparado aos demais tratamentos, em 2019 o T5 foi superior ao T3 e T6 e, em 2020, superior ao T1 e T4.

Na camada subsuperficial (Figura 9d), o T5 forneceu mais S se comparado ao T3 e T6 em 2018, aos demais tratamentos em 2019, e ao T1, T3, T4 e T6, em 2020. Também nota-se que em 2019 e 2020 foram os anos com maior aporte de S na camada de 0,20-0,40 m. Comparando a análise inicial (Tabela 1), realizada em 2017, com a realizada em 2020 evidencia que após 3 anos aplicando gesso, os teores de S na camada de 0-0,20m se mantiveram, enquanto que de 0,20-0,40m houve pequeno aumento de S, ou seja, mesmo com reaplicação anual de gesso, em solos arenosos, a lixiviação de  $S-SO_4^{2-}$  é intensa.

O T5, na metodologia proposta por Raij, onde se considera a porcentagem de argila na camada 0,20-0,40 m tem se mostrado eficiente em relação a distribuição dos cátions no perfil do solo, neste caso, principalmente em relação ao Ca e S. Fois *et al.* (2017) constataram que após uso de gesso, o teor de S aumentou nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo que o maior acúmulo de S ocorreu na camada de solo mais profunda (0,20-0,40 m). Também Lopes (2020), em trabalho com doses de gesso, constatou que este insumo eleva o teor de  $S-SO_4^{2-}$  nas camadas de 0 a 0,10 e 0,10-0,20 m. A migração de S da camada superficial às camadas mais profundas ocorre devido à alta mobilidade do sulfato quando forma um par iônico neutro com o íon Ca (RAIJ, 2008; SORATTO; CRUSCIOL, 2008).

Figura 9. Alterações nos teores de K e S nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP).



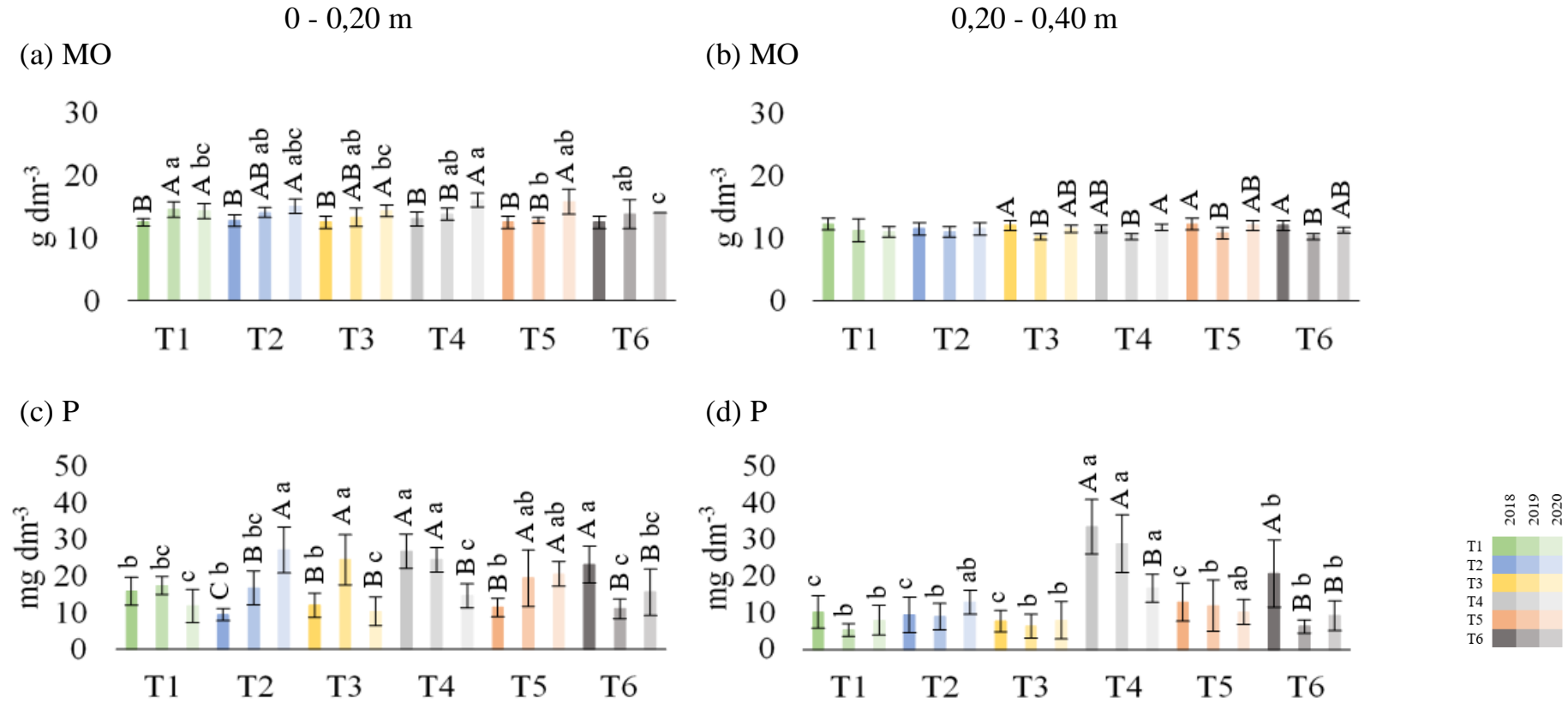
Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Em relação a MO, a diferença foi notada tanto para os anos como para os tratamentos estudados. Em relação aos anos, na profundidade de 0-0,20 m (Figura 10a), em 2019 e 2020 foram obtidos os maiores teores de MO nos tratamentos T1, T2 e T3 e o ano de 2020 se destacaram T4 e T5. Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 10b), os anos de 2018 e 2020 foram mais efetivos nos tratamentos T3, T4, T5 e T6. Analisando os tratamentos, em superfície e a cada ano nota-se que, em 2019, o T1 proporcionou maiores teores de MO se comparado ao T5, e, em 2020, o tratamento que sobressaiu foi o T4 se comparado ao T6. Ao se comparar os teores de MO da área experimental em 2017 (Tabela 1) com os teores obtidos ao fim do trabalho, em 2020, houve aumento da MOS na camada de 0-0,20 m e a manutenção desses teores na camada 0,20-0,40 m, demonstrando a eficácia dos SAP no incremento de carbono no solo (FONTANELI *et al.*, 2000; SANTOS *et al.*, 2011; SPERA *et al.*, 2010a; CHIODEROLI *et al.*, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2012).

O consórcio com *Urochloa brizantha* se destaca pela elevada capacidade de produção de matéria seca, tolerância à deficiência hídrica, absorção de nutrientes em camadas mais profundas do solo e reciclagem de nutrientes para a melhoria ou manutenção da fertilidade do solo, principalmente nas camadas superficiais. Isso ocorre pela absorção dos nutrientes em profundidade que se acumulam em sua parte aérea e raízes que, na superfície do solo, ficam disponíveis para os cultivos subsequentes após processo de mineralização. O uso do gesso, por melhorar o ambiente radicular em profundidade, potencializa o crescimento das raízes das forrageiras e, conseqüentemente, aumenta os benefícios dos consórcios em SAP. De acordo com Wendling *et al.* (2005), os resíduos de biomassa seca das plantas permitem recuperar os teores de matéria orgânica do solo (MOS) a valores próximos ao original ou até mesmo aumentá-los no médio e longo prazos. Esse sistema também pode reduzir a variação no teor de MOS que ocorre com a mudança de componentes dos sistemas, aumentando com a fase pastagem e reduzindo com a fase lavoura de grãos (VILELA *et al.*, 2011).

As diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) relacionadas aos teores de P foram em relação aos anos e também aos tratamentos. Na profundidade de 0-0,20 m (Figura 10c) tem-se uma variação entre os anos, sendo que o T2 apresentou maiores teores em 2020, T3 em 2019, T4 em 2018 e 2019, T5 em 2019 e 2020 e T6 em 2018. Na profundidade de 0,20-0,40 m (Figura 10d), o T4 foi superior em 2018 e 2019, e o T6 em 2018.

Figura 10. Alterações nos teores de MO e P nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.



Considerando a camada superficial, a avaliação realizada em 2018 apresentou maiores teores de P em T4 e T6, se comparados aos demais. Em 2019, T3 e T4 foram superiores ao T6 e, em 2020, o T2 foi mais eficiente se comparado ao T1, T3 e T4. Em subsuperfície, o T4 foi superior ao T1, T2, T3 e T5, em 2018. Em 2019, o mesmo tratamento (T4) disponibilizou mais P se comparado aos demais e, em 2020, novamente se destacou em relação aos T1, T2, T3 e T6. Se confrontar a avaliação realizada em 2017 (Tabela 1) com a de 2020, os teores de P diminuíram nas profundidades estudadas.

De acordo com Rampim *et al.* (2013), em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, com o aumento das doses de gesso, inicialmente ocorre redução de  $Al^{+3}$  e P nas camadas no solo. A redução do P disponível pode ocorrer também nas doses menores de gesso, pois com o incremento do  $CaSO_4^0$ , evidenciado pela elevação do teor de Ca, ocorre o deslocamento do Al para a solução aumentando o P-Al e diminuindo o P solúvel (ZAMBROSI *et al.*, 2007). Segundo Bilibio *et al.* (2010) podem acontecer alterações nos atributos químicos do solo com o emprego de diferentes sistemas de manejo, assim como com a utilização de calcário e gesso, especialmente com os elementos P, Ca e K.

Os valores de pH diferiram ( $p < 0,05$ ) em relação aos anos e aos tratamentos nas duas profundidades avaliadas, sendo que na camada de 0-0,20 m (Figura 11a), o pH foi maior nos anos de 2019 e 2020 nos tratamentos T2, T3 e T4. Também o T2 apresentou maiores valores de pH se comparado ao T1 e T6 em 2019, e ao T3 e T6 em 2020. Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 11b), o T2 teve seu melhor desempenho em 2019, além de, nesse mesmo ano, ser superior ao T6. Contrapondo a avaliação inicial (Tabela 1) à final (2020) constata-se a manutenção do valor do pH em superfície e o aumento em subsuperfície.

Em experimento realizado por Barreto (2016) o uso de gesso não modificou o pH do solo na camada de 0-0,20 m após o cultivo de milho sobre resíduos de forrageira. Enquanto que Caires *et al.* (2003), verificaram que o uso do gesso proporcionou alterações nas reações químicas do subsolo, aumentando o pH. É importante salientar que o gesso é considerado um condicionador de solo e afeta pouco o pH, o que acontece é que a lixiviação do Ca proporciona um aumento de sua concentração e diminuição na saturação de Al em subsuperfícies.

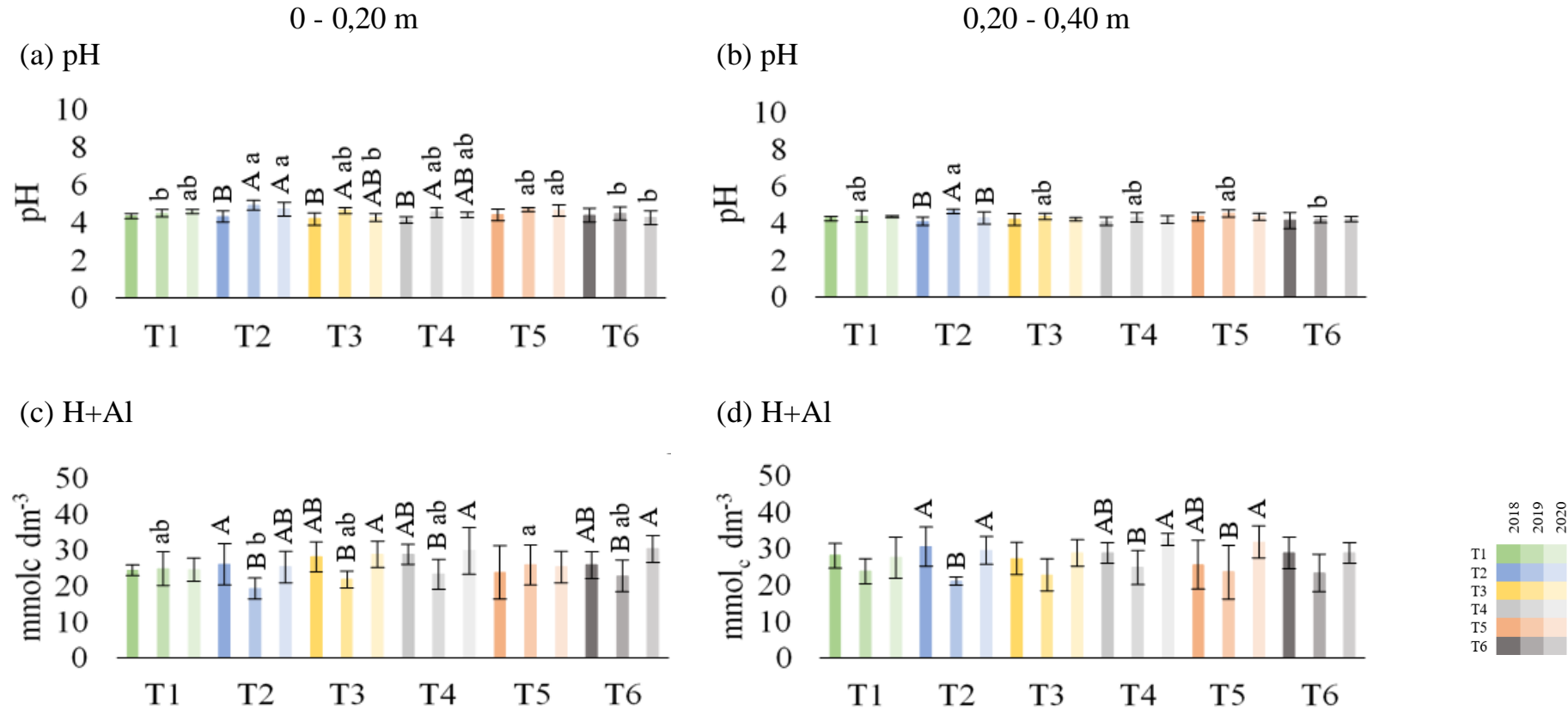
A acidez potencial apresentou diferença para os anos nas duas profundidades estudadas para os tratamentos somente na camada de 0-0,20 m. Na camada de 0-0,20 m (Figura 11c), a avaliação de 2019 apresentou os menores valores de  $H+Al$  em T2, T3,

T4 e T6, e em 2019, o T2 proporcionou menor valor se comparado ao T5. Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 11d), também em 2019, observa-se os menores valores de acidez potencial em T2, T4 e T5.

Se comparadas as análises inicial (Tabela 1) e final, realizadas em 2017 e 2020, houve pequeno aumento da acidez em superfície e em subsuperfície, resultado normal pelo incremento dos teores de MO no SAP.

Quanto menor o pH, maior a acidez do solo e, em 2019, os menores valores de pH, na camada de 0-0,20 m, foram proporcionados pelo T1, seguidos de T5 e T6. Assim, os maiores valores de H+Al, nesse mesmo ano e profundidade do solo, também foram encontrados nesses tratamentos, principalmente em T5. Nessa mesma ocasião, o maior incremento de MO em superfície foi advindo do T1, e a decomposição desses resíduos é um dos principais processos de adição de íons de H<sup>+</sup> ao solo, variando de acordo com a quantidade e qualidade da MO (BARBOSA *et al.*, 2005), lembrando que nesse estudo foi realizado consórcio do milho com *Urochloa brizantha*, que se destaca pela elevada capacidade de produção de matéria seca. Esses fatores podem e devem ter contribuído para o aumento da H+Al no decorrer do experimento, mesmo após a gessagem.

Figura 11. Alterações no pH e H+Al nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP).



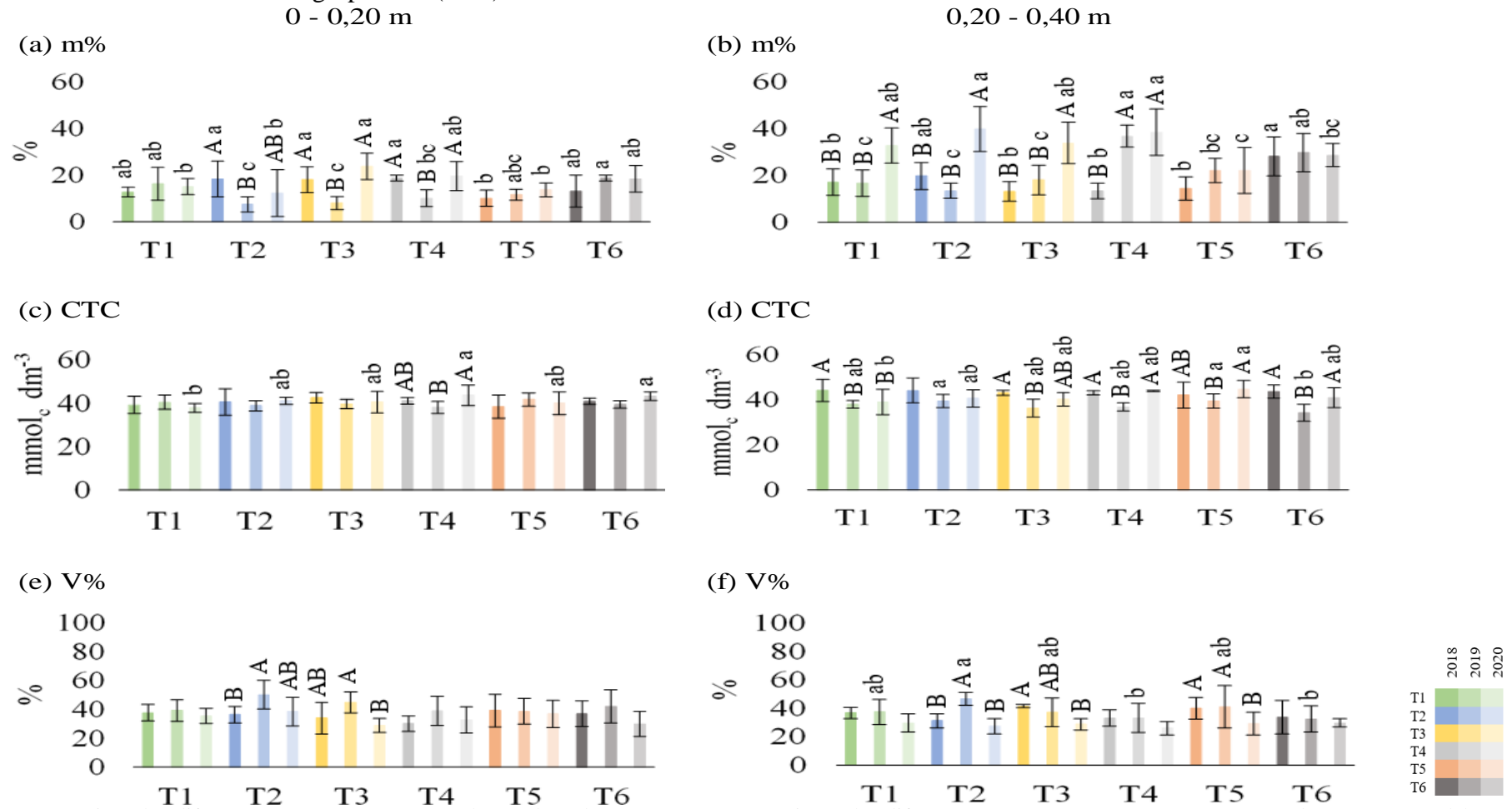
Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Para saturação por Al (m%) os anos e tratamentos diferiram nas duas profundidades avaliadas. Em se tratando dos anos, na camada de 0-0,20 m (Figura 12a), T2, T3 e T4 apresentaram os menores valores em 2019. Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 12b), T1, T2 e T3 apresentaram a menor m% em 2018 e 2019, e o T4 em 2018. Considerando os tratamentos por cada ano, na camada superficial, em 2018, constata-se que o T5 foi mais efetivo que T2, T3 e T4 para diminuir a m%. Em 2019, T2 e T3 proporcionaram os menores m% se comparados ao T6, e em 2020, T1, T2 e T5 foram mais eficientes se comparados ao T3. Em subsuperfície, no primeiro ano (2018), T1, T3, T4 e T5 diminuiram a m% do solo quando comparados ao T6. Em 2019, T1, T2 e T3 foram mais vantajosos se comparados ao T4 e, na última avaliação, em 2020, novamente o T5 foi melhor, dessa vez se comparado ao T2 e T4.

Se considerar somente a avaliação de caracterização (Tabela 1), realizada em 2017, e a última avaliação (2020) nota-se o aumento dos valores de m% em superfície e a diminuição da saturação na camada mais profunda.

Devido à sua solubilidade, o gesso consegue penetrar com facilidade no perfil do solo e, assim, fornecer Ca em profundidade, reduzindo a saturação por Al em subsuperfície. Borgmann (2019), em latossolo argiloso, observou que após o uso de gesso e de gesso + calcário, a saturação por Al decresceu sensivelmente com o aumento da profundidade do solo. Zandoná *et al.* (2015) corroborando com esses resultados, afirmaram que o gesso aplicado em superfície faz com que o Ca lixivie, ocasionando aumento da sua concentração em profundidade e diminuição na saturação por Al na subsuperfície do solo. Também Roth *et al.* (1986), Vitti *et al.* (2008) e Soratto *et al.* (2010) verificaram que o gesso atua diminuindo a saturação por alumínio e aumentando os teores de cálcio e enxofre, principalmente em camadas mais profundas do solo.

Figura 12. Alterações no m%, CTC e V% nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de sistema agropastoril (SAP).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

A CTC apresentou diferenças em relação aos anos e aos tratamentos, nas duas profundidades. Para os anos, na camada de 0-0,20 m (Figura 12c), o T4 apresentou a maior CTC nos anos 2018 e 2020, e na camada de 0,20-0,40 m (Figura 12d), T3, T4, T5 e T6 apresentaram valores elevados também em 2018 e 2020. Analisando a diferença entre os tratamentos, na camada superficial, e em 2020, T4 e T6 proporcionaram ao solo maior CTC se comparados ao T1. Em subsuperfície, na avaliação de 2019, T2 e T5 foram superiores ao T6, e em 2020, o T5 mostrou-se superior ao T1. Comparando as análises realizadas em 2017 (Tabela 1), para caracterização inicial do solo, e em 2020, ao final do período de avaliação, na camada de 0-0,20 m, a CTC não teve alteração e, na camada de 0,20-0,40 m a CTC aumentou, provavelmente por efeito da MO advinda do sistema radicular, principalmente do capim Marandu na fase pasto.

A matéria orgânica é quem mais contribui com a CTC do solo e em solos arenosos a inclusão de gramíneas forrageiras pode aumentar o aporte de resíduos vegetais ao solo acarretando em incremento de MO, principalmente no SAP, onde a fase pasto é mais longa. Um dos principais benefícios das gramíneas para o solo é o acúmulo de matéria orgânica em profundidade, muito em função de seu sistema radicular vigoroso. Entretanto, para que ocorra acúmulo de matéria orgânica em profundidade é necessário manter o sistema radicular ativo no solo por maior parte do tempo (SALTON *et al.*, 2014), como nas pastagens.

Nesse sentido, observa-se que alguns dos tratamentos que proporcionaram os maiores valores de MO foram T2, T4 e T5 (Figura 10) coincidindo com os que promoveram as maiores CTC (Figura 12). A aplicação do gesso supre parte da necessidade de Ca até as camadas mais profundas após movimentação vertical no solo. Isso favorece o aprofundamento das raízes permitindo que as plantas superem veranicos, absorvam água e nutrientes com maior eficiência (SOUSA *et al.*, 2001), resultando em maior crescimento e desenvolvimento de parte aérea. Por consequência, a quantidade de matéria seca aumenta, acrescentando MO ao solo e acarretando em maior CTC.

A saturação por bases diferiu em relação aos anos, nas duas profundidades, e em relação aos tratamentos na camada de 0,20-0,40 m. Da camada de 0-0,20 m (Figura 12e), a saturação por bases do T2 foi maior nos anos de 2019 e 2020, enquanto que T3 foi maior em 2018 e 2019. Em relação aos anos, na camada de 0,20-0,40 m (Figura 12f), T2 foi superior em 2019, enquanto T3 e T5 apresentaram maior V% em 2018 e 2019. Considerando os tratamentos nos diferentes anos, em 2019, o T2 proporcionou maior saturação por bases se comparado ao T4 e T6. Confrontando as avaliações de

caracterização inicial (Tabela 1) a final (2020), houve redução da V% em superfície e, em subsuperfície o valor não foi alterado após três anos de experimento.

A saturação por bases do solo está próxima ou abaixo de 50%, valor limite para se afirmar que o solo está adequado para cultivo. O T2 foi o tratamento que proporcionou a maior saturação por bases, que apesar de fornecer Ca ao sistema, não conferiu altos teores das outras bases Mg e K.

#### 4.2.2. Física do solo

Em relação as características físicas do solo foram analisadas 3 profundidades, sendo elas 0-0,05 m, 0,05-0,20 m e 0,20-0,40 m em 2020, ano final do experimento, sendo possível observar diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) em relação a densidade do solo, agregados  $> 2$  mm e diâmetro médio ponderado dos agregados (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos físicos do solo em área de sistema agropastoril (SAP), nas profundidades de 0 a 0,5 m, 0,5 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em função das metodologias de recomendação da gessagem, Votuporanga- SP, safra 2019/20.

Tratamentos <sup>(1)</sup>	PT <sup>(2)</sup>	DS <sup>(3)</sup>	DMP <sup>(4)</sup>		AG>2 <sup>(5)</sup>
	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	kg dm <sup>-3</sup>	Mm		%
0 - 0,05 m					
T1	41,34 <sup>ns</sup>	1,50 b <sup>(6)</sup>	4,46		35,43
T2	42,57	1,53 ab	4,51		32,92
T3	44,09	1,50 b	4,61		28,39
T4	48,53	1,62 ab	4,70		33,78
T5	42,01	1,70 a	4,73		24,54
T6	43,92	1,61 ab	4,66		24,52
DMS	13,09	0,18	0,74		11,63
CV%	20,72	7,90	11,35		24,27
0,05 - 0,20 m					
T1	31,43	1,71 ab	4,61		5,28 ab
T2	35,69	1,63 b	4,31		8,17 ab
T3	31,10	1,72 ab	4,45		3,45 b
T4	34,17	1,75 ab	4,53		5,20 ab
T5	36,75	1,64 ab	4,35		10,79 a
T6	33,87	1,77 a	4,47		6,09 ab
DMS	9,88	0,13	0,33		6,04
CV%	19,03	5,48	5,14		23,06
0,20 - 0,40 m					
T1	33,33	1,83 ab	4,87 ab		4,32
T2	34,75	1,71 b	4,44 c		5,80
T3	30,55	1,80 ab	5,09 a		4,82
T4	33,50	1,80 ab	4,77 abc		3,79
T5	34,43	1,76 ab	4,58 bc		3,81
T6	34,13	1,85 a	4,72 abc		3,16
DMS	9,71	0,13	0,39		6,38
CV%	18,30	5,17	6,06		29,77

<sup>(1)</sup>Tratamentos: T1: Caires e Guimarães (2016), T2: Sousa, Lobato e Rein (2005), T3: Vitti *et al.* (2008), T4: Demattê (1986), T5: Raij *et al.* (1996), T6: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); <sup>(2)</sup>Porosidade total; <sup>(3)</sup>Densidade do solo; <sup>(4)</sup>Diâmetro médio ponderado; <sup>(5)</sup>Agregados maiores que 2mm; <sup>(6)</sup>significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Fonte: Elaboração da própria autora.

Na camada de 0-0,05 m constata-se que o T5 apresentou a maior densidade quando comparado ao T1 e T3. De 0,05-0,20 m, a maior densidade foi verificada em T6 e, a menor, em T2. Nessa camada observa-se também que o T5 proporcionou maior quantidade de AG > 2 mm se comparado ao T3. Na maior profundidade, de 0,20-0,40 m, o T6 (sem gesso) também promoveu maior densidade se comparado ao T2 e, em relação ao DMP, o T3 proporcionou maiores valores contraposto ao T2.



A DS aumenta na profundidade do solo e, nesse caso, verifica-se que o tratamento sem a aplicação de gesso, ou seja, que não se beneficiou das correções ocasionadas pela gessagem, que favorecem o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas, foi o que apresentou a maior densidade em profundidade (0,05-0,40 m).

Avaliando os agregados é importante pontuar que os tratamentos que proporcionaram maior estabilidade foram os que, durante todo período estudado, resultaram nos maiores acúmulos de MO, provando a ação cimentante desse componente, que promove a formação de agregados estáveis. A matéria orgânica melhora a agregação das partículas do solo por meio de exudados orgânicos produzidos por microorganismos do solo, provenientes da sua decomposição (MAIRHOFER *et al.*, 2012), melhorando assim a porosidade do solo e acarretando em melhor infiltração de água, disponibilidade de nutrientes e diminuição da compactação do solo. Além da fração mineral, a fauna do solo, raízes e variáveis ambientais também favorecem a formação dos agregados do solo (SALTON *et al.*, 2008).

#### 4.2.3. Planta

Em relação as características agronômicas das culturas (Tabela 5), em todas as safras foi possível observar diferenças em algumas variáveis, como altura de plantas, estande, produtividade de grãos e de matéria seca.

Na safra 2017/18, o milho diferiu em altura de plantas, sendo que o T1 apresentou plantas mais altas se comparado ao T4, e ao estande final, em que o T2 tinha mais plantas que o T4. Na safra 2018/19, o T3 favoreceu o desenvolvimento do capim Marandu se comparado aos T1 e T2, proporcionando a maior produtividade de matéria seca da forrageira. Com a soja produzida na safra 2019/20, os tratamentos diferiram em relação à altura de plantas, sendo o T1 superior ao T5. No estande final, destaca-se o T3 superior em plantas em relação ao T1, T2, T5 e T6, enquanto que na produtividade de grãos, o T3, com maior estande superou os tratamentos T2, T5 e T6.

Tabela 5. Produtividade e características agrônômicas das culturas em área de sistema agropastoril (SAP), após aplicação de gesso por diferentes metodologias, Votuporanga-SP, nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20.

Safr 2017/18					
Milho					
Tratamentos <sup>(1)</sup>	Altura inserção primeira espiga	Altura de plantas	Estande final		Produtividade
	----- m -----	-----	plantas ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>
T1	1,07 <sup>ns</sup>	2,12 a <sup>(2)</sup>	66146	bc	8139
T2	1,04	1,93 ab	73437	a	6356
T3	1,01	1,95 ab	70312	abc	7146
T4	1,00	1,88 b	65104	c	6300
T5	1,03	1,95 ab	66145	bc	6152
T6	0,98	1,94 ab	71354	ab	7764
DMS	0,10	0,20	5818,19		2124
CV%	6,59	6,89	5,87		20,52
Safr 2018/19					
Forragem					
Produtividade de matéria seca					
kg ha <sup>-1</sup>					
T1	1400 b				
T2	1400 b				
T3	1650 a				
T4	1575 ab				
T5	1450 ab				
T6	1500 ab				
DMS	233,35				
CV%	10,35				
Safr 2019/20					
Soja					
	Altura inserção primeira vagem	Altura de plantas	Estande final		Produtividade
	----- m -----	-----	plantas ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>
T1	0,11	0,95 a	190000	b	4915 ab
T2	0,12	0,88 ab	195000	b	4553 b
T3	0,12	0,90 ab	235833	a	5511 a
T4	0,12	0,91 ab	205833	ab	5319 ab
T5	0,12	0,86 b	186666	b	4444 b
T6	0,11	0,93 ab	191666	b	4501 b
DMS	0,02	0,08	38347		893
CV%	18,17	6,87	16,19		12,96

<sup>(1)</sup>Tratamentos: T1: Caires e Guimarães (2016), T2: Sousa, Lobato e Rein (2005), T3: Vitti *et al.* (2008), T4: Demattê (1986), T5: Rajj *et al.* (1996), T6: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Fonte: Elaboração da própria autora.

Nesse sistema de produção (SAP), observa-se também que a média de produtividade de grãos nas safras 2017/18 (milho) foi de 6.976 kg ha<sup>-1</sup>, e em 2019/20

(soja), foi de 4.873 kg ha<sup>-1</sup>, maiores que a média nacional de 5.169 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2018) e 3.379 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2020), respectivamente.

O T3, responsável pela maior produção de matéria seca da forragem também proporcionou, posteriormente, maior estande final e produtividade da soja. Esse tratamento de gessagem, por suas características, propiciou um ambiente mais favorável ao desenvolvimento do capim Marandu e, conseqüentemente, esse desenvolvimento causou efeito positivo no crescimento da soja. Espécies com sistema radicular volumoso e agressivo, como é o caso do gênero *Urochloa*, tem colaborado para a melhoria das condições físicas do solo em áreas com sistema de SAP (LOSS *et al.*, 2011; FONSECA *et al.*, 2007). Por ter como característica um grande desenvolvimento radicular, a forragem consegue absorver água e nutrientes em profundidade e reciclar esses nutrientes, deixando-os disponíveis em camadas menos profundas do solo, facilitando o aproveitamento desses nutrientes por culturas sucessoras. Torres *et al.* (2008) relataram os benefícios das plantas de coberturas nas propriedades do solo e na produtividade das culturas resultante da produção de matéria seca e do acúmulo com posterior liberação de nutrientes ocasionado pela decomposição da palhada.

#### 4.3. Pastagem convencional

##### 4.3.1. Fertilidade do solo

Na pastagem convencional (PAST) houve diferenças nas duas profundidades do solo em relação aos anos, dentro de cada tratamento e para os tratamentos por cada ano para os teores de Ca. Na Figura 13a verifica-se que T5 e T6 tiveram os maiores incrementos desse nutriente na avaliação realizada em 2019. Enquanto, na Figura 13b, observa-se que T1 e T6 apresentaram maiores acréscimos de Ca nas avaliações feitas em 2018 e 2019.

Em 2018, na profundidade de 0-0,20 m, o T5 se mostrou mais eficiente no incremento de Ca se comparado ao T2. Em 2019, T5 e T6 foram mais eficientes que os demais tratamentos, e em 2020, novamente o T5 apresentou maiores teores de Ca, agora se comparado ao T1. Na camada de 0,20-0,40 m, novamente o T5 foi o que mais se destacou em se tratando de Ca, quando comparado ao T2, em 2018, e ao T1 e T3, em 2020.

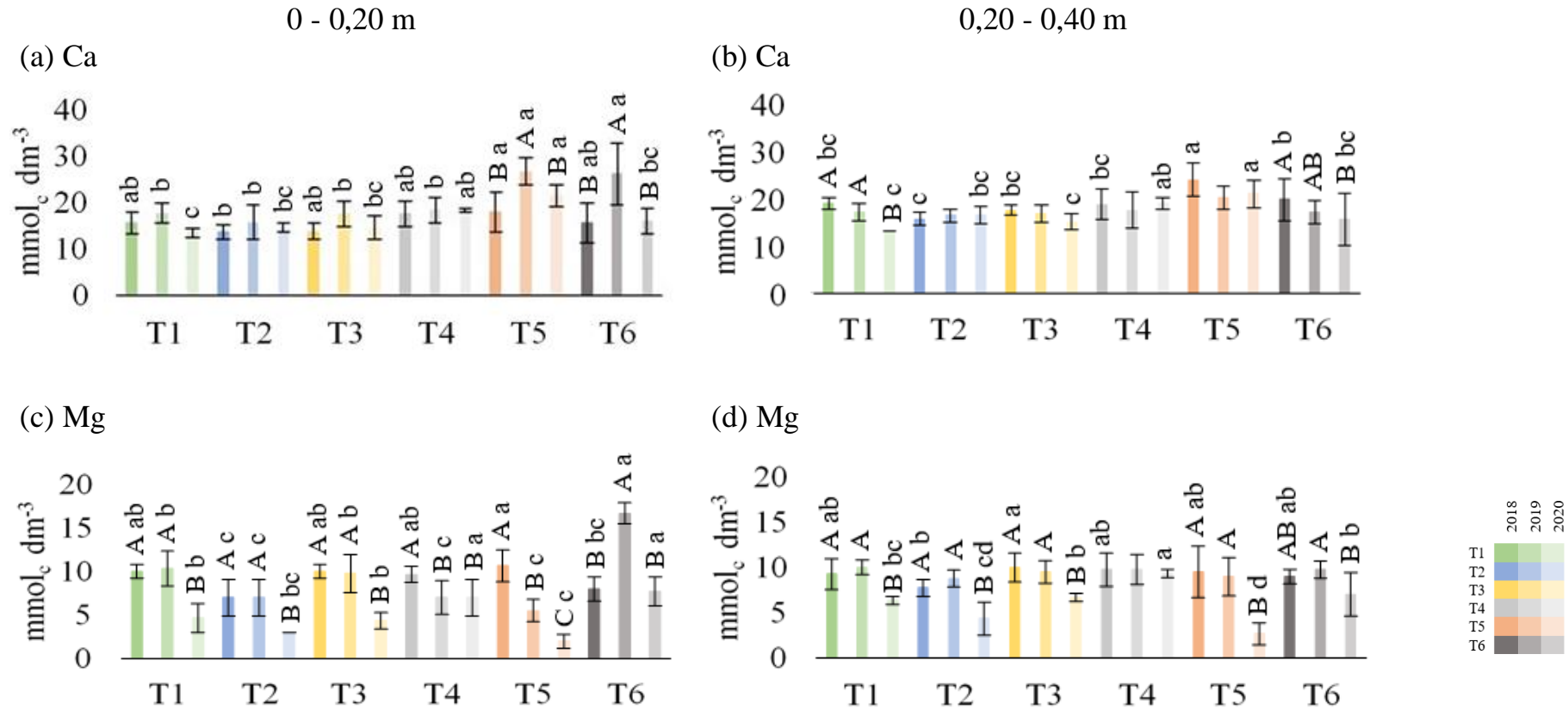
Se comparar os teores de Ca obtidos na caracterização da área (Tabela 1), realizada em 2017, com a última, realizada em 2020, verifica-se que os teores aumentaram em superfície e diminuíram em subsuperfície.

O T5, proposto por Raij, tem se mostrado eficiente no fornecimento de Ca em todos os sistemas aqui estudados (SSD, SAP e PAST). Um dos problemas que podem limitar a produtividade das pastagens em solos de Cerrado é a deficiência de Ca associada ou não à toxidez de Al (SOUSA *et al.*, 2001). O gesso agrícola, quando aplicado na dose correta, pode ser utilizado como tentativa de diminuir este problema, pois fornece Ca em profundidade, proporcionando aumento do crescimento radicular e conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes, maior produção e melhor qualidade de forragem, o que pode ainda desencadear uma série de outros benefícios ao solo e para as plantas.

Os teores de Mg apresentaram diferença ( $p < 0,05$ ) em relação aos anos, sendo que, na profundidade de 0-0,20 m (Figura 13c), os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram maiores teores em 2018 e 2019, enquanto que T4 e T5 também em 2018, e T6 em 2019. Na profundidade de 0,20-0,40 m (Figura 13d), todos os tratamentos exibiram os maiores teores de Mg nos anos de 2018 e 2019.

Em relação aos tratamentos por ano, na camada superficial, em 2018, o T5 foi superior ao T2. Em 2019, o T6 propiciou maiores teores de Mg se comparado ao T2, T4 e T5, e em 2020, T4 e T6 tiveram os maiores teores se comparados ao T5. Em subsuperfície, no ano de 2018, o T3 foi superior ao T2, e em 2020, o T4 ao T5. Se comparar as avaliações iniciais (Tabela 1) e final (2020), o teor de Mg diminuiu nas duas profundidades estudadas, resultado da exportação de forragem no pastejo e lixiviação de Mg após gessagem anual. Rampim *et al.* (2011) também verificaram que a prática da gessagem apesar de proporcionar aumento de Ca e S nas camadas do solo, reduz os teores de Mg, visto que ocorre o arraste de cátions, sendo o  $Mg^{2+}$  Mg pode ser todo lixiviado para camadas mais profundas que 0,40 m. Isso pode explicar o ocorrido nessa área do experimento visto que os tratamentos que mais adicionaram Ca ao sistema foram também os que apresentaram menores teores de Mg nas profundidades e anos de avaliação. Caires *et al.* (2003), após 32 meses da gessagem observaram que o gesso continuou promovendo a lixiviação de Mg em maiores profundidades.

Figura 13. Alterações nos teores de Ca e Mg nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

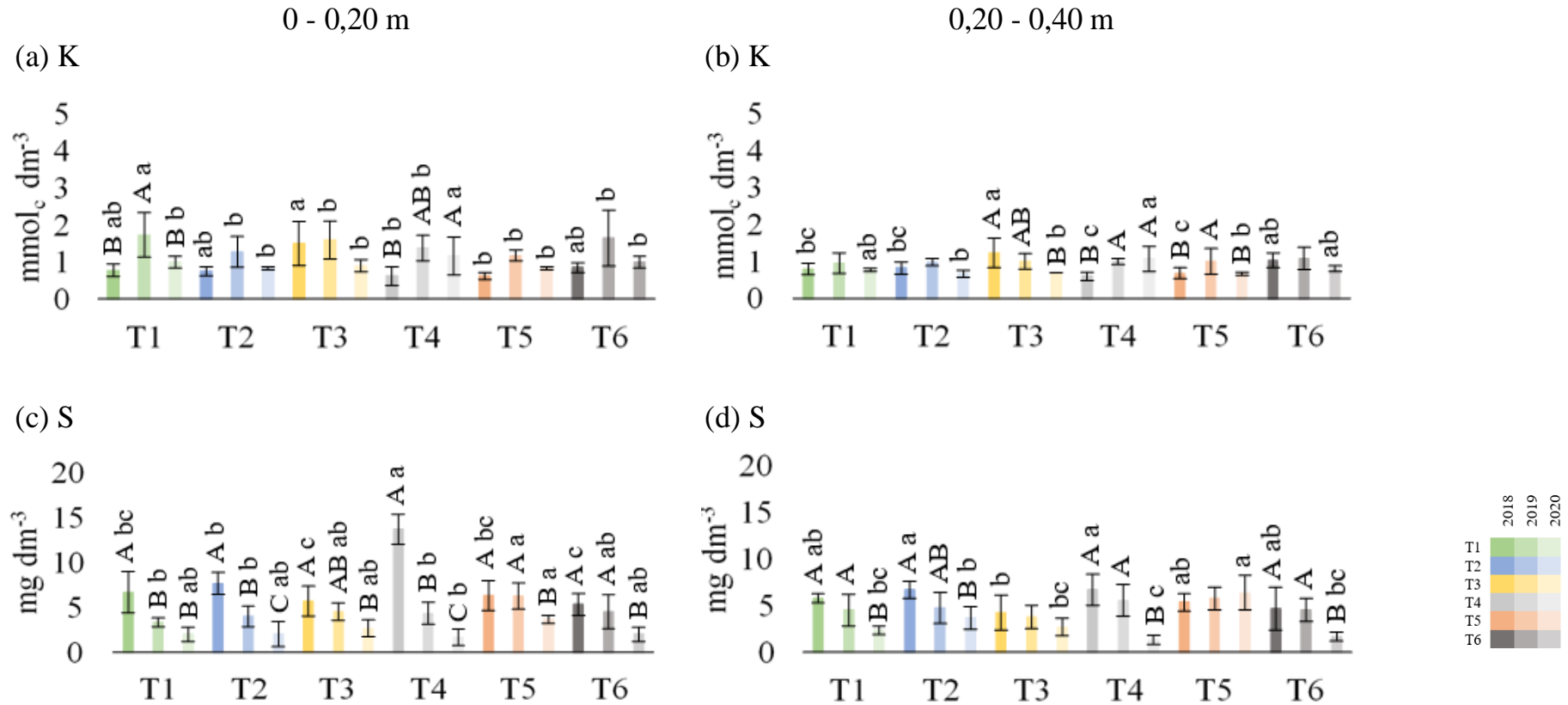
Os teores de K apresentaram diferenças em relação aos anos e aos tratamentos nas duas profundidades avaliadas. Na camada de 0 a 0,20 m (Figura 14a) o T1 propiciou os maiores valores em 2019, e o T4 em 2019 e 2020. Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 14b) o T3 apresentou maior teor de K em 2018 e 2019, o T4 em 2019 e 2020, e o T5, em 2019.

Considerando os tratamentos em cada ano e por profundidade constata-se que em superfície, em 2018, o T3 apresentou maiores teores de K se comparado ao T4 e T5. Em 2019, o T1 apresentou maiores teores se comparado aos demais tratamentos, e em 2020, o T4 se destacou quando comparado aos demais tratamentos. Em subsuperfície, em 2018, o T3 foi superior se confrontado com T4 e T5, enquanto em 2020, foi o T4 que superou T2, T3 e T5.

Ainda, se comparar a caracterização realizada em 2017 (Tabela 1) com a avaliação de 2020, os teores de K não se modificaram na profundidade 0-0,20 m, pela ciclagem do nutriente na pastagem, entretanto, foram reduzidos de 0,20-0,40 m, por efeito de lixiviação de K.

Mais uma vez é possível observar que os tratamentos que proporcionaram maior incremento de Ca ao perfil do solo foram os mesmos que diminuíram os teores de K no perfil do solo. Pares iônicos neutros  $K_2SO_4^0$  e  $MgSO_4^0$ , além do  $CaSO_4^0$ , formados após a reação do gesso no solo, apresentam grande mobilidade no perfil (PAVAN *et al.*, 1984; DIAS, 1992). A lixiviação de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e de  $K^+$  também foi constatada por Dias (1992), que verificou que o uso de gesso em solos sem problemas de acidez subsuperficial pode aumentar a lixiviação de bases pela formação de pares iônicos  $CaSO_4^0$ ,  $MgSO_4^0$  e  $K_2SO_4^0$  e reduzir o seu nível de fertilidade, como observado por Pavan (1986).

Figura 14. Alterações nos teores de K e S nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Relacionado ao enxofre (S) houve diferenças em relação aos anos dentro de cada tratamento e aos tratamentos nos diferentes anos. Na profundidade de 0-0,20 m (Figura 14c), os tratamentos T1, T2 e T4 apresentaram maior incremento de S na avaliação realizada em 2018, enquanto T3, T5 e T6 em 2018 e 2019. Em 2018, o maior incremento de S foi propiciado no T4 em comparação ao T3 e T6. Em 2019, o T5 foi superior ao T1, T2 e T4, e em 2020, o T5 se sobressaiu ao T4. Na camada de 0,20-0,40 m (Figura 14d), T1, T2, T4 e T6 mostraram valores mais elevados de S nas avaliações de 2018 e 2019. De todo modo, nessa profundidade, em 2018, T2 e T4 se destacaram em relação ao T3, e em 2020, o T5 sobre o T4.

De modo geral, após três anos de gessagem, os teores de S diminuíram nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, tanto pela exportação no pastejo, quanto por efeito de lixiviação em solo arenoso.

O T5, que forneceu mais Ca ao sistema, também foi um dos tratamentos mais eficientes no fornecimento de S, porém, após se formar pares iônicos com  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$ , pode ter lixiviado para camadas abaixo das estudadas.

Em pastagens o gesso pode ser utilizado para melhorar o ambiente radicular em subsuperfície, principalmente, em casos de espécies exigentes em relação a nutrição do solo (VILELA *et al.*, 2000), e/ou como fonte de enxofre. Dentre as controvérsias sobre os efeitos da gessagem ressalta-se o acúmulo de sulfato no perfil de solos cultivados que favorece a lixiviação de íons, resultando em empobrecimento desses solos em nutrientes, especialmente Ca, Mg e K, ou seja, a dinâmica do íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), adicionado via gessagem no perfil do solo tem influência determinante sobre a manutenção dos teores de cátions trocáveis na rizosfera (PELLEGRINI, 2012).

A solubilização do gesso no solo é rápida resultando na dissociação imediata dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  na solução do solo, sendo estes os principais agentes melhoradores do ambiente radicular. Vale reforçar que, o cátion  $\text{Ca}^{2+}$ , que participa nas reações de troca iônica desloca Al, assim como o ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  que, após reagir com K e Mg forma complexos excessivamente móveis como  $\text{K}_2\text{SO}_4$  e  $\text{MgSO}_4$  e isso propicia o deslocamento dos cátions ao longo do perfil do solo.

O teor de S total nos solos está diretamente relacionado com o teor de MO, sendo que, na camada arável, entre 60 e 90% do S total está na forma orgânica. Sendo assim, a degradação dessa MO do solo implica, em médio prazo, em redução na disponibilidade de S. Pellegrini (2012) afirma que uma vez transformado para a forma inorgânica, o enxofre também fica muito suscetível a perdas, nesse caso por lixiviação.



O enxofre ocorre na solução do solo como o ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  (altamente solúvel) que é a forma absorvida pelas raízes das plantas, como comprovado por Tabatabai e Hanway (1975) e, ao formar pares iônicos com  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$ , lixivia com relativa facilidade (MALAVOLTA, 1984).

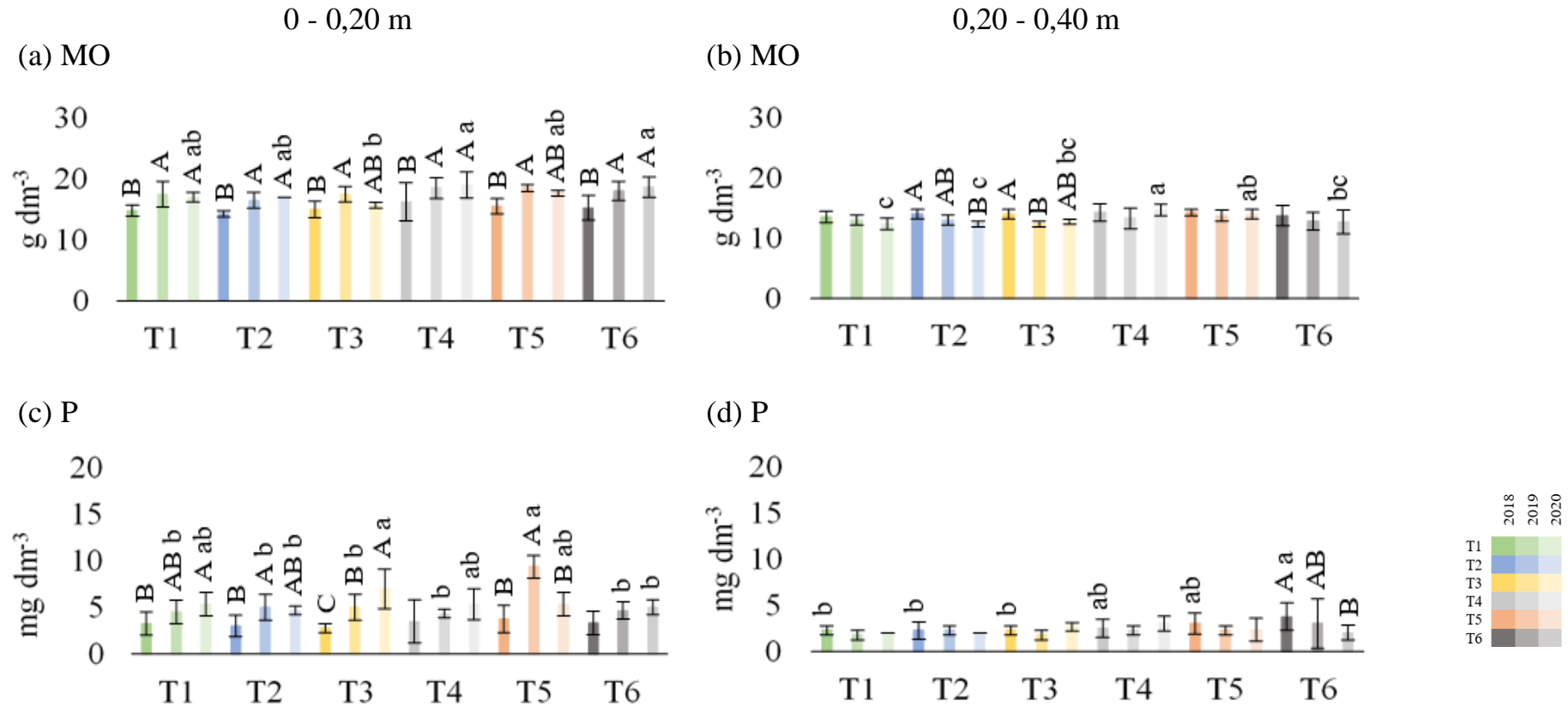
Em relação aos teores de matéria orgânica observa-se diferenças ( $p < 0,05$ ) em relação aos anos e em relação aos tratamentos, somente em 2020. Na camada de 0 a 0,20 m (Figura 15a), o maior acúmulo de MO foi atingido nos anos de 2019 e 2020 e que, em 2020, os tratamentos T4 e T6 favoreceram o aumento desses teores se comparados ao T3. Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 15b), o T2 se destacou em 2018 e 2019, enquanto o T3 em 2018 e 2020. Também nessa profundidade, em 2020, o T4 proporcionou maior incremento de MO se confrontado com T1 e T2.

Destaca-se ainda que, com o decorrer dos anos realizando a prática da gessagem, houve pouco efeito sobre a MO do solo (Tabela 1 e avaliação de 2020), pois em superfície não houve alterações, e em subsuperfície, houve um pequeno decréscimo nos valores de MO em relação ao ano de 2017 (Tabela 1).

A melhoria do ambiente radicular ocasionada pela gessagem, com fornecimento de Ca e diminuição de Al, facilitou o crescimento das raízes do capim Marandu, que por característica já é denso, em profundidade, fazendo com que a planta absorvesse melhor os nutrientes e água disponível. Isso manteve a produção satisfatória de forragem, sem perdas ocasionadas por longos períodos sem chuva, que ocorreu no período experimental (Figura 1). Sendo assim, a decomposição do material se manteve estável, não alterando os teores de MO em superfície, sob pastejo contínuo.

Os teores de P diferiram ( $p < 0,05$ ) entre si com as diferentes metodologias de uso de gesso em relação aos anos e aos tratamentos. Na profundidade de 0 a 0,20 m (Figura 15c), T1 e T2 apresentaram maiores teores em 2019 e 2020, enquanto T3 em 2020, e o T5 em 2019. Também em 2019, o T5 proporcionou ao sistema, os mais elevados teores de P se comparado aos demais tratamentos, enquanto em 2020, o T3 superou T2 e T6.

Figura 15. Alterações nos teores de MO e P nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0,20-0,40 m (Figura 15d), os mais elevados teores de P foram proporcionados pelo T6 em 2018 e 2019. Sendo que, em 2018, este mesmo tratamento propiciou os maiores valores de P quando comparado ao T1, T2 e T3.

Ao se comparar a análise inicial (Tabela 1) a última avaliação da fertilidade do solo (2020), constata-se o incremento de P em superfície (ciclagem da pastagem) e a manutenção dos teores em subsuperfície.

O fato do solo apresentar melhor condicionamento para o crescimento de raízes, que conseguem aproveitar os nutrientes dispostos em profundidade e recicla-los, faz com que, no decorrer da decomposição do material vegetal, esses nutrientes retornem a superfície do solo, aumentando, dessa maneira os teores de P em superfície. Deve-se considerar que o P contido no gesso agrícola, como impureza, pode ser importante, no caso de aplicações de doses elevadas de gesso (SUMNER *et al.*, 1986). Também Caires *et al.* (2003) observaram que com o aumento das doses de gesso, os teores de P aumentaram na camada superficial do solo (0-0,05 m).

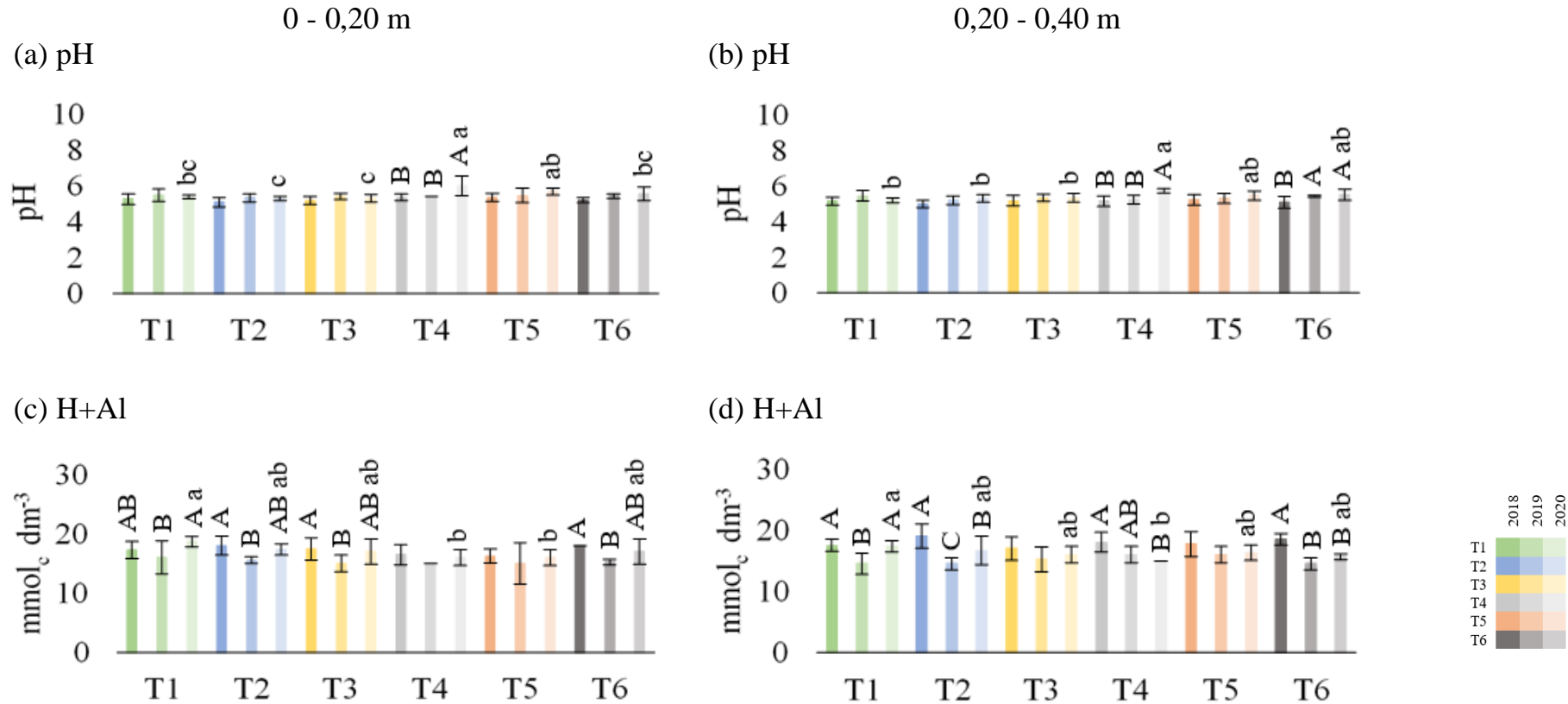
O pH diferiu estatisticamente ( $p < 0,05$ ) com as diferentes metodologias de gessagem usadas em relação aos anos e tratamentos. Na profundidade de 0 a 0,20 m (Figura 16a), o T4 apresentou maior pH em 2020, e neste mesmo ano, o T4 proporcionou maior pH se comparado ao T2 e T3. Na profundidade de 0,20 a 0,40 m (Figura 16b), os maiores valores de pH foram verificados para o T4 em 2020, e para o T6, em 2019 e 2020. Ainda nessa camada, em 2020, o T4 superou T1, T2 e T3 em relação ao pH.

Contrapondo a análise inicial (Tabela 1), de 2017, com a final (2020), o pH não teve nenhuma alteração significativa após três anos realizando a gessagem. Em 2020, o T4 não só propiciou aumento no pH do solo, como também o incremento de alguns nutrientes como Mg, K e MO nas duas profundidades avaliadas.

Vale lembrar que o gesso é usado como condicionador de solo e pouco afeta o pH, o que acontece é que a lixiviação do Ca proporciona um aumento de sua concentração e diminuição na saturação por Al em subsuperfícies.

A acidez potencial apresentou diferenças ( $p < 0,05$ ) em relação aos anos e aos tratamentos aqui apresentados nas duas profundidades. Na camada de 0 a 0,20 m (Figura 16c), os tratamentos T1, T2, T3 e T6 proporcionaram a menor acidez em 2019. Ainda nessa profundidade, em 2020, T4 e T5 proporcionaram menor acidez se comparados ao T1.

Figura 16. Alterações no pH e H+Al nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 16d), os menores valores de acidez potencial foram observados no T1, em 2019, no T2 e T6 em 2019 e 2020, e no T4 em 2020. Assim, em 2020, novamente o T4 apresentou melhores índices se comparado ao T1. Se contrapor a análise de caracterização de área (Tabela 1) com a avaliação realizada em 2020, verifica-se que em superfície houve um pequeno aumento da H+Al, e em subsuperfície, o valor pouco se alterou.

É possível observar que, quanto maior a acidez do solo, nesse caso causada pelo T1, menor o valor do pH. Resultado similar foi obtido por Vital *et al.* (2005), onde observaram que doses mais elevadas de gesso ocasionaram pequena acidificação no solo pois, na presença do gesso, o Ca substitui o sódio trocável, e através da lixiviação, íons de Na<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup> são removidos, causando decréscimo no pH e no teor de sódio do solo. Esta redução do pH acontece, em parte, pela retirada dos cátions (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup>) do complexo sortivo e sua substituição por íons H<sup>+</sup>, provenientes da dissociação iônica da água e troca iônica durante o processo de absorção de cátions, bem como pelo efeito do corretivo que, ao aumentar a concentração de eletrólitos na solução do solo, tende a diminuir o pH.

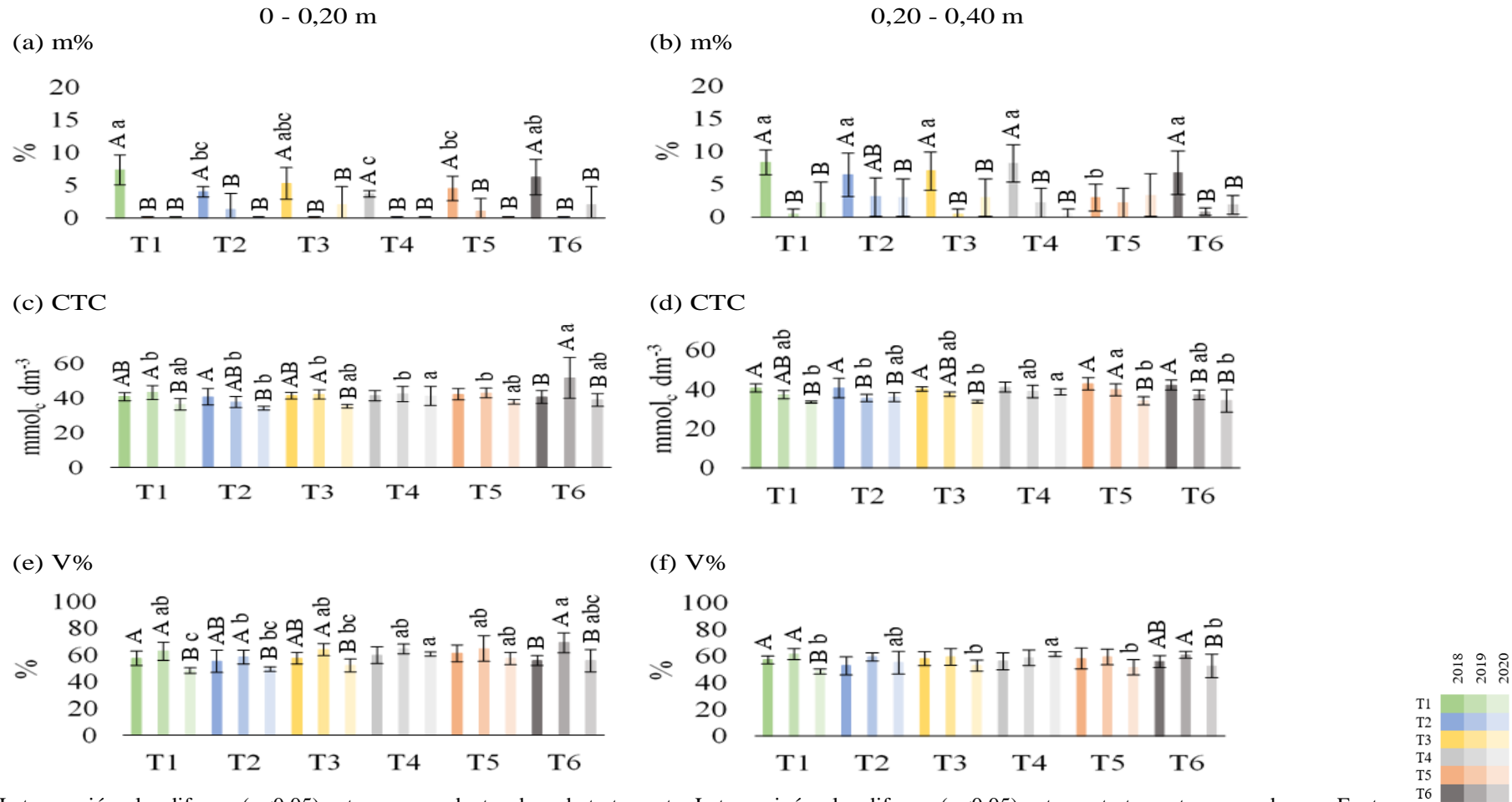
Em relação a saturação por Al (m%) foram observadas diferenças (p<0,05) para os anos e tratamentos. Considerando os anos, na camada de 0 a 0,20 m (Figura 17a), as menores saturações para todos os tratamentos foram em 2019 e 2020. Em relação aos tratamentos, em 2018, o T4 diminuiu a saturação por Al se comparado ao T1.

Considerando a camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 17b), as menores saturações foram obtidas com os tratamentos T1, T3, T4 e T6, em 2019 e 2020, e T2 em 2020. Nessa profundidade, em 2018, o T5 foi mais efetivo e diminuiu os valores de m% em relação aos demais tratamentos.

Se contrapostas as análises realizadas em 2017, de caracterização (Tabela 1), e 2020, observa-se que, em superfície não houve alteração nos valores médios de m%, enquanto, em profundidade, ocorreu um pequeno aumento.

Os tratamentos T4 e T5, que proporcionaram os menores valores de saturação por Al foram também os que apresentaram maior incremento nas profundidades em relação às bases Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>.

Figura 17. Alterações nos valores de m%, CTC e V%, nas profundidades de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m do solo avaliadas nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20 na área de pastagem convencional (PAST).



Letras maiúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os anos dentro de cada tratamento. Letras minúsculas diferem ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos em cada ano. Fonte: Elaboração da própria autora.

O uso do gesso, além de resolver problemas relacionados a deficiência de Ca e fornecer S ao solo, ainda reduz a saturação por Al e permite ganhos significativos na produtividade das pastagens. Isso ocorre devido a movimentação de cátions para camadas mais profundas, fazendo com que teores de Ca e Mg aumentem, diminuindo a toxidez por Al, proporcionando assim um ambiente melhor para o desenvolvimento radicular das forrageiras (SOUSA *et al.*, 2001). É importante frisar que o efeito do gesso pode ser observado no mesmo ano em que ele é aplicado.

Para CTC houve diferenças significativas também em relação aos anos e tratamentos nas duas profundidades. Na camada de 0 a 0,20 m (Figura 17c), os maiores valores de CTC foram verificadas em T1, T2 e T3, nos anos 2018 e 2019, e T6 em 2019. Também em 2019, o T6 apresentou a maior CTC se comparado aos demais tratamentos, e em 2020, o T4 foi mais efetivo em relação à CTC se contraposto ao T2.

Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 17d), os tratamentos T1, T3 e T5 propiciaram os maiores valores de CTC em 2018 e 2019, enquanto T2 e T6, em 2018. Observa-se também que, em 2019, o T5 incrementou a CTC do sistema se comparado ao T2, e em 2020, o T4 se comparado ao T1, T3, T5 e T6.

Na comparação da análise de 2017 (Tabela 1) com a de 2020 (Figura 17), houve decréscimo nos valores da CTC nas camadas de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m.

É possível observar a forte relação entre CTC e pH do solo, visto que os maiores valores de pH foram proporcionados pelo T4, assim como para CTC mais elevada neste mesmo tratamento. A presença de MO, que aumenta o pH, também se relaciona a esse resultado, e que na pastagem aqui avaliada pouco se alterou (Figura 15).

Entre os atributos químicos que afetam a movimentação dos nutrientes, estão a CTC, a valência do cátion e o pH sendo que, solos com alta CTC, apresentam maior capacidade de adsorção dos cátions, tornando-os menos suscetíveis à lixiviação (SANTOS *et al.*, 2002). Considerando o fato de que a CTC da área estudada está, em sua maioria, baixa entende-se a possibilidade dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  terem lixiviado a uma profundidade maior que a avaliada até 0,40 m.

A saturação por bases (V%) diferiu estatisticamente ( $p < 0,05$ ) nas duas profundidades do solo, em relação aos anos e aos tratamentos. Na camada de 0 a 0,20 m (Figura 17e), T1, T2 e T3 exibiram os maiores valores em 2018 e 2019, e o T6 somente em 2019. Ainda em 2019, o T6 propiciou elevada saturação por bases se comparado ao T2 e, em 2020, o T4 se contraposto ao T1. Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 17f), T1

e T6 apresentaram maior saturação por bases em 2018 e 2019, e em 2020, o T4 superou T1, T3, T5 e T6.

Confrontando os valores da saturação por bases obtidos em 2017 (Tabela 1) e 2020 (Figura 17), houve redução da saturação por bases nas duas profundidades amostradas após três anos de gessagem. Corroborando com esse resultado, Lopes (2020) observou que a saturação de bases reduziu na camada de 0,20-0,40 m, em função do aumento das doses de gesso aplicadas em superfície.

O capim Marandu é considerado uma forrageira de alta exigência em relação a fertilidade do solo, sendo necessário para seu bom desenvolvimento, saturação por bases entre 40 e 45%, não sendo considerado prejudicial saturação de até 50% (VILELA *et al.*, 2000). Sendo assim, a V% da área estudada está no limite para atender as necessidades da cultura.

#### 4.3.2. Física do solo

Foram realizadas análises de porosidade total, densidade do solo e estabilidade de agregados > 2 mm nas camadas 0-0,05, 0,05-0,20 e 0,20-0,40 m no último ano de experimento, 2020 (Tabela 6). Para tais avaliações foi possível observar diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) em relação aos tratamentos de metodologias de uso de gesso.

Na profundidade de 0-0,05 m, o T3 apresentou maior porosidade total (PT) se comparado ao T4 e T5. A maior densidade do solo (DS) foi verificada nos tratamentos T1 e T5, se comparados ao T2, e o maior DMP de agregados foi observado no T2, se contraposto ao T1, T5 e T6.

Na camada de 0,05-0,20 m, o T6 propiciou maior PT se comparado aos demais tratamentos, e em relação a estabilidade, T1, T4 e T6 apresentaram maior porcentagem de AG > 2 mm se comparados ao T2. Enquanto que, na camada de 0,20-0,40 m, a maior DS foi verificada em T5 se contrastado ao T3, e o T2 propiciou a maior porcentagem AG < 2 mm se comparado ao T1.

Rosa Junior *et al.* (1994) afirmaram que o uso do gesso aumentou a quantidade de agregados estáveis em água, maiores que 1,0 mm e que ocorre melhoria nas características físicas do solo, principalmente em relação ao tamanho dos agregados, fato este verificado aqui apenas na profundidade de 0,05 a 0,20 m, entretanto foi similar ao T6 sem gessagem.



Tabela 6. Atributos físicos do solo em área de pastagem convencional (PAST), nas profundidades de 0 a 0,5 m, 0,5 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em função das metodologias de recomendação da gessagem, Votuporanga- SP, safra 2019/20.

Tratamentos <sup>(1)</sup>	PT <sup>(2)</sup>		DS <sup>(3)</sup>		DMP <sup>(4)</sup>		AG>2 <sup>(5)</sup>	
	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>		kg dm <sup>-3</sup>		mm		%	
0 - 0,05 m								
T1	40,11	bc <sup>(6)</sup>	1,73	a	4,18	b	45,29	<sup>ns</sup>
T2	51,26	b	1,54	b	5,24	a	43,10	
T3	70,92	a	1,64	ab	4,58	ab	37,25	
T4	37,19	c	1,59	ab	4,55	ab	48,12	
T5	36,44	c	1,76	a	4,31	b	46,10	
T6	39,31	bc	1,68	ab	4,40	b	39,03	
DMS	13,09		0,18		0,74		11,63	
CV%	20,72		7,90		11,35		24,27	
0,05 - 0,20 m								
T1	34,44	b	1,74		4,16		45,57	a
T2	41,54	b	1,70		4,33		38,81	b
T3	36,61	b	1,70		4,33		40,35	ab
T4	40,63	b	1,73		4,32		45,71	a
T5	39,12	b	1,67		4,37		44,12	ab
T6	51,58	a	1,66		4,41		46,39	a
DMS	9,88		0,13		0,33		6,04	
CV%	19,03		5,48		5,14		23,06	
0,20 - 0,40 m								
T1	44,45		1,79	ab	4,17		32,43	c
T2	35,93		1,76	ab	4,22		40,75	a
T3	42,18		1,62	c	4,21		38,84	ab
T4	42,24		1,68	bc	4,30		33,22	bc
T5	37,55		1,81	a	4,32		36,62	abc
T6	37,98		1,75	abc	4,35		38,60	abc
DMS	9,70		0,13		0,39		6,38	
CV%	18,30		5,17		6,06		29,77	

<sup>(1)</sup>Tratamentos: T1: Caires e Guimarães (2016), T2: Sousa, Lobato e Rein (2005), T3: Vitti *et al.* (2008), T4: Demattê (1986), T5: Raij *et al.* (1996), T6: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); <sup>(2)</sup>Porosidade total; <sup>(3)</sup>Densidade do solo; <sup>(4)</sup>Diâmetro médio ponderado; <sup>(5)</sup>Agregados maiores que 2mm; <sup>(6)</sup>significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

Os tratamentos T4 e T6 proporcionaram os maiores teores de MO, favorecendo diretamente a formação dos agregados no solo. Fatores como textura, teor de MO e manejo do solo exercem influência sobre estabilidade de agregados. Esses agregados são de extrema importância para a conservação dos solos pois conferem maior resistência ao processo erosivo, proteção a MO e à população microbiana (FERREIRA TAVARES FILHO; FERREIRA, 2010). Também Spera *et al.* (2010) afirmam que a MO auxilia na melhoria da qualidade física do solo, na atividade de microrganismos, no

aumento da taxa de infiltração, redução da erosão e estabelecem também efeitos positivos sobre a estabilidade de agregados, porosidade e densidade do solo. O aumento da estabilidade de agregados proporciona uma estruturação melhor do solo provendo seu interior com espaços porosos e possibilitando melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas, da fauna do solo e do fluxo de ar e água.

É desejável identificar espécies de gramíneas forrageiras que aliem a abundante produção de palhada para a cobertura do solo com um vigoroso crescimento do sistema radicular, ocasionando assim melhorias na estrutura do solo. Para isso são indicadas gramíneas do gênero *Urochloa*, que possuem sistema radicular fasciculado, de rápido estabelecimento, possibilitando melhor estruturação do solo, com formação de agregados estáveis, macroporosidade e canais (SALTON *et al.*, 2014), entretanto, em solos arenosos esse efeito é lento, pela baixa quantidade de colóides e agentes cimentantes, mesmo em área de pastagem.

#### 4.3.3. Planta

Em relação a produtividade de matéria seca (MS) da forragem, foi realizada a análise nas três safras, 2017/18, 2018/19 e 2019/20, sendo observadas diferenças somente na safra 2017/18, em que o T2 proporcionou maior produtividade de MS, se comparado ao T1, T3 e T6 (Tabela 7).

A prática da gessagem e as melhoria na fertilidade do solo ocasionada por ela não parecem ter exercido influência sobre a produção de MS da forragem nesse sistema, porém sabe-se que acidez encontrada nos solos é prejudicial para o desenvolvimento da forrageira, causando limitação da produtividade independentemente do período do ano. Sobre isso, Guelfi *et al.* (2013), constataram menor desenvolvimento radicular e da parte aérea do capim Marandu em solo sem correção, com pH ácido e baixos teores de Ca e Mg, bem como de elevada saturação por Al.

O uso do gesso, por proporcionar maior desenvolvimento do sistema radicular nas plantas, faz com que elas busquem água em camadas mais profundas do solo, o que pode aumentar a capacidade de produção em períodos de estiagem, ajudando a manter a pastagem mais verde. De acordo com Sousa *et al.* (2016), o maior desenvolvimento do sistema radicular proporcionado pela aplicação do gesso, possibilita às plantas o uso dos nutrientes aplicados no solo com maior eficiência. Essa extração de nutrientes do solo está associada diretamente a capacidade produtiva da cada forrageira, e a reposição

desses é de fundamental importância para evitar a degradação e redução da produtividade das pastagens (COSTA *et al.*, 2008).

Tabela 7. Produtividade de matéria seca da forragem em área de pastagem convencional (PAST), após aplicação de gesso por diferentes metodologias, Votuporanga- SP, nas safras 2017/18, 2018/19 e 2019/20.

Tratamentos <sup>(1)</sup>	Produtividade de matéria seca	
	kg ha <sup>-1</sup>	
	Safr 2017/18	
T1	4009	b <sup>(2)</sup>
T2	5810	a
T3	4286	b
T4	4677	ab
T5	4404	ab
T6	3614	b
DMS	1510	
CV%	22,42	
	Safr 2018/19	
T1	1525 <sup>ns</sup>	
T2	1420	
T3	1400	
T4	1525	
T5	1525	
T6	1550	
DMS	237	
CV%	10,55	
	Safr 2019/20	
T1	6782	
T2	7335	
T3	7012	
T4	6289	
T5	6299	
T6	7781	
DMS	1653	
CV%	15,86	

<sup>(1)</sup>Tratamentos: T1: Caires e Guimarães (2016), T2: Sousa, Lobato e Rein (2005), T3: Vitti *et al.* (2008), T4: Demattê (1986), T5: Rajj *et al.* (1996), T6: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

#### 4.4. Multivariada

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada considerando-se a primeira safra (2017/18) e a última safra (2020) do experimento para os três sistemas de

produção estudados em duas profundidades do solo, 0-0,20 e 0,20-0,40 m para os atributos químicos e físicos do solo e as produtividades dos respectivos sistemas.

#### 4.4.1. Sistema de semeadura direta

Safra 2017/18

Na profundidade de 0-0,20 m, o primeiro processo (PC1) representou 41,62% da variância total, enquanto o segundo processo (PC2) representou 16,11% da variância total. Na profundidade de 0,20-0,40 m o PC1 representou 53,32% da variância total, enquanto o PC2 representou 12,95% da variância total (Tabela 8). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Tabela 8. Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PROD) na safra 2017/18 em sistema de semeadura direta (SSD).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1 <sup>(1)</sup>	PC2	PC1	PC2
Autovalor	5,41	2,09	6,93	1,68
Variância explicada (%)	41,62	16,11	53,32	12,95
Variância acumulada (%)	41,62	57,73	53,32	66,26
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
P	0,07	0,69	-0,14	0,25
MO	0,53	-0,25	0,27	0,26
pH	0,92	-0,28	0,96	0,05
K	0,23	0,04	0,50	-0,62
Ca	0,83	0,15	0,83	0,44
Mg	0,58	0,61	0,80	-0,32
H+Al	-0,80	0,52	-0,96	-0,11
Al	-0,82	0,19	-0,87	-0,06
S	-0,19	-0,15	-0,21	0,87
CTC	0,30	0,85	-0,71	-0,06
V%	0,96	0,03	0,97	0,12
m%	-0,83	-0,15	-0,96	-0,12
PROD	0,41	-0,02	0,50	-0,27

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1 e T4 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo), a

indivíduos como T3 e T4 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa) (Figura 18a).

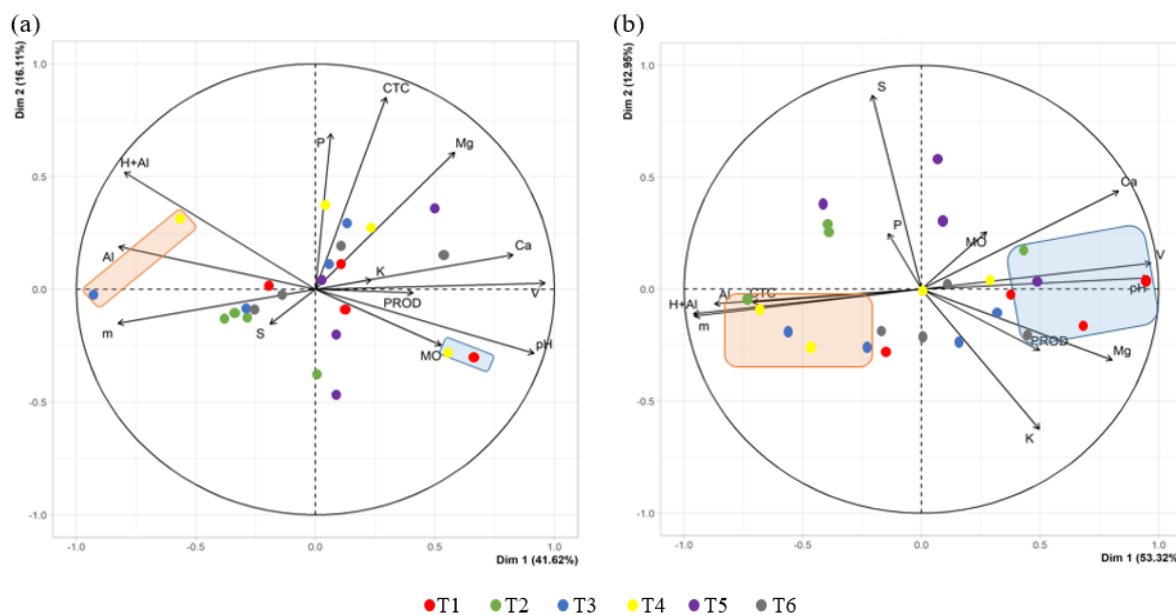
O grupo formado por T1 e T4 compartilham valores altos para as variáveis MO e pH e valores baixos e inversamente proporcionais para a variável H + Al. O grupo onde se encontram T3 e T4 estão compartilhando valores altos para as variáveis Al, H + Al e m% e valores baixos para V%, Ca e pH, sendo que tais resultados estão diretamente relacionados. A variável V% está altamente correlacionada com esta dimensão (correlação de 0,92) e poderia, portanto, resumir-se à dimensão 1.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1, T2, T5 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva), a indivíduos como T2, T3, T4 e T5 (para a esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa) (Figura 18b).

O grupo no qual os indivíduos T1, T2, T5 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para pH, V%, Mg, Ca, K e PROD, sendo que os mesmos são atributos diretamente relacionados uns com os outros. Enquanto que valores baixos para H + Al, m%, Al e CTC, sendo que esses últimos apresentam uma alta correlação inversa com os demais atributos citados. O grupo no qual os indivíduos T2, T3, T4 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para H + Al, CTC, m% e Al e valores baixos para Ca, V% e pH.

Assim, observa-se que as variáveis pH, H + Al, V% e m% estão altamente correlacionadas com esta dimensão (respectiva correlação de 0,92; 0,92; 0,94 e 0,92). Portanto essas variáveis poderiam resumir-se à dimensão 1.

Figura 18. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho na safra 2017/18 em sistema de semeadura direta (SSD).



Elaboração da própria autora.

#### Safra 2019/20

Na profundidade de 0 a 0,20 m, para os atributos químicos, o PC1 representou 40,40% da variância total, enquanto o PC2 representou 27,13% da variância total. Enquanto que, na profundidade de 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 38,19% e o PC2 a 20,33% da variância total (Tabela 9). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Tabela 9. Análise de componentes principais para atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PRODM) e matéria seca da forragem (PRODF) na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	5,66	3,80	5,35	2,85
Variância explicada (%)	40,40	27,13	38,19	20,33
Variância acumulada (%)	40,40	67,53	38,19	58,52
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
P	0,69	0,37	0,35	0,03
MO	0,60	0,72	-0,09	0,89
pH	0,60	-0,61	0,81	-0,01

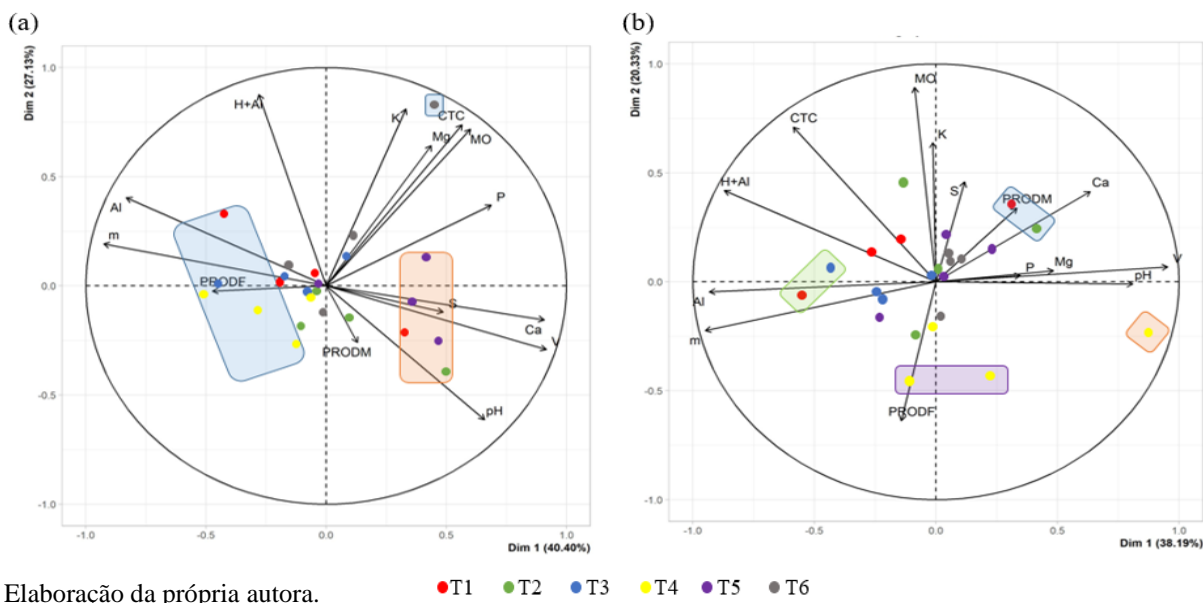
K	0,33	0,81	-0,01	0,64
Ca	0,91	-0,16	0,64	0,41
Mg	0,44	0,64	0,48	0,05
H+Al	-0,28	0,88	-0,87	0,42
Al	-0,83	0,40	-0,93	-0,05
S	0,49	-0,12	0,12	0,46
CTC	0,57	0,74	-0,59	0,71
V	0,92	-0,29	0,95	0,07
M	-0,93	0,19	-0,95	-0,22
PRODM	0,13	-0,26	0,33	0,34
PRODF	-0,47	-0,02	-0,14	-0,64

<sup>1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1, T2 e T5 (à direita do gráfico (Figura 19a), caracterizada por uma coordenada fortemente positiva) a indivíduos como T1, T3, T4 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa).

O grupo no qual os indivíduos T1, T2 e T5 estão é caracterizado por uma coordenada positiva no eixo e compartilham altos valores para V%, Ca, pH e S, e baixos valores para m%, Al e PRODF. O grupo dos indivíduos T1, T3, T4 possuem uma coordenada negativa e compartilham valores altos para m%, Al e PRODF, e valores baixos para Ca, V%, P, pH, S e MO.

Figura 19. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD).



A dimensão 2 distingue particularmente indivíduos como T6 que apresenta valores altos para K, MO, CTC, Mg e P.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1, T2 e T4 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1 e T3 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma forte e negativa coordenada no eixo) (Figura 19b).

O grupo no qual os indivíduos T1 e T2 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para P, S e Ca. O grupo no qual o indivíduo T4 (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para pH e V% e valores baixos para as variáveis H + Al, m%, CTC e Al. O grupo no qual os indivíduos T1 e T3 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para Al, m% e H + Al e valores baixos para Mg, V%, P e PRODM.

Assim, as variáveis V% e m% são altamente correlacionadas com esta dimensão (respectiva correlação de 0,91 e 0,90), e portanto, essas variáveis poderiam, resumir-se à dimensão 1.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T1 e T2 (no topo do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T4 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma forte negativa coordenada no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T1 e T2 estão compartilhando altos valores para P, S e Ca. Enquanto que o grupo no qual o indivíduo T4 está (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha altos valores para a PRODF e baixos valores para K e CTC.

De acordo com a Tabela 10, considerando-se os atributos físicos, químicos e as respectivas produtividades, na profundidade de 0-0,20 m, o PC1 representou 25,54% da variância total, enquanto o PC2 representou 21,67% da variância total. Na profundidade de 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 25,23% e o PC2 a 19,54% da variância total. A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.



Tabela 10. Análise de componentes principais para atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PRODM) e matéria seca da forragem (PRODF) na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD).

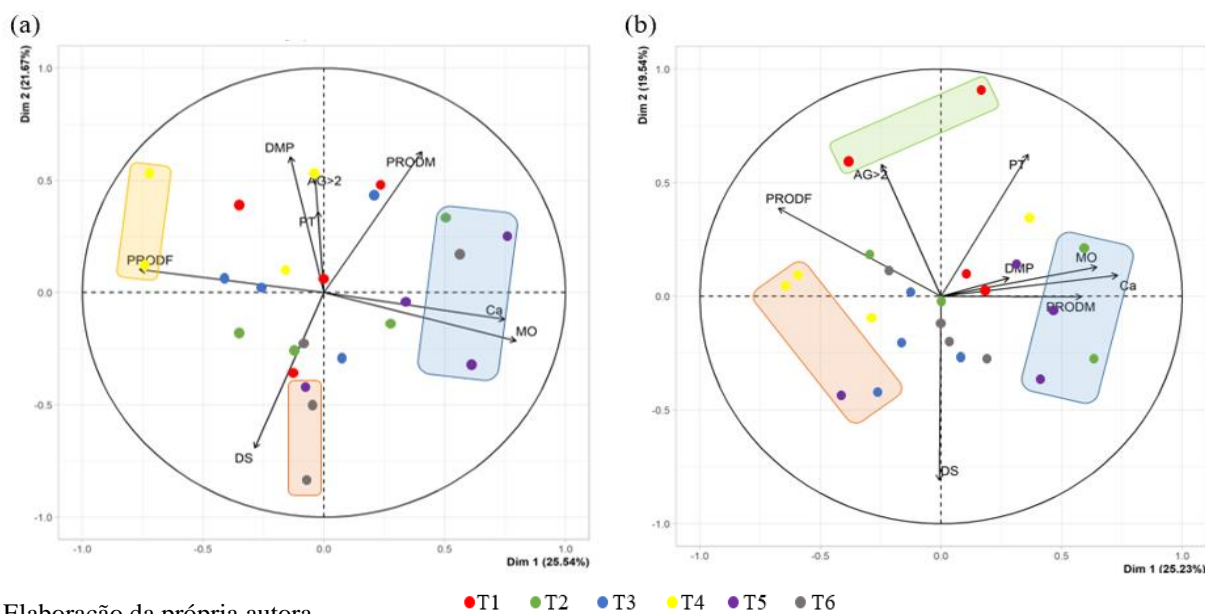
PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	2,04	1,73	2,02	1,56
Variância explicada (%)	25,54	21,67	25,23	19,54
Variância acumulada (%)	25,54	47,21	25,23	44,77
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
PT	-0,03	0,36	0,36	0,62
DS	-0,29	-0,69	-0,01	-0,81
DMP	-0,14	0,60	0,28	0,08
AG>2	-0,04	0,54	-0,25	0,58
MO	0,80	-0,22	0,65	0,13
Ca	0,75	-0,12	0,73	0,09
PRODM	0,41	0,63	0,58	-0,00
PRODF	-0,76	0,10	-0,67	0,39

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T2, T5 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T4 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 20a).

O grupo no qual os indivíduos T2, T5 e T6 (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilham valores altos para PRODM e Ca, e valores baixos para a PRODF. O grupo onde se encontra o indivíduo T4 (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) está compartilhando valores altos para DMP e valores baixos para a MO.

Figura 20. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em sistema de semeadura direta (SSD).



A dimensão 2 opõe indivíduos como T4 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T5 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma forte negativa coordenada no eixo).

O grupo do indivíduo T4 (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para o DMP e valores baixos para a MO. O grupo no qual os indivíduos T5 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilham valores baixos para AG > 2 e PRODM.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T2 e T5 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T3, T4 e T5 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 20b).

O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilham valores altos para Ca, MO e PRODM e valores baixos para a PRODF. O grupo no qual os indivíduos T3, T4 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilham valores baixos para a MO.

A dimensão 2 distingue particularmente indivíduos como T1 (no topo do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente positiva no eixo). Esses indivíduos formam um grupo que compartilha valores altos para  $AG > 2$  e PT.

Nos anos avaliados, nas profundidades 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, pode-se destacar os tratamentos T1, T2 e T5 (metodologias de Caires e Guimarães (2016), Sousa, Lobato e Rein (2005) e Raij *et al.* (1996), respectivamente), que resultaram em melhores correlações com as bases trocáveis e V%, enquanto as demais metodologias mostraram maior correlação com atributos ligados a acidez do solo. Nos atributos físicos do solo, os tratamentos que apresentaram melhor correlação com os agregados  $>2\text{mm}$  foram os tratamentos T2 e T5, metodologias propostas por Sousa, Lobato e Rein (2005) e Raij *et al.* (1996), respectivamente.

#### 4.4.2. Sistema agropastoril

Safra 2017/18

Na profundidade de 0-0,20 m, o PC1 representou 43,26% da variância total, enquanto o PC2 representou 20,12% da variância total. Na profundidade de 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 53,32% e o PC2 a 12,95% da variância total (Tabela 11). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1, T2, T3, T5 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T3, T4 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 21a).

O grupo no qual os indivíduos T1, T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilham elevados valores para Mg, K, CTC e PROD. O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilham valores altos para Ca e valores baixos para CTC e  $H + Al$ . O grupo no qual os indivíduos T1, T3, T4 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilham valores altos para m%, Al e  $H + Al$  e valores baixos para as pH, V% e Ca.

Tabela 11. Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho (PROD) na safra 2017/18 em sistema agropastoril (SAP).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	5,62	2,62	6,93	1,68
Variância explicada (%)	43,26	20,12	53,32	12,95
Variância acumulada (%)	43,26	63,38	53,32	66,27
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
P	0,22	0,33	-0,14	0,25
MO	0,11	-0,32	0,28	0,26
pH	0,98	-0,01	0,96	0,05
K	0,07	0,85	0,50	-0,62
Ca	0,73	-0,40	0,83	0,44
Mg	0,50	0,73	0,80	-0,32
H+Al	-0,89	0,26	-0,96	-0,11
Al	-0,93	0,06	-0,87	-0,07
S	-0,38	-0,28	-0,21	0,87
CTC	-0,34	0,56	-0,71	-0,06
V%	0,98	0,02	0,97	0,12
m%	-0,95	-0,02	-0,96	-0,12
PROD	0,23	0,73	0,50	-0,27

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

As variáveis pH e V% estão altamente correlacionadas com esta dimensão (respectiva correlação de 0,96 e 0,95), portanto, elas poderiam resumir-se à dimensão 1.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T1, T3 e T6 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T2 e T5 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T1, T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilham valores altos para Mg, K, CTC e PROD. O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilham valores altos para Ca e valores baixos para CTC e H + Al.

Na profundidade 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T4 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T3, T4 e T5 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 21b).

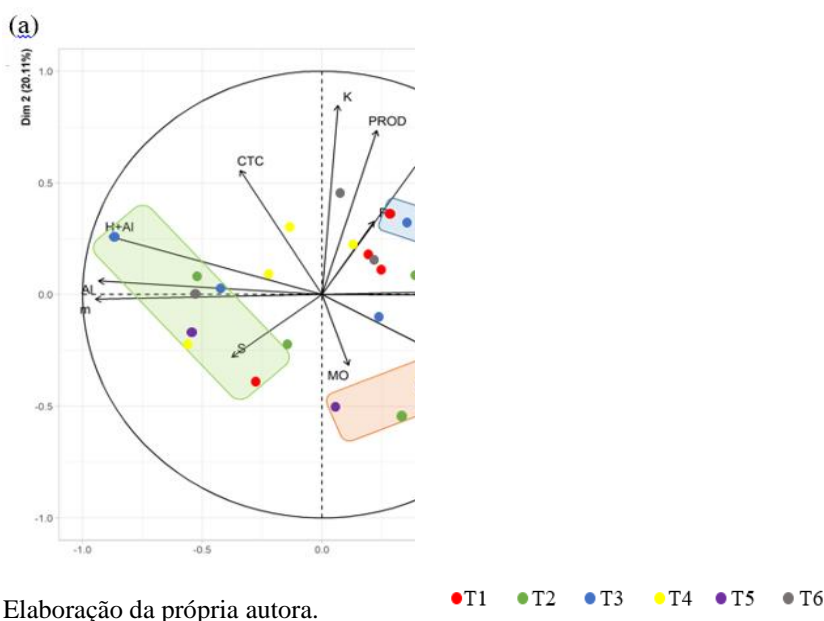
O grupo no qual os indivíduos T4 e T6 se posicionam (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para m%, Al e P e valores baixos para Ca, pH e V%. O grupo no qual os indivíduos T3, T4 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilham valores altos para pH, V%, Mg e K e valores baixos para H + Al, Al e m%.

A variável pH está altamente correlacionada com esta dimensão (correlação de 0,91), e, portanto, resumir-se à dimensão 1.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T2 e T5 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T4 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo em que os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha elevados valores para S e CTC e baixos valores para Mg, P e K. O grupo no qual os indivíduos T4 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para m%, Al e P e valores baixos para as Ca, pH e V%.

Figura 21. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade do milho na safra 2017/18 em sistema agropastoril (SAP).



## Safra 2019/20

Na profundidade de 0-0,20 m, o PC1 representou 43,28% da variância total, enquanto o PC2 representou 17,34% desta variância total. Na profundidade de 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 35,69% e o PC2 a 22,40% da variância total (Tabela 12). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Tabela 12. Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade de soja (PROD) na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	5,63	2,25	4,64	2,91
Variância explicada (%)	43,28	17,34	35,69	22,40
Variância acumulada (%)	43,28	60,62	35,69	58,09
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
P	0,64	0,21	0,18	0,23
MO	0,38	0,57	-0,06	0,58
pH	0,93	-0,08	-0,85	0,14
K	-0,19	-0,74	0,06	0,23
Ca	0,93	0,28	-0,73	0,63
Mg	-0,05	-0,63	-0,10	-0,64
H+Al	-0,69	0,52	0,57	0,71
Al	-0,93	0,10	0,95	0,12
S	0,31	0,44	-0,42	0,63
CTC	-0,07	0,54	0,10	0,81
V%	0,93	-0,30	-0,93	-0,23
m%	-0,94	0,09	0,97	0,02
PROD	-0,35	-0,03	0,35	-0,19

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T2 e T5 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T3 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 22a).

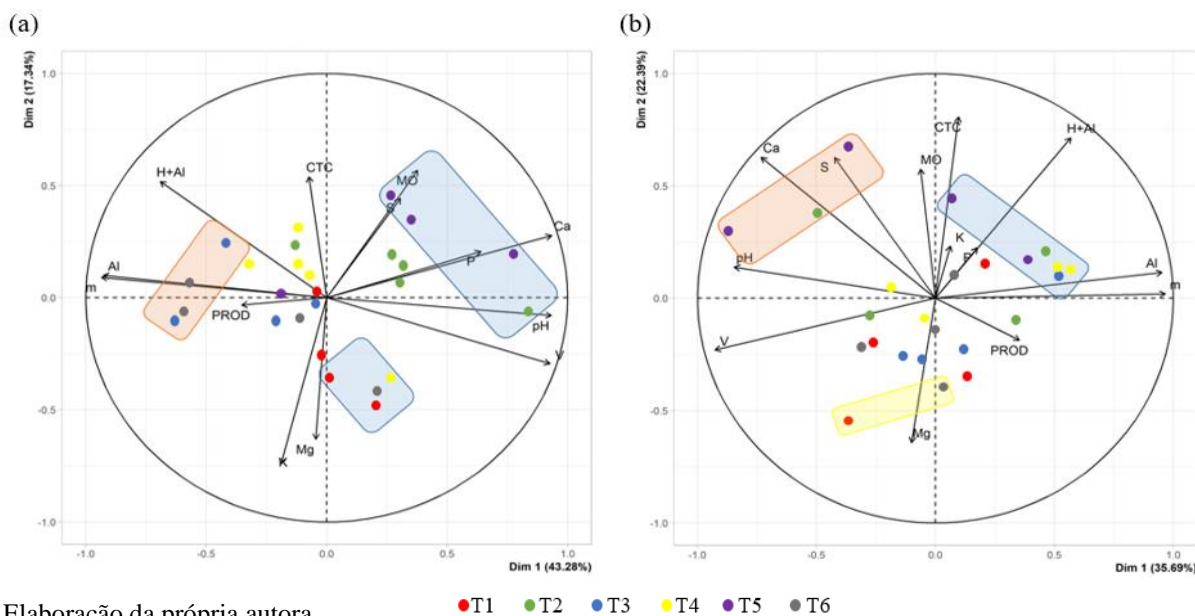
O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para MO, Ca, P e pH e valores baixos para a K. O grupo no qual os indivíduos T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada

negativa no eixo) compartilha valores altos para m%, Al e H + Al e valores baixos para pH, V% e Ca.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T2 e T5 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T4 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para MO, Ca, P e pH e valores baixos para a K. O grupo no qual os indivíduos T1, T4 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para K e Mg.

Figura 22. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20m e 0,20 a 0,40 m e produtividade da soja na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP).



Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T2, T3, T4 e T5 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T2 e T5 (à esquerda de gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 22b).

O grupo no qual os indivíduos T2, T3, T4 e T5 se posicionam (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para Al, m% e H + Al e valores baixos para V% e pH. O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão

(caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para Ca, pH e S e valores baixos para m% e Al.

As variáveis Al e m% são altamente correlacionadas com esta dimensão (respectiva correlação de 0,91 e 0,93), portanto, poderiam resumir-se à dimensão 1.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T2 e T5 (no topo do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma forte negativa coordenada no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 se posicionam (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para Ca, pH e S, e valores baixos para m% e Al. O grupo no qual os indivíduos T1 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para Mg e valores baixos para H + Al e CTC.

De acordo com a Tabela 13, considerando-se os atributos físicos, químicos e as respectivas produtividades, na profundidade de 0-0,20 m, o PC1 representou 29,56% da variância total, enquanto o PC2 representou 19,86% dessa variância total. Na profundidade 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 30,66% e o PC2 a 22,25% da variância total. A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Tabela 13. Análise de componentes principais para atributos físicos e químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade de soja (PROD) na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	2,07	1,39	2,15	1,56
Variância explicada (%)	29,56	19,86	30,66	22,25
Variância acumulada (%)	29,56	49,42	30,66	52,91
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
PT	0,17	-0,13	-0,77	-0,02
DS	0,15	-0,43	0,56	0,16
DMP	-0,76	0,49	0,64	-0,22
AG>2	0,74	-0,39	-0,02	-0,55
MO	0,42	0,64	0,23	0,85
Ca	0,76	0,39	-0,44	0,66
PROD	-0,38	0,48	0,77	0,15

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.



Na profundidade 0-0,20 m a dimensão 1 opõe indivíduos como T2, T4 e T5 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T3, T4, T5 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 23a).

O grupo no qual os indivíduos T2, T4 e T5 se posicionam (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para Ca e  $AG > 2$  e valores baixos para a variável PROD. O grupo no qual os indivíduos T3, T4, T5 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para DMP e valores baixos para  $AG > 2$ .

A dimensão 2 opõe indivíduos como T3, T4, T5 e T6 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T3 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T3, T4, T5 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para DMP e valores baixos para  $AG > 2$ . O grupo no qual os indivíduos T1, T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores baixos para MO e Ca.

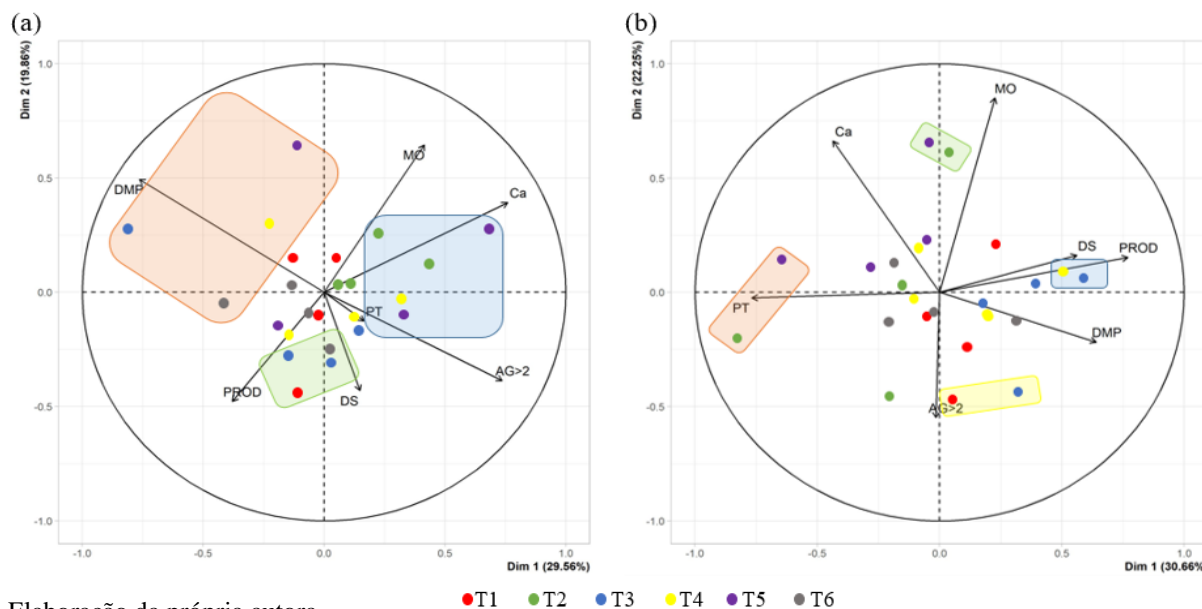
Na profundidade 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T3 e T4 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T2 e T5 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 23b).

O grupo no qual os indivíduos T3 e T4 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha variáveis cujos valores não diferem significativamente da média. O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para PT e valores baixos para DS e PROD.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T2 e T5 (no topo do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1 e T3 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para MO, e o grupo no qual os indivíduos T1 e T3 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para  $AG > 2$ .

Figura 23. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e produtividade da soja na safra 2019/20 em sistema agropastoril (SAP).



Na safra 2017/18 destacam-se os tratamentos T1 e T3 (metodologias de Caires e Guimarães (2016) e Vitti *et al.* (2008)), na profundidade de 0-0,20 m, e T4 (metodologia de Demattê, (1986)) de 0,20-0,40 m, apresentando maiores correlações com o pH e V% enquanto, na safra 2019/20 observa-se que T2 e T5 se correlacionam com todos os atributos, evidenciando o aumento do pH e da V%, com redução da m%. Nos atributos físicos, os tratamentos T2 e T5 (metodologias de Sousa, Lobato e Rein (2005) e Raij *et al.* (1996)) se correlacionaram com os agregados <2mm, e teores de Ca, sendo que, essas mesmas variáveis apresentam maiores correlações com o sistema SAP.

#### 4.4.3. Pastagem convencional

##### Safra 2017/18

Na profundidade de 0-0,20 m, o PC1 representou 43,90% da variância total, enquanto o PC2 representou 18,16% dessa variância. Na profundidade 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 44,35% e o PC2 a 19,42% da variância total (Tabela 14). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão

carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1, T4 e T5 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T2, T3 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 24a).

O grupo no qual os indivíduos T1, T4 e T5 se posiciona (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para V%, pH e Mg e valores baixos para H + Al, m% e Al. O grupo no qual os indivíduos T1, T2, T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para m%, H + Al e Al e valores baixos para pH e V%.

Tabela 14. Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem (PROD) na safra 2017/18 em pastagem convencional (PAST).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	5,71	2,36	5,77	2,53
Variância explicada (%)	43,90	18,16	44,35	19,42
Variância acumulada (%)	43,90	62,06	44,35	63,78
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
P	-0,14	0,08	-0,14	0,59
MO	-0,25	0,03	0,17	0,40
Ph	0,91	-0,01	0,92	-0,18
K	-0,14	-0,49	-0,11	-0,28
Ca	0,70	0,63	0,77	0,57
Mg	0,58	-0,57	0,73	-0,41
H+Al	-0,84	0,12	-0,81	0,44
Al	-0,74	0,45	-0,78	0,10
S	0,54	0,73	0,35	0,82
CTC	0,83	0,30	0,73	0,54
V%	0,97	0,07	0,96	-0,06
m%	-0,88	0,31	-0,90	0,06
PROD	-0,24	0,67	-0,28	0,48

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

A variável V% está altamente correlacionada com esta dimensão (correlação de 0,94), portanto, resume à dimensão 1. Enquanto que a dimensão 2 opõe indivíduos como T2 e T5 (no topo do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente

positiva no eixo) a indivíduos como T3 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma forte e negativa coordenada no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para S e Ca, e o grupo no qual os indivíduos T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha altos valores para K.

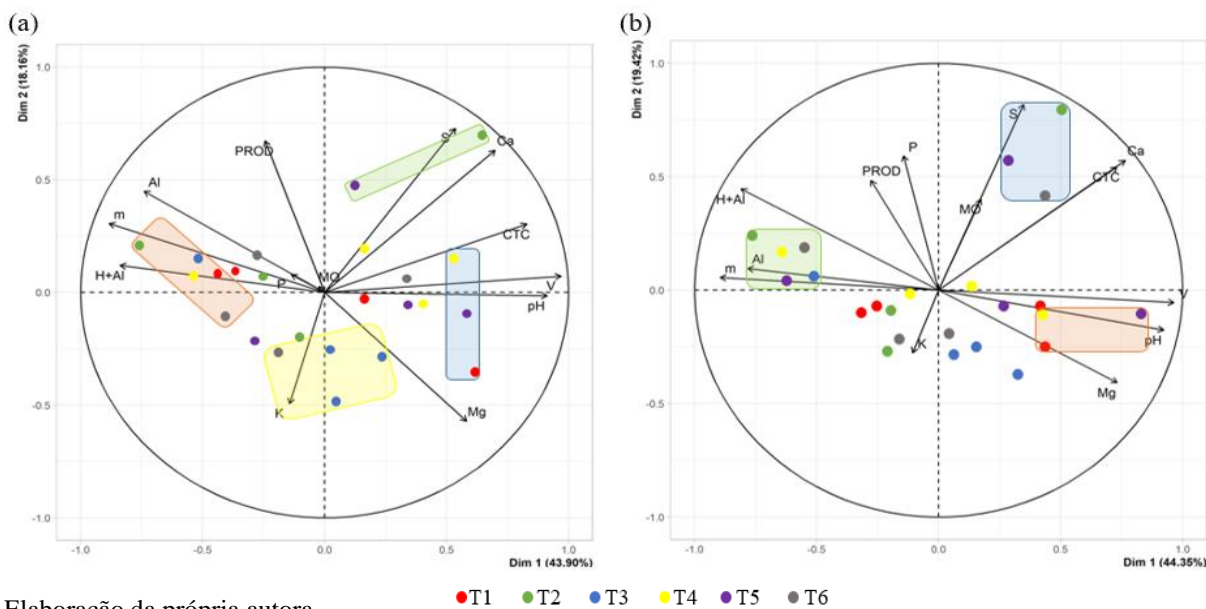
Na profundidade de 020-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T1, T2, T4, T5 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T2, T3, T4, T5 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 24b).

O grupo no qual os indivíduos T2, T5 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para S, Ca e CTC. O grupo no qual os indivíduos T1, T4 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para Mg, V% e pH, e valores baixos para H + Al, Al, P e m%. O grupo no qual os indivíduos T2, T3, T4, T5 e T6 se posicionam (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) está compartilhando valores altos para m%, Al e H + Al e valores baixos para V%, pH, Ca, CTC e Mg. A V% está altamente correlacionada com esta dimensão (correlação de 0,93) e poderia resumir à dimensão 1.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T2, T5 e T6 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T4 e T5 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T2, T5 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para S, Ca e CTC, e o grupo no qual os indivíduos T1, T4 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para Mg, V% e pH, e valores baixos para H + Al, Al, P e m%.

Figura 24. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem na safra 2017/18 em pastagem convencional (PAST).



#### Safra 2019/20

Na profundidade de 0-0,20 m o PC1 representou 38,80% da variância total, enquanto o PC2 representou 20,90% da variância total enquanto, na profundidade 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 47,17% e o PC2 a 15,77% da variância total (Tabela 15). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 distingue particularmente indivíduos como T3 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo). Esses indivíduos formam um grupo que compartilha valores altos para m%, Al e H + Al e valores baixos para V% e Ca (Figura 25a).

A dimensão 2 opõe indivíduos como T4 (no topo do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T4 e T5 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo em que o indivíduo T4 está (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha altos valores para K, e o grupo no qual os indivíduos de T4 e T5

estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores que não diferem significativamente da média.

Tabela 15. Análise de componentes principais para atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem (PROD) na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST).

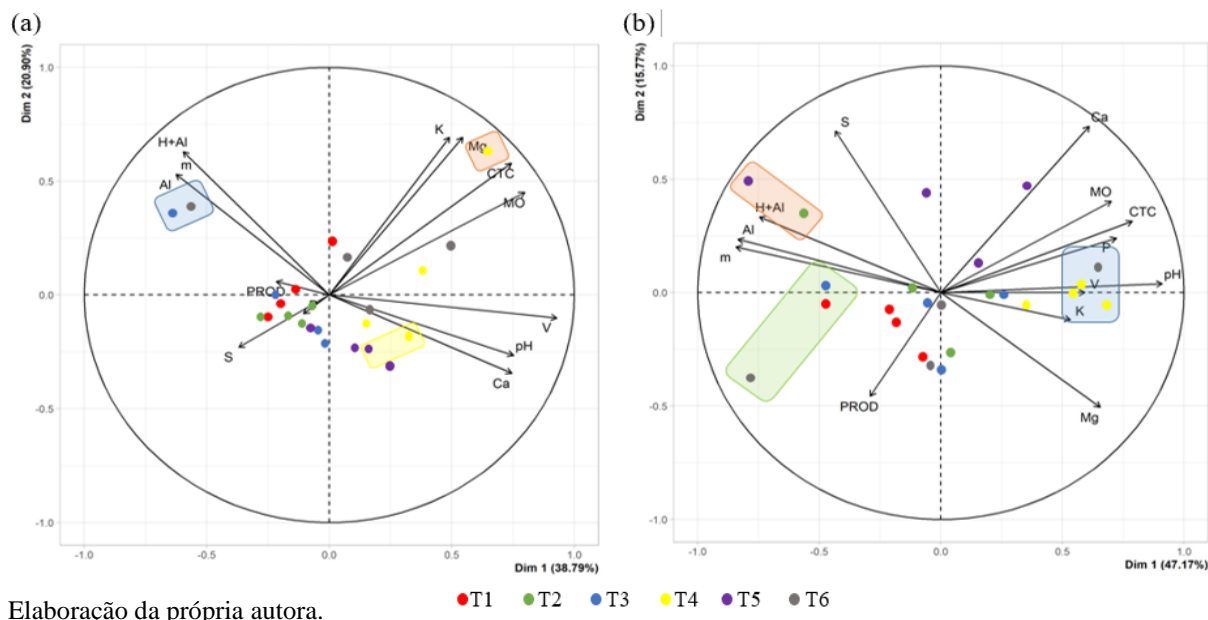
PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	5,04	2,72	6,13	2,05
Variância explicada (%)	38,80	20,90	47,17	15,77
Variância acumulada (%)	38,80	59,70	47,17	62,94
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
P	-0,11	-0,08	0,72	0,24
MO	0,80	0,45	0,70	0,40
pH	0,75	-0,27	0,91	0,04
K	0,49	0,69	0,53	-0,12
Ca	0,75	-0,34	0,61	0,73
Mg	0,55	,69	0,66	-0,50
H+Al	-0,60	0,63	-0,75	0,33
Al	-0,63	0,53	-0,83	0,24
S	-0,37	-0,23	-0,43	0,71
CTC	0,74	0,58	0,79	0,32
V%	0,93	-0,10	0,59	0,00
m%	-0,63	0,53	-0,84	0,20
PROD	-0,22	0,06	-0,29	-0,46

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T4 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T2, T3, T5 e T6 (à esquerda de o gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 25b).

O grupo no qual os indivíduos T4 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilha valores altos para V%, CTC, Mg, pH, K e MO e valores baixos para H + Al, Al e m%. O grupo no qual os indivíduos T2 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para H + Al e S, e valores baixos para Mg. O grupo no qual os indivíduos T1, T3 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para m% e Al, e valores baixos para Ca e pH.

Figura 25. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST).



De acordo com a Tabela 16, considerando-se os atributos físicos, químicos e as respectivas produtividades de matéria seca do capim Marandu, na profundidade de 0-0,20 m, o PC1 representou 36,47% da variância total, enquanto o PC2 representou 19,16% da variância total. Na profundidade de 0,20-0,40 m, o PC1 equivale a 29,46% e o PC2 a 23,96% da variância total. A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Na profundidade de 0-0,20 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T5 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T2, T3 (à esquerda do gráfico, caracterizada por um fortemente negativo coordenada no eixo) (Figura 26a).

O grupo do indivíduo T5 (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para Ca e valores baixos para PROD. O grupo do indivíduo T3 (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para a PROD e valores baixos para a  $AG > 2$ . O grupo no qual o indivíduo T2 está (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo), compartilha valores altos para PT e DMP, e valores baixos para a DS.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a dimensão 1 opõe indivíduos como T4, T5 e T6 (à direita do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T2, T5 e T6 (à esquerda do gráfico, caracterizado por uma coordenada fortemente negativa no eixo) (Figura 26b).

Tabela 16. Análise de componentes principais para atributos físicos e químicos do solo nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem (PROD) na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST).

PCA	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Autovalor	2,55	1,34	2,06	1,68
Variância explicada (%)	36,47	19,16	29,46	23,96
Variância acumulada (%)	36,47	55,63	29,46	53,42
Variáveis	Correlação <sup>(1)</sup>			
PT	-0,66	0,32	-0,07	0,33
DS	0,68	-0,52	0,31	-0,67
DMP	-0,36	0,68	0,59	-0,63
AG>2	0,68	0,41	-0,19	0,63
MO	0,57	0,07	0,80	0,30
Ca	0,62	0,29	0,84	0,39
PROD	-0,60	-0,50	-0,49	-0,31

<sup>(1)</sup>Correlações consideradas na análise dos componentes principais. Elaboração da própria autora.

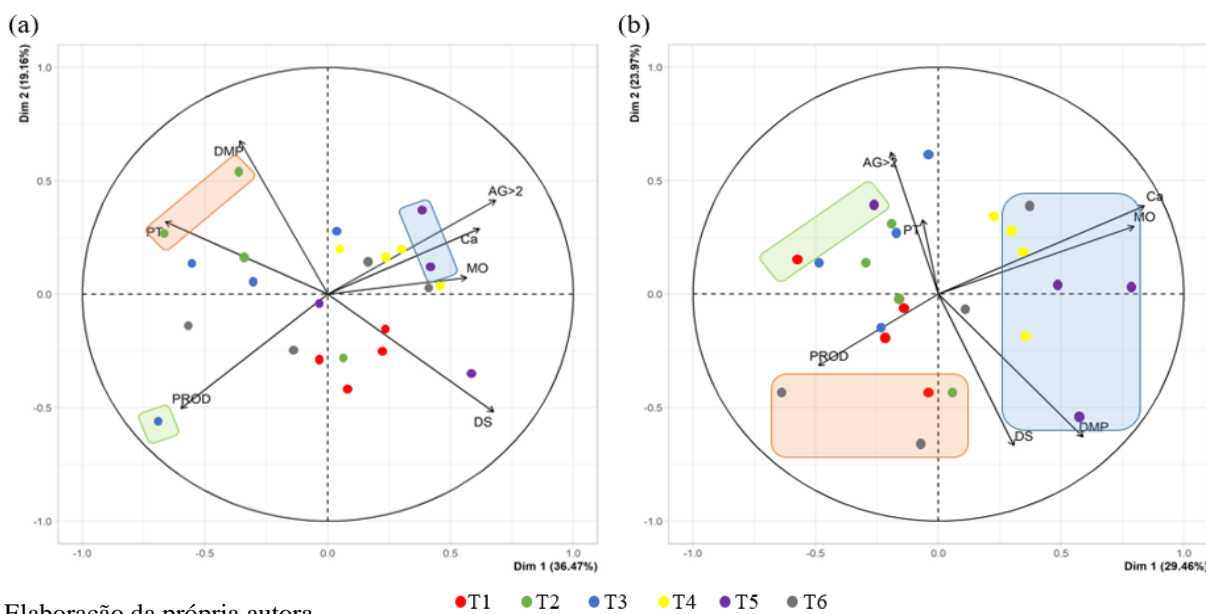
O grupo no qual os indivíduos T4, T5 e T6 se posicionam (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando valores altos para Ca e MO, e valores baixos para PROD. O grupo no qual os indivíduos T1, T2 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para PROD, e valores baixos para Ca e MO. O grupo no qual os indivíduos T1 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores baixos para DMP e DS.

A dimensão 2 opõe indivíduos como T1 e T5 (na parte superior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente positiva no eixo) a indivíduos como T1, T2 e T6 (na parte inferior do gráfico, caracterizada por uma coordenada fortemente negativa no eixo).

O grupo no qual os indivíduos T1 e T5 estão (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) compartilhando valores baixos para DMP e DS. O grupo no qual os indivíduos T1, T2 e T6 estão (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) compartilha valores altos para PROD e valores baixos para Ca e MO.



Figura 26. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m e matéria seca da forragem na safra 2019/20 em pastagem convencional (PAST).



Nesse sistema, na safra 2017/18 os tratamentos T2 (metodologia de Sousa, Lobato e Rein (2005)) e T5 (metodologia de Raij *et al.* (1996)) se correlacionaram com a V% e, em 2019/20 os tratamentos T4 (metodologia de Demattê (1986)) e T5 (metodologia de Raij *et al.* (1996)) também se correlacionam com a V%, evidenciando a importância da saturação por bases na relação com os demais atributos químicos do solo.

#### 4.5. Características do solo em diferentes sistemas de produção depois do uso do gesso agrícola (BEPE – La Coruña – Espanha)

##### 4.5.1. Matéria orgânica, C, N e relação C/N

Como observa-se na Tabela 17, os tratamentos com diferentes metodologias de gessagem não influenciaram o acúmulo de matéria orgânica, a quantidade de carbono (C) e nitrogênio (N) e tampouco a relação C/N nos diferentes sistemas de produção em solo arenoso, mesmo após 10 anos da adoção dos sistemas conservacionistas e 3 anos da aplicação do gesso.

Tabela 17. Acúmulo de matéria orgânica, carbono (C) e nitrogênio (N) e relação carbono nitrogênio no solo em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem.

Sistemas de produção <sup>(1)</sup>	Gesso <sup>(2)</sup>	M,O	C	N	Relação C/N
		-----%-----			
SSD	1	1,76 <sup>(ns)</sup>	1,02	0,09	12,29
SSD	2	1,87	1,09	0,09	12,39
SSD	3	1,97	1,15	0,10	12,43
SSD	4	1,42	0,83	0,07	11,67
SAP	1	1,11	0,64	0,06	11,92
SAP	2	1,33	0,78	0,06	13,42
SAP	3	1,10	0,64	0,05	12,16
SAP	4	0,74	0,43	0,03	13,43
PAST	1	1,40	0,82	0,07	13,03
PAST	2	1,38	0,80	0,06	12,98
PAST	3	1,02	0,59	0,05	12,95
PAST	4	1,48	0,86	0,07	12,47
DMS		0,99	0,58	0,04	1,99
CV%		32,76	32,83	29,84	7,18

<sup>(1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta), SAP (sistema agropastoril), PAST (pastagem convencional); <sup>(2)</sup> Gesso: Metodologias de gessagem T1: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); T2: Raij *et al.* (1996); T3: Sousa, Lobato e Rein (2005); T4: Caires e Guimarães (2016); <sup>(3)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

Considerando que a aplicação de gesso de acordo com as metodologias foi realizada seguindo as necessidades de cada subparcela, suprindo assim as necessidades individuais de cada área, ao se analisar os sistemas de produção (Tabela 18) pode-se verificar uma diferença significativa no acúmulo de matéria orgânica e nos teores de C e N, sendo que o SSD apresentou melhores resultados se comparado com o SAP e a pastagem (PAST), enquanto a relação C/N foi semelhante para os sistemas. A rotação e o consórcio de cultivos no SSD, com uso de leguminosas, plantas de cobertura e gramíneas influencia diretamente na quantidade e na qualidade da matéria orgânica produzida, atuando também sobre os teores de alguns componentes, como C e N, considerando que o tempo de decomposição de cada um dos resíduos culturais é diferente. Portanto, fica caracterizado que diferentes sistemas de manejo influenciam diretamente na quantidade de carbono dos solos (EBELING *et al.*, 2013; FONTANA *et al.*, 2011; TOMASI; INDA; DICK, 2012).

De acordo com Loss *et al.* (2011), o uso de sistemas de produção que aumentam o aporte de matéria orgânica a partir de diferentes espécies vegetais favorecem a

sustentabilidade agrícola pois, dentre as vantagens, aumentam o teor de C no solo e entender a dinâmica da MO nos solos nesses sistemas auxilia na escolha de estratégias de manejo que garantam o incremento orgânico necessário para se manter/ alcançar maior qualidade do sistema solo x ambiente. Observa-se também que o acúmulo de resíduos na superfície do solo ocasionado pelo SSD aumenta os teores de C na camada superficial e que, relacionado a isto, às raízes das plantas (colhidas ou de cobertura) promovem a recuperação da agregação do solo da área com maior volume total de poros (LIMA *et al.*, 2013).

Em solos de Cerrado, é de se esperar que os teores de matéria orgânica sejam baixos, entre 1 e 3 % mas, com o uso de sistemas sustentáveis de produção espera-se que esse aporte de matéria orgânica aumente, contribuindo com uma maior ciclagem de nutrientes, melhoria da infiltração e armazenagem de água e diminuição do processo erosivo. É de conhecimento que o cultivo consorciado de espécies forrageiras tropicais, como a *Urochloa brizantha* se destaca devido à sua alta relação C/N, e a existência dessa forrageira nos três sistemas de produção explicaria seus valores aproximados.

As gramíneas forrageiras do gênero *U. brizantha* apresentam ótimo desempenho em SSD ou SAP (COSTA *et al.*, 2015, PARIZ *et al.*, 2011, ROSSI *et al.*, 2011) pois apresentam elevada produção de matéria seca, média de 10 a 15 t ha<sup>-1</sup> (PACHECO *et al.*, 2008; PACHECO *et al.*, 2011) podendo manter a cobertura do solo por mais de 100 dias (COBUCCI *et al.*, 2007) além de apresentar grande potencial de manutenção da palha sobre o solo devido à sua alta relação C/N e lignina/N total, o que delonga sua decomposição, aumentando a possibilidade de uso em regiões mais quentes, como o Cerrado (TEIXEIRA *et al.*, 2011, PARIZ *et al.*, 2011).

Tabela 18. Acúmulo de matéria orgânica, carbono (C) e nitrogênio (N) e relação carbono nitrogênio no solo em diferentes sistemas de produção.

Sistemas de produção <sup>(1)</sup>	M.O	C	N	Relação C/N
	----- % -----			
SSD	1,75 a <sup>(2)</sup>	1,02 a	0,08 A	12,19 <sup>(ns)</sup>
SAP	1,07 b	0,62 b	0,05 B	12,73
PAST	1,32 b	0,78 b	0,06 b	12,86
DMS	0,37	0,21	0,02	0,93
CV%	24,84	24,98	24,67	6,97

Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

Além da rotação e o consórcio de cultivos no SSD, com uso de leguminosas e gramíneas, os maiores teores de N nesse sistema podem advir da adubação realizada nas safras com leguminosas e, de C, pela reposição através dos resíduos vegetais ou palhada acumulada em superfície.

#### 4.5.2. Espectroscopia FTIR e dados pré-processados

Como visto anteriormente, o índice I é como uma métrica de decomposição como a proporção de grupos funcionais aromáticos para alifáticos, enquanto que o índice II é uma razão de grupos funcionais C para O (Figura 27). Em relação aos índices I e II (Tabela 19), o SSD diferiu estatisticamente dos outros sistemas de produção, corroborando com os resultados obtidos na análise de acúmulo de matéria orgânica e de C no solo. Nesse caso, observa-se no SSD, uma maior proporção de compostos de grupos aromáticos e a menor oxidação da matéria orgânica.

É esperado que o SSD apresente uma maior densidade de compostos aromáticos pois, a ação de microorganismos nas porções alifáticas da matéria orgânica é muito mais intensa do que nas porções aromáticas (MILORI *et al.*, 1999). Entretanto, Segnini *et al.* (2013), Favoretto *et al.* (2008) e Campos *et al.* (2011) notaram que, por efeito do não revolvimento em SSD, ocorre diminuição na proporção de estruturas recalcitrantes, principalmente aromáticas, na MO do solo, reduzindo o seu grau de humificação, devido ao incremento relativo de matéria orgânica particulada proveniente dos resíduos culturais.

Tabela 19. Valores de índice I e índice II em relação aos sistemas de produção.

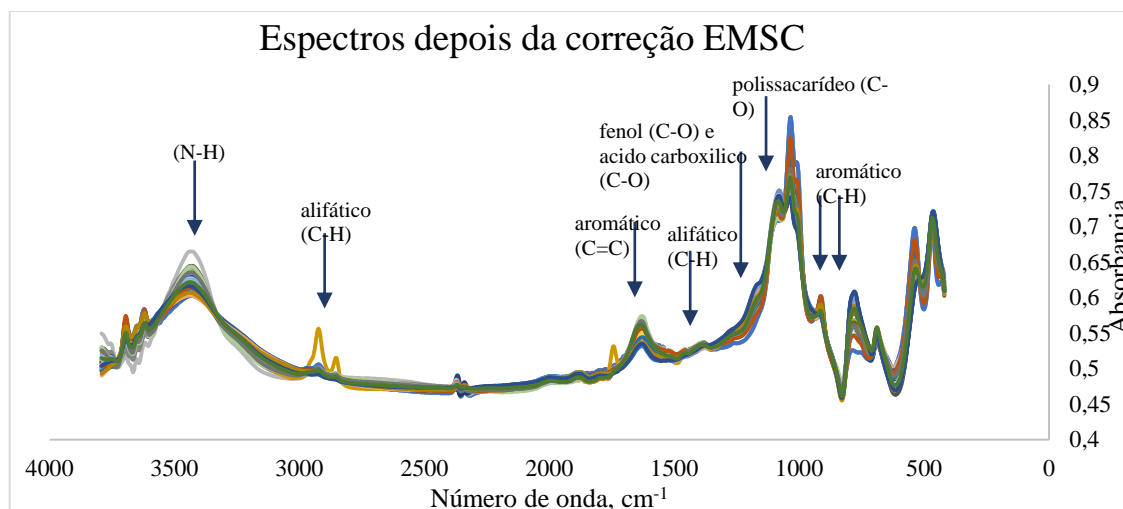
Sistema <sup>(1)</sup>	Índice I	Índice II
SSD	0,79 a <sup>(2)</sup>	1,42 a
SAP	0,78 b	1,40 b
PAST	0,79 a	1,40 b
DMS	0,01	0,01
CV%	0,41	0,81

<sup>(1)</sup>Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

O sistema de manejo, que tem por características o não revolvimento do solo, a rotação de culturas, leguminosas e gramíneas, e o consórcio entre elas, que culmina em uma maior cobertura do solo por vegetação viva e palhada justificam os valores obtidos

a partir dessas análises, com destaque para o SSD, embora similar à pastagem no índice I, foi superior no índice II.

Figura 27. Bandas usadas para analisar grupos funcionais orgânicos segundo Parikh *et al.* 2014.



Elaboração da própria autora.

#### 4.5.3. Superfície específica

Analisando a superfície específica nos sistemas de produção e considerando as metodologias de gessagem (Tabela 20) não foi possível observar diferenças entre os tratamentos, entretanto, se observados apenas os sistemas de produção (Tabela 21), o SSD apresentou uma maior superfície específica, de  $6,19 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  quando comparado com os demais sistemas.

Tabela 20. Superfície específica do solo em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem.

Sistemas de produção <sup>(1)</sup>	Gesso <sup>(2)</sup>	BET surface área
		$\text{m}^2/\text{g}$
SSD	1	5,18 <sup>(ns)</sup>
SSD	2	6,53
SSD	3	6,13
SSD	4	6,92
SAP	1	4,12
SAP	2	3,71
SAP	3	3,91
SAP	4	3,89
PAST	1	4,76

PAST	2	5,12
PAST	3	4,67
PAST	4	4,64
DMS		2,16
CV%		19,84

<sup>(1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta), SAP (sistema agropastoril), PAST (pastagem convencional); <sup>(2)</sup>Gesso: Metodologias de gessagem T1: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); T2: Raij *et al.* (1996); T3: Sousa, Lobato e Rein (2005); T4: Caires e Guimarães (2016); <sup>(3)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

A superfície específica varia de acordo com várias outras características do solo como a granulometria, tipo de mineral de argila ou o conteúdo de matéria orgânica. O histórico de plantio da área em SSD, com cultivo de soja na primeira safra e *Crotalaria juncea* na segunda safra de 2018/19, e milho em consórcio com *Urochloa brizantha* cv. Marandu na primeira safra de 2019/20, provavelmente, atuou no incremento de matéria orgânica na área, explicando o elevado valor da superfície específica do SSD.

Pelas ligações químicas entre os compostos da MO e as partículas minerais do solo, o aumento nos teores dessa MO melhora a qualidade dos solos, fazendo com que aumente a estabilidade de agregados além de outras características físicas decorrentes da agregação como, por exemplo, a densidade, porosidade, aeração, capacidade de infiltração e retenção de água (BAYER; MIELNICZUK, 2008; ZERZGHI *et al.*, 2010), fatores estes que estão diretamente relacionados e influem na superfície específica do solo. Em trabalho realizado por Silva e Mielniczuk (1997), houve efeitos da MO na estabilidade de agregados, mas dependente principalmente da textura e mineralogia do solo, sendo mais significativa em solos de textura arenosa, como aqui avaliado.

Tabela 21. Superfície específica do solo em diferentes sistemas de produção.

Sistemas de produção	Bet surface área	
	(m <sup>2</sup> /g)	
SSD	6,19	a <sup>(3)</sup>
SAP	3,91	b
PAST	4,80	b
DMS		0,94
CV%		18,04

<sup>(1)</sup>Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

#### 4.5.4. Granulometria a laser

A granulometria do solo foi analisada de acordo com duas teorias: a de Mie que, em termos gerais, descreve melhor a dispersão de partículas pequenas (SCHLUËTER;

VOGEL, 2016) e a de Franhoufer que, por considerar todas as partículas maiores, não é recomendado para avaliar amostras de partículas pequenas (BLOTT; PYE, 2016).

De acordo com a teoria de Mie (Tabela 22), avaliando a porcentagem de argila, silte, areia fina, areia grossa e areia total em relação as metodologias de gessagem, só foi possível observar diferenças nos teores de argila do sistema pastagem convencional, sendo que o T3 (metodologia de Sousa, Lobato e Rein) proporcionou as maiores porcentagens quando comparadas ao T2 (metodologia de Raij), sendo elas 6,43% e 4,09%, respectivamente. Para as demais variáveis não foram observadas diferenças significativas.

Tabela 22. Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria do espalhamento de Mie em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem.

Sistemas de produção <sup>(1)</sup>	Gesso <sup>(2)</sup>	MIE				
		Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total
		----- % -----				
SSD	1	4,54 <sup>(ns)</sup>	7,62	57,17	30,68	87,85
SSD	2	5,16	9,44	53,31	32,10	85,40
SSD	3	4,09	8,99	58,53	28,39	86,92
SSD	4	4,76	9,33	58,93	27,00	85,93
SAP	1	5,12	6,83	67,94	20,12	88,06
SAP	2	5,42	8,22	67,32	19,06	86,37
SAP	3	5,69	7,32	63,75	23,26	86,99
SAP	4	6,75	7,53	64,30	21,44	85,73
PAST	1	5,31 ab <sup>(3)</sup>	9,09	66,48	19,13	85,61
PAST	2	4,09 b	10,29	69,20	16,42	85,62
PAST	3	6,43 a	9,35	67,73	16,51	84,24
PAST	4	4,42 ab	12,16	66,63	16,79	83,42
DMS		20,17	3,17	7,53	7,37	3,69
CV%		19,17	16,27	5,39	14,84	1,95

<sup>1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta), SAP (sistema agropastoril), PAST (pastagem convencional); <sup>2)</sup> Gesso: Metodologias de gessagem T1: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); T2: Raij *et al.* (1996); T3: Sousa, Lobato e Rein (2005); T4: Caires e Guimarães (2016); <sup>3)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

Ainda pela teoria de Mie, mas agora considerando os sistemas de produção, não houve diferenças entre as partículas <0,002mm (argila) (Tabela 23). No SSD existe uma maior concentração de partículas entre 0,2 e 2mm (areia grossa) e menores concentrações de partículas menores, como de silte e areia fina, quando comparado, principalmente, com a pastagem (PAST). O SAP apresentou altos valores de partículas

de areia fina comparado ao SSD e baixa em partículas <0,002mm e 0,2 e 2mm (silte e areia grossa, respectivamente).

Tabela 23. Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria do espalhamento de Mie em diferentes sistemas de produção.

MIE					
Sistema <sup>(1)</sup>	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total
----- % -----					
SSD	4,64 <sup>(ns)</sup>	8,84 b <sup>(2)</sup>	56,98 b	29,54 a	86,52 A
SAP	5,74	7,47 c	65,82 a	20,97 b	86,79 A
PAST	5,06	10,22 a	67,51 a	17,21 b	84,72 B
DMS	1,22	1,36	3,94	3,77	1,49
CV%	22,04	14,34	5,79	15,56	1,62

<sup>(1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

Tabela 24. Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria de difração de Fraunhofer em diferentes sistemas de produção e metodologias de gessagem.

FRANHOUFER						
Sistemas de produção <sup>(1)</sup>	Gesso <sup>(2)</sup>	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total
----- % -----						
SSD	1	2,19 <sup>(ns)</sup>	8,44	57,99	31,40	89,38
SSD	2	2,69	10,49	54,10	32,74	86,84
SSD	3	2,39	9,84	58,92	28,86	87,78
SSD	4	2,33	10,24	59,79	27,65	87,44
SAP	1	1,96	7,54	69,67	20,85	90,51
SAP	2	2,32	8,99	68,89	19,80	88,69
SAP	3	2,44	8,10	65,45	24,02	89,48
SAP	4	2,46	8,45	66,61	22,48	89,09
PAST	1	2,68	10,10	67,62	19,62	87,23
PAST	2	2,73	11,31	67,34	18,63	85,97
PAST	3	2,82	11,64	68,64	16,92	85,55
PAST	4	2,49	13,81	66,72	16,99	83,71
DMS		0,57	3,74	7,50	6,91	3,87
CV%		10,53	17,15	5,30	13,46	2,01

<sup>(1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta), SAP (sistema agropastoril), PAST (pastagem convencional); <sup>(2)</sup> Gesso: Metodologias de gessagem T1: padrão (sem aplicação de gesso agrícola); T2: Raij *et al.* (1996); T3: Sousa, Lobato e Rein (2005); T4: Caires e Guimarães (2016); <sup>(3)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

O sistema PAST é o que apresenta maiores quantidades de partículas pequenas, compreendidas entre 0,002 e 0,2 mm, considerando que 77,73% do solo analisado dessa



área se encontra entre as classificações de silte e areia fina. As amostras coletadas nos três sistemas de produção para esse experimento evidenciam, de acordo com a teoria de Mie, que o SSD e o SAP apresentam maiores concentrações de fração areia se comparado com o PAST.

Considerando a teoria de Fraunhofer, as metodologias de gessagem (Tabela 24) não mostraram influencia na quantidade de argila, silte e areia das áreas estudadas. Por ser uma característica mais estável do solo e não estar sujeita a mudanças temporais rápidas, era de se esperar que as metodologias de gessagem não interferissem nas frações granulométricas do solo.

Em relação aos sistemas de produção (Tabela 25) foi possível observar diferenças para todas as variáveis sendo que, se comparadas, as teorias em relação aos sistemas de produção, a diferença apareceu somente para teor de argila, pois, com a teoria de Fraunhofer, a área de PAST apresenta maior concentração da fração argila quando comparada com o SAP.

Tabela 25. Teores de areia, silte e argila obtidos segundo a teoria de difração de Fraunhofer em diferentes sistemas de produção.

Sistema <sup>(1)</sup>	FRAUNHOFER				
	Argila	Silte	Areia Fina	Areia grossa	Areia total
	----- % -----				
SSD	2,40 ab <sup>(2)</sup>	9,75 b	57,70 b	30,16 a	87,86 a
SAP	2,29 b	8,27 b	67,65 a	21,79 b	89,44 a
PAST	2,68 a	11,71 a	67,58 a	18,07 c	85,61 b
DMS	0,29	1,6	3,75	3,56	1,62
CV%	11,02	15,06	5,44	14,23	1,72

<sup>(1)</sup> Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

As gramíneas do gênero *Urochloa*, por possuírem sistema radicular fasciculado, de rápido estabelecimento e vigorosos, têm maior ação da exsudação de raízes vivas, e durante a brotação de perfilhos, liberação de compostos cimentantes do material morto, acarretando em melhorias nas características físicas do solo. Esse efeito é maior quando a área é pastejada, pois a remoção da parte aérea ativa a brotação de novos perfilhos, entretanto com morte de parte do sistema radicular dos perfilhos antecessores, e, portanto, liberação destes compostos cimentantes na decomposição de tecidos radiculares.

Para os demais tamanhos de partículas de solo as duas teorias aqui utilizadas apresentam resultados semelhantes, demonstrando que o SSD apresenta partículas maiores (maior concentração de fração areia grossa), SAP com maior concentração de areia fina se comparado ao SSD, PAST com acumulado de partículas entre <0,002 e 0,2 mm (argila e silte), e SSD e SAP com os maiores teores de areia total se comparados com o PAST.

Na Tabela 26 apresenta-se a hipótese de diferença entre as médias dos parâmetros extraídos do gráfico da dimensão generalizada dos sistemas de produção. O parâmetro  $D_1$  é referente a dimensão de entropia e fornece informações a respeito da heterogeneidade da gama de escalas (SILVA *et al.*, 2020). Valores de  $D_1$  iguais a unidade sugerem uma distribuição mais homogênea entre as medidas da escala (ZELEKE; SI, 2006) e valores menores que zero indicam alta variabilidade espacial na distribuição (GUAN *et al.*, 2011). Para granulometria e fisissorção, considerando que os valores de  $D_1$  ficaram próximos a 1, os sistemas de produção estudados apresentaram distribuição homogênea, tendendo a monofractalidade (VIDAL VAZQUEZ *et al.*, 2013). Também é possível observar que em se tratando da fração granulométrica, os sistemas não diferiram estatisticamente entre si quanto a homogeneidade das áreas mas, na fisissorção observou-se uma diferença, sendo que o SAP apresentou o maior valor quando comparado com os demais sistemas, ou seja, apresentou uma menor variabilidade.

Tabela 26. Resumo estatístico da análise multifractal a partir da dimensão generalizada para granulometria seguindo a teoria de Mie e fisissorção nos três sistemas de produção.

MIE							
Sistema <sup>(1)</sup>	$D_1$	$D_2$	$D_{max}$	$D_{min}$	$D_{max}-D_{min}$	$D_{max}-D_0$	$D_0-D_{min}$
SSD	0,81 <sup>(ns)</sup>	0,71 b <sup>(2)</sup>	2,69 b	0,58 b	2,11 b	1,69 b	0,42 a
SAP	0,82	0,72 Ab	2,56 b	0,61 a	1,96 b	1,56 b	0,39 b
PAST	0,82	0,73 A	3,31 a	0,62 a	2,7 a	2,31 a	0,28 b
CV%	1,75	2,1	15,78	1,99	21,01	25,48	3,2
DMS	0,15	0,01	0,47	0,01	0,51	0,51	0,01
FISISSORÇÃO							
Sistema	$D_1$	$D_2$	$D_{max}$	$D_{min}$	$D_{max}-D_{min}$	$D_{max}-D_0$	$D_0-D_{min}$
SSD	0,75 b	0,62	1,49	0,42	1,07	0,49	0,58
SAP	0,76 a	0,63	1,30	0,42	0,88	0,30	0,58
PAST	0,75 b	0,62	1,39	0,41	0,98	0,39	0,59
CV%	0,99	1,40	12,96	1,87	18,24	46,03	1,33
DMS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,19	0,19	0,01

<sup>(1)</sup>Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

A amplitude do espectro da dimensão generalizada ( $D_{\max}-D_{\min}$ ) indica o grau de heterogeneidade das escalas observadas, ou seja, quanto maior o valor desse índice maior será a heterogeneidade das escalas da variabilidade observada no objeto de estudo (TOMILLO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020). Sabendo disso, constata-se que o solo da área sob pastagem (PAST) apresenta maior heterogeneidade na variabilidade para granulometria quando comparado com as áreas de SSD e SAP, e em relação a fisissorção, os sistemas estudados não diferem entre si. O  $D_0-D_{\min}$  e  $D_{\max}-D_0$  fazem referência às partículas maiores e menores do solo, respectivamente, corroborando com a análise de variância, onde o SSD possui partículas de solo maiores (areia) quando comparado com o PAST.

A partir do espectro de singularidade foram extraídos os parâmetros  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$  (Tabela 27). O espectro de singularidade descreve as propriedades de escala que são usadas para a medir uma variável e, as informações oriundas do espectro permitem um exame das propriedades locais da escala das variáveis do solo (BISWAS *et al.*, 2012; BERTOL *et al.*, 2017).

Os atributos do solo apresentam variabilidade na sua distribuição quando o espectro de singularidade for assimétrico, isto é, a rama do lado direito e do lado esquerdo apresentam comprimentos diferentes (SAN JOSÉ MARTINEZ *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2019).

O expoente de Holder ( $\alpha_0$ ), parâmetro oriundo do espectro de singularidade, é usado para descrever a heterogeneidade de uma medida, onde altos valores de  $\alpha_0$  indicam alta heterogeneidade da medida de uma variável específica (BERTOL *et al.*, 2017).

Tabela 27. Parâmetros do espectro de singularidade da granulometria seguindo a teoria de Mie e fisissorção nos três sistemas de produção.

MIE			
Sistema <sup>(1)</sup>	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
SSD	1,27 b <sup>(2)</sup>	0,55 b	2,95 b
SAP	1,24 b	0,57 a	2,81 b
PAST	1,32 a	0,58 a	3,64 a
CV%	3,56	2,06	15,95
DMS	0,05	0,01	0,53
FISISSORÇÃO			

Sistema	$\alpha_0$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
SSD	1,23 a	0,37 <sup>(ns)</sup>	1,6
SAP	1,18 b	0,38	1,39
PAST	1,2 b	0,37	1,49
CV%	2,29	1,88	14,4
DMS	0,03	0,01	0,23

<sup>(1)</sup>Sistemas de produção: SSD (sistema de semeadura direta) e SAP (sistema agropastoril); <sup>(2)</sup> significativo a 5% de probabilidade; <sup>(ns)</sup> não-significativo. Elaboração da própria autora.

Nos três sistemas de produção, as variáveis apresentaram valores de  $\alpha_0$  acima de 1 indicando alta heterogeneidade na sua medida. Para granulometria, o sistema PAST apresentou valor de  $\alpha_0$  maior em relação ao SSD e SAP, indicando um comportamento mais heterogêneo. Enquanto que para a fisissorção, o SSD foi quem apresentou um comportamento mais heterogêneo se comparado com os demais.

## 5. CONCLUSÕES

Em sistema de semeadura direta (SSD), pelo uso intensivo do solo arenoso e alta exportação de nutrientes, visando a melhoria da fertilidade e agregação do solo, recomenda-se a gessagem com base nas metodologias de Caires e Guimarães (2016) ou de Raij *et al.* (1996), entretanto, com variabilidade das metodologias quanto à correlação com a produtividade das culturas em rotação.

No sistema agropastorial (SAP), pelo maior tempo de pastagem no sistema, não houve uma metodologia que se destacasse quanto a melhoria da fertilidade do solo, contudo na agregação houve destaque para a metodologia de Raij *et al.* (1996). Entretanto, independentemente da metodologia, a aplicação de gesso foi superior ao controle sem gessagem, na melhoria física e química do solo. Apenas a metodologia de Vitti *et al.* (2008), destacou-se para incremento da produção de matéria seca do capim Marandu e da soja em sucessão.

Em área de pastagem intensiva (PAST), mas em solo arenoso, destacou-se a metodologia de Raij *et al.* (1996) na recomendação de gessagem anual, visando a melhoria e/ou manutenção da fertilidade do solo. Entretanto, na produtividade de matéria seca do capim Marandu, a metodologia de melhor correlação foi a de Souza, Lobato e Rein (2005).

Pelo uso da análise multivariada, em SSD, as metodologias de cálculo da necessidade de gessagem de Caires e Guimarães (2016) ou de Raij *et al.* (1996) melhor se correlacionaram com a V% (atributo de melhor correlação da fertilidade do solo).

Para o sistema agropastoril (SAP), na análise multivariada, as metodologias de cálculo da necessidade de gessagem que melhor se correlacionaram com redução da acidez e aumento do pH do solo foram as de Souza, Lobato e Rein (2005) e de Raij *et al.* (1996).

Numa pastagem de capim Marandu em solo arenoso, pela análise multivariada, a metodologia de cálculo da necessidade de gessagem de Raij *et al.* (1996) apresentou maior correlação com a V%.

Nas análises das características do solo em diferentes sistemas de produção depois do uso do gesso agrícola, não houve efeito da gessagem para C, N e relação C/N, e nem para a granulometria do solo. Entretanto, para incremento dos teores de C e N destaca-se ao sistema de semeadura direta (SSD), e para melhoria de agregação, a pastagem perene (PAST).

## 6. APÊNDICE

Dados de temperatura, evapotranspiração (ETP) e precipitação

Período	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura média	ETP	Precipitação	DCCH
Mês	°C			mm		
Ano de 2017						
novembro	31,7	19,7	25,7	151	184	12
dezembro	31,9	21,1	26,5	160	274,5	22
Ano de 2018						
Janeiro	31,7	20,7	26,2	159	213,3	21
fevereiro	31,7	19,8	25,8	133	109,9	18
Março	33,9	21,3	27,6	167	64,4	10
Abril	32,1	17,8	25,0	107	24,7	6
Maió	30,3	15,1	22,7	77	13,5	4
Junho	25,4	18,4	21,9	66	0	0
Julho	27,1	18,5	22,8	71	2,1	2
Agosto	29,5	14,3	21,9	81	24,5	6
setembro	32,4	17,3	24,8	115	69,5	12
Outubro	31,9	20,2	26,1	149	119,9	16
novembro	30,8	20,3	25,5	150	201,3	20
dezembro	33,1	20,5	26,8	170	150,3	12
Ano de 2019						
Janeiro	34,5	20,9	27,7	190	99,2	15
fevereiro	32,7	20,8	26,8	144	255,6	21
março	32,1	20,2	26,2	140	149,8	14
Abril	32,4	18,5	25,5	109	148,2	10
Maió	30,8	16,4	23,6	85	28,8	4
Junho	29,7	14,9	22,3	67	7,4	2
Julho	29	13,4	21,2	66	15,5	2
agosto	30,5	15,8	23,2	86	50,1	3
setembro	33,9	18,3	26,1	25	17,8	4
outubro	35,1	20,2	27,7	178	65,4	9
novembro	33,7	20,9	27,3	167	205,5	17
dezembro	31,4	21,2	26,3	159	99,9	19
Ano de 2020						
janeiro	33	21,3	27,1	172	221,9	19
fevereiro	31,7	21	26,4	141	284,2	23
março	34	18,8	26,4	141	71	6
Abril	33,4	16	24,7	106	37,8	3

Dados: CIIAGRO Online

Doses de gesso calculadas e aplicadas de acordo com a necessidade de cada parcela (2017) e cada subparcela (2018 e 2019) baseadas em cinco metodologias de gessagem e o controle, sem gesso, no sistema de semeadura direta (SSD).

Sistema	Tratamento	Ano de aplicação		
		2017	2018	2019
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
SSD	1	4.500	3.360	4.876
SSD	1	4.500	2.640	4.224
SSD	1	4.500	4.320	4.224
SSD	1	4.500	5.800	3.032
SSD	2	700	720	700
SSD	2	700	720	700
SSD	2	700	720	700
SSD	2	700	720	700
SSD	3	3.080	6.920	2.156
SSD	3	3.080	5.240	572
SSD	3	3.080	2.760	4.793
SSD	3	3.080	5.080	2.768
SSD	4	0	2.000	1.500
SSD	4	0	1.520	1.500
SSD	4	0	0	1.500
SSD	4	0	1.520	1.500
SSD	5	584	600	584
SSD	5	584	600	584
SSD	5	584	600	584
SSD	5	584	600	584
SSD	6	0	0	0
SSD	6	0	0	0
SSD	6	0	0	0
SSD	6	0	0	0

Doses de gesso calculadas e aplicadas de acordo com a necessidade de cada parcela (2017) e cada subparcela (2018 e 2019) baseadas em cinco metodologias de gessagem e o controle, sem gesso, no sistema agropastoril (SAP).

Sistema	Tratamento	Ano de aplicação		
		2017	2018	2019
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
SAP	1	4.800	3.440	2.164
SAP	1	4.800	2.560	2.228
SAP	1	4.800	3.400	2.956
SAP	1	4.800	2.720	2.764
SAP	2	700	720	700
SAP	2	700	720	700
SAP	2	700	720	700
SAP	2	700	720	700
SAP	3	3.240	4.480	1.992
SAP	3	3.240	3.000	1.860
SAP	3	3.240	2.640	2.088
SAP	3	3.240	3.720	1.464
SAP	4	0	0	1.500
SAP	4	0	0	1.500
SAP	4	0	0	1.000
SAP	4	0	0	1.000
SAP	5	584	600	584
SAP	5	584	600	584
SAP	5	584	600	584
SAP	5	584	600	584
SAP	6	0	0	0
SAP	6	0	0	0
SAP	6	0	0	0
SAP	6	0	0	0



Doses de gesso calculadas e aplicadas de acordo com a necessidade de cada parcela (2017) e cada subparcela (2018 e 2019) baseadas em cinco metodologias de gessagem e o controle, sem gesso, na pastagem convencional (PAST).

Sistema	Tratamento	Ano de aplicação		
		2017	2018	2019
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
PAST	1	3.764	5.280	2.956
PAST	1	3.764	3.320	4.760
PAST	1	3.764	3.760	4.300
PAST	1	3.764	4.800	3.724
PAST	2	700	720	700
PAST	2	700	720	700
PAST	2	700	720	700
PAST	2	700	720	700
PAST	3	852	2.000	684
PAST	3	852	720	948
PAST	3	852	1.360	908
PAST	3	852	1.400	492
PAST	4	1.500	0	500
PAST	4	1.500	0	500
PAST	4	1.500	0	500
PAST	4	1.500	0	500
PAST	5	584	600	584
PAST	5	584	600	584
PAST	5	584	600	584
PAST	5	584	600	584
PAST	6	0	0	0
PAST	6	0	0	0
PAST	6	0	0	0
PAST	6	0	0	0



Figura 28. Semeadura da forragem na entrelinha do milho em área de SSD



Figura 29. Desenvolvimento do milho em área de SSD



Figura 30. Milho em SSD



Figura 31. Produção de palhada de capim Marandu em SSD





Figura 32. Desenvolvimento da soja sob palhada de capim Marandú em SAP



Figura 33. Desenvolvimento do milho em SAP



Figura 34. Pastagem em SAP



Figura 35. Pastagem convencional





Figura 36. Coleta de amostras de forragem



Figura 38. Mesa de tensão com amostras de solo em anéis volumétricos para análise de porosidade e densidade do solo e fertilidade



Figura 39. Torrões de solo após passar por peneira de 4mm para avaliação de estabilidade de agregados



Figura 40. Preparo das amostras de solo + KBr para análise espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

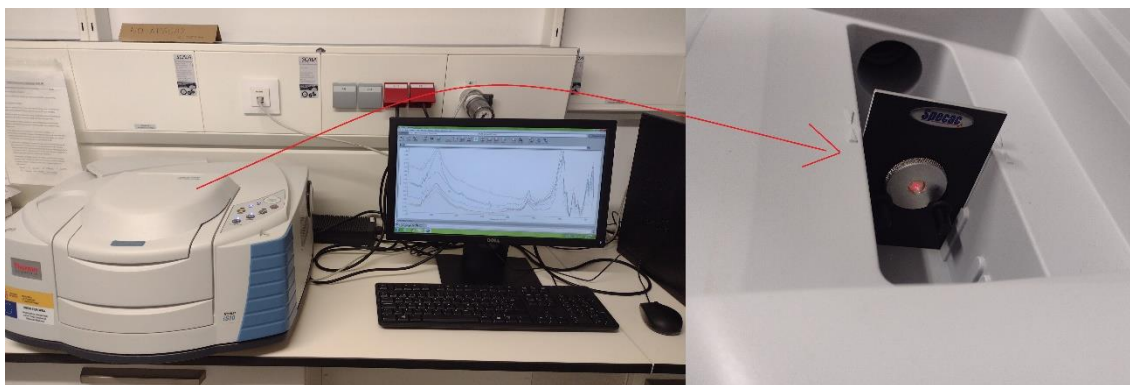


Figura 41. Análise de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)





Figura 42. Sacos de gesso com doses calculadas de acordo com cada metodologia avaliada



Figura 43. Distribuição dos sacos com gesso de acordo com as metodologias avaliadas



Figura 44. Aplicação de gesso em cada parcela, de acordo com as metodologias avaliadas



Figura 45. Equipe de funcionários, estagiários e pesquisador do IAC em dia de aplicação de gesso

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, F.; RAWAYFIH, Z. Basalumite and alumite: A possible cause of sulfate retention by acid soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.41, p.686-692, 1977.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p.189-197, 2001.
- AMARAL, L. A.; ASCARI, J.; DUARTE, W.M.; MENDES, I, R, N.; SANTOS, E. S.; JULIO, O. L. L. Efeito de doses de gesso agrícola na cultura do milho e alterações químicas no solo. **Agrarian**, Dourados, v. 10, n. 35, p. 31-41, 2017.
- ANGERS, D. A.; MEHUYS, G. R. Aggregate stability to water. *In*: CARTER, M. R. **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Canadian Society of Soil Science, 2000. p. 529-539.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; SILVA, V. P.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura pecuária floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1-12, 2011.
- BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície incorporada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 507-514, 2005.
- BARRETO, R. F. **Estado nutricional, produtividade do milho e atributos químicos do solo em função da aplicação superficial de gesso e de calcário em sistema de semeadura direta**. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, 2016.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinamica e função da matéria orgânica. *In*: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole, p. 7-18, 2008.
- BERTIN, E. G.; ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F. Plantas de cobertura em pré-safra ao milho em plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, p. 379-386, 2005.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BANDEIRA, D. H.; FERREIRO, J. P.; VÁZQUEZ, E. V. Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 287, p. 116–125, 2017.

BILIBIO, W. D.; CORRÊA, G. F.; BORGES, E. N. Atributos físicos e químicos de um latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 4, p. 817-822, 2010.

BISWAS, A. P. H.; SI, C. Application of multifractal and joint multifractal analysis in examining soil spatial variation: a review. *In*: QUADFEUL, S. A. (ed.). **Fractal analysis and chaos in geosciences**. 9. ed. [S.l.]: IntechOpen, 2012.

BLOTT, S. J.; PYE, K. A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.26, p. 1237-1248, 2016.

BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C.; DICK, D. P.; KNICKER, H.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M. Organic matter composition in density fractions of cerrado ferralsols as revealed by CPMAS <sup>13</sup>C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 80-86, 2014.

BOER, G. B. J.; WEERD, C.; THOENES, D.; GOOSSENS, H. W. J. Laser diffraction spectrometry: fraunhofer diffraction versus Mie scattering. **Particle & Particle Systems Characterization**, Weinheim, v. 4, p. 14-19, 1987.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G. F.; COSTA, L. M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um Latossolo com compactação simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 125-130, 1997.

BORGMANN, C. **Movimentação de nutrientes em latossolo argiloso sob sistema de plantio direto**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, 2019.

BOSSOLANI, J. W. **Reaplicação superficial de calcário e gesso em sistema plantio direto: efeitos no solo e na sucessão de culturas**. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790 p.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura do milho safrinha. *In*: ROSCOE, R. *et al.* **Tecnologia e produção: milho safrinha e culturas de inverno**. Curitiba: MIDIOGRAF, 2009.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 60, p. 309-319, 1938.



- CAIRES, E. F.; GUIMARÃES A. M. Recomendação de gesso para solos sob plantio direto da região sul do Brasil. *In: FERTIBIO*, 2016, Goiânia. **Anais [...]**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 486., 2016.
- CAIRES, E. F.; MASCHIETTO, E. H. G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 2, p. 209-216, 2011.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011.
- CAIRES, E.; GARBUIO, F.; CHURKA, S.; JORIS, H. Use of gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103 p. 1804-1814, 2011b.
- CAIRES, E. F.; CHURKA, S.; GARBUIO, F. J.; FERRARI, R. A.; MORGANO, M. A. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 370-379, 2006.
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 125-136, 2004.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 213-223, 2001.
- CAMPOS, B. H.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R. S.; FIORIN, J. E. Carbon stock and its compartments in a subtropical Oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 805-817, 2011.
- CANIEGO, F. J.; ESPEJO, R.; MARTÍN M. A.; SAN JOSÉ, F. Multifractal scaling of soil spatial variability. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 182, p. 291–303, 2005.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Relations of clay fraction mineralogy, structure and water retention in oxidic latosols (oxisols) from the brazilian cerrado biome. *In: VALAŠKOVA, M.; MARTYNKOVA, G. S. (ed.). Clay minerals in nature: their characterization, modification and application. [S.l]: IntechOpen, 2012.*
- CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 277:289, 2010.

CARVALHO, D. B.; BELLO, M.; PISSAIA, A.; MORAES, A. de.; PELISSARI, A.; MARQUES, R.; BONA FILHO, A. Fertilidade do solo em integração lavoura-pecuária na região de Guarapuava/PR. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 3, p. 57-65, 2005.

CARVALHO, M. C. S.; RAIJ, B. van. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 192, p. 37-48, 1997.

CASTRO, A. M. C.; RUPPENTHAL, V.; RANDO, E. M.; MARCHIONE, M. S.; GOMES, C. J. A. Calcário e gesso no desenvolvimento do milho cultivado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 6, n. 1, p. 8-16, 2013.

CASTRO, W. J.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; LIMA, J. O.; OLIVEIRA, L. F. C.; RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C. C. Erodibilidade de Solos do Cerrado Goiano. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 4, n. 2, p. 305-320, 2011.

CHEFETZ, B.; Y. HADER, Y. C. Dissolved organic carbon fractions formed during composting of municipal solid waste: properties and significance. **Acta Hydrochimica et Hydrobiologica**, Weinheim, v. 26, p. 172-179, 1998.

CHHABRA, A. B.; JENSEN, R. V. Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum. **Physical Review Letters**, College Park, v. 62, p. 1327-1330, 1989.

CHI, C.; ZHAO, C.; SUN, X.; WANG, Z. Reclamation of saline-sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. **Geoderma**, Amsterdam, v. 187, p. 24-30, 2012.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 37-43, 2012.

COBUCCI, T.; WRUCK, F. J.; KLUTHCOUSKI, J.; CAVALCANTE, L. M.; MARTHA JUNIOR, G. B.; CARNEVALLI, R. A.; TEIXEIRA, S. R.; POLINÁRIA, A.; TEIXEIRA, M. Opções de integração lavoura pecuária e alguns de seus aspectos econômicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, p. 64-79, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**, v. 7, safra 2019/20- Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-33, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**, v. 6, safra 2018/19 - Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-47, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**, v. 9, safra 2017/19- Nono levantamento, Brasília, p. 1-178, 2018.

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

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M. ULIAN, N. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; CAVASANO, F. A.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Produtividade da soja sobre palhada de forrageiras semeadas em diferentes épocas e alterações químicas no solo. **Agrária**. Recife, v. 10, n. 1, p. 8-16, 2015.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 818829, 2015a.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; CECANO, T.; BALERINI, F. Impact of an integrated no-till crop–livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, ecosystems & environment**, Netherlands, v. 190, p. 43-51, 2014b.

COSTA, K. A. P.; ARAUJO, J. L.; FAQUIM, V.; OLIVEIRA, I. P.; FIGUEIREDO, F. C.; GOMES, K. W. Extração de macronutrientes pela a fitomassa do capim-xaraés “xaraés” em função das doses de nitrogênio e potássio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p.1162-1166, 2008.

COUTINHO, L. M. **Aspectos do cerrado**: solo. 2000. Disponível em: [http://ecologia.ib.usp.br/cerrado/aspectos\\_solo.htm](http://ecologia.ib.usp.br/cerrado/aspectos_solo.htm). Acesso em: 05 nov. 2021.

CREMON, C.; ROSA JÚNIOR, E. J.; SERAFIM, M. E.; ONO, F. B. Análise micromorfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho Distroférrico em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 1, p. 139-146, 2009.

CRUSCIOL, C. A. C.; ARTIGIANI, A. C. C. A.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. F. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, Amsterdam, v. 137, p. 87–99, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; McCRAY, J. M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium magnesium Silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 6, p. 1843-1854, 2014.

CUSTÓDIO, D. P.; OLIVEIRA, I. P. D.; COSTA, K. A. D. P.; SANTOS, R. S. M.; FARIA, C. D. Avaliação do gesso no desenvolvimento e produção do capim-tanzânia. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 6, n. 1, p.27-34, 2006.

DEMATTE, J. L. I. Solos arenosos de baixa fertilidade: estratégia de manejo. In: SEMANA AGROINDUSTRIAL, 5, SEMANA “Luiz de Queiroz”, 29, 1986, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1986. (Mimeografado).

DIAS, L. E. **Uso de gesso como insumo agrícola**. Seropédica: Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Biologia - CNPBS, 1992. 6 p. (Comunicado Técnico, 7).

DING, G.; NOVAK, J. M.; AMARASIRIWARDENA, D.; HUNT, P. G.; XING, B. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. **Soil Science Society and America Journal**, Madison, v. 66, p. 421–429, 2002.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; PÉREZ, D. V. Substâncias húmicas e suas relações com o grau de subsidência em Organossolos de diferentes ambientes de formação no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 225-233, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço energético nacional 2013, **I Relatório Síntese I ano base 2012**. Disponível em: [http://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2013\\_Web.pdf](http://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf) . Acesso em: 12 set. 2021.

ENGLAND. Malven Instruments Ltd. 1998, 1999. MAN 0247: **Operators Guide**. England, 2003. 108 p.

FAGERIA, N. K. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 43, n. 16, p. 2063-2113, 2012.

FAVARETTO, N.; NORTON, L. D.; JOERN, B. C.; BROUDER, S. M. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p.1788-1796, 2006.

FAVORETTO, C. M.; GONÇALVES, D.; MILORI, D. M. B.; ROSA, J. A.; LEITE, W. C.; BRINATTI, A. M.; SAAB, S. C. Determinação da humificação da matéria orgânica de um Latossolo e de suas frações organo-minerais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 1994-1996, 2008.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Revista Semina: Ciências Agrônomicas**, Londrina, v. 31, p. 913-932, 2010.

FOIS, D. A. F.; LANA, M. C.; VERA, L. R. Q.; ALVAREZ, J. W. R.; ROJAS, C. A. L.; TIECHER, T. Efeito do gesso agrícola na disponibilidade de enxofre e no rendimento da soja e milho safrinha. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel v. 10, n. 3, p. 35 a 47, 2017.

- FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 1, p.22-30, 2007.
- FONTANA, A.; SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BRITO, R. J.; BENITES, V. M. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 545-550, 2011.
- FONTANELI, R. S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H. P.; IGNACZAK, J. C.; ZOLDAN, S. M. Análise econômica de sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 11, p. 2129- 2137, 2000.
- FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2045–2058, 2003.
- FRAZAO, L. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 641- 648, 2008.
- FUENTES, M.; GOVAERTS, B.; DE LEÓN, F.; HIDALGO, C. O.; SAYRE, K. D.; ETCHEVERS, J.; DENDOOVEN, L. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 30, n. 3, p. 228–237, 2009.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 691-699, 2007.
- GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.
- GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, S. A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 991-1017.
- GRIFFITHS, P. R.; HASETH, J. A. **Fourier transform infrared spectrometry**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- GUAN, X.; YANG, P.; LI, Y. Analysis on spatial variability of soil properties based on multifractal theory. **Journal of Basic Science and Engineering**, New York, v. 19, p. 712–720, 2011.

GUELFY, D. R.; FAQUIN, V.; SOUZA, M. A. S.; OLIVEIRA, G. C.; SANTOUCY, S. G.; BASTOS, C. E. A. Características estruturais e produtivas do capim-marandu sob efeitos de corretivos da acidez, gesso e compactação do solo. **Interciencia**, Venezuela, v. 38, n. 9, p. 681-687, 2013.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121-145, 2005.

HENTSCHEL, H. G. E.; PROCACCIA, I. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. **Physica D**, Amsterdam, v. 8, p. 435-444, 1983.

HSU, J. H.; LO, S. L. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 104, p. 189-196, 1999.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R.; SILVA, A. F.; FREITAS, F. C. L. Manejo de plantas daninhas no consórcio de milho com capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*). **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 22, p. 553-560, 2004.

JAMALA, G. Y.; OKE, D. O. Humic substances and Mineral-Associated soil organic carbon as influenced by land use in Southeastern Adamawa State, Nigeria. **Journal of Environmental Science**, Orissa, v. 5, n. 5, p. 59-70, 2013.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; COBUCCI, T. Opções e vantagens da integração lavoura-pecuária a produção de forragens na entressafra. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, p.16-29, 2007.

KOZIŁOWSKI, M.; KOMISAREK, J. Textural diversity in selected Retisols in the catena of the Opalenica Plain (western Poland). **Soil Science Annual**, Philadelphia, v. 68, p. 11-18, 2017.

LEÃO, M. G. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D.; PEREIRA, G. T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, p. 644-651, 2011.

LEBRON, I.; SUAREZ, D.L.; YOSHIDA, T. Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 66, p. 92-98, 2001.

LILAND, K. **Extended multiplicative signal correction. package “EMSC”, Date 2016- 04-24. Repository CRAN.** Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/EMSC/index.html>. Acesso em: 15 dez. 2021.

LILAND, K. H.; MEVIK, B. H. **Baseline**: baseline correction of spectra. Disponível em: URL <https://CRAN.R-project.org/package=baseline>. R package version: 1.2-1. 2015. Acesso em: 12 ago. 2021.

LIMA, R. C.; MELO, L. M. M.; YANO, E. H.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Modalities for soil preparation and gypsum application in ultisol: system productivity of sugar cane. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1180-1190, 2013.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, p.16-23, 2013.

LOPES, E. E. S. **Aplicação superficial de calcário e gesso em solos arenosos: atributos químicos do solo e qualidade da pastagem *Urochloa brizantha* cv. Piatã**. 2020. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2020.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. A. G. **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para a produção agropecuária**. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1994. 62 p. (Boletim técnico, 5).

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica. **Idesia**, Chile, v. 29, n. 2, p. 11-19, 2011.

LUZ, L. R. Q. P.; PAZ GONZÁLEZ, A.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; FERREIRO, J. P.; DORTZBACH, D. Superfície específica de solos do sul do Brasil. *In*: CONGRESSO SOBRE USO E MANEJO DO SOLO, 7, 2016, Coimbra. **Livro de Resumos [...]**. Coimbra: [s.n.], 2016. p. 19.

MAIRHOFER, S.; ZAPPALA, S.; TRACY, S. R.; STURROCK, C.; BENNETT, M.; MOONEY, S. J.; PRIDMORE, T. RooTrak: Automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from X-ray microcomputed tomography images using visual tracking. **Plant Physiology**, Rockville, v. 158, p. 561-569, 2012.

MALAVOLTA, E. **Efeitos de doses e fontes de enxofre em culturas de interesse econômico. I- Capim colônia. II- Colza. III- Sorgo Sacarino**. São Paulo: Centro de Pesquisa e Promoção de Sulfato de Amônio, 1984. 60 p. (Boletim técnico, 3).

MALVERN INSTRUMENTS. **Sample dispersion & refractive index guide**. Spring Lane South: Malvern Instruments, 1996.

MASCHIETTO, E. H. G. **Gesso agrícola na produção de milho e soja em solo de alta fertilidade e baixa acidez em subsuperfície em plantio direto**. 2009. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; YANO, E. H.; PEREIRA, F. C. B. L. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras

consoiciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 183 - 193, 2015.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras e milho em sucessão com soja em região de cerrados **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 1, p. 251-9, 2012.

MICHALOVICZ, L.; MÜLLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R.; KRAMER, L.F.M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 1496-1505, 2014.

MILORI, D. M. B. P.; PÉREZ, M. G.; BAGNATO, V. S.; MELO, W. J.; MARTINETO, L. Aplicação de fotoluminescência para determinação da humificação da matéria orgânica em solos sob plantio direto e manejo convencional. **Revista Pesquisa em Andamento**, São Carlos, n. 30, p. 1-10, 1999. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/29706/aplicacao-de-fotoluminescencia-para-determinacao-do-grau-de-humificacao-da-materia-organica-em-solos-sob-plantio-direto-e-manejo-convencional>. Acesso em: 11 maio 2022.

MODA, L. R.; BORGES, B. M. M.; FLORES, R. A.; SANTOS, C. L. R.; PRADO, R. M.; SOUSA, J. I. Gessagem na cultura da soja no sistema de plantio direto com e sem adubação potássica. **Revista Agroambiente On-line**, [Roraima], v. 2, n. 7, p. 129-135, 2013.

MORETI, D.; ALVES, M. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; CARVALHO, M. P. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 167-175, 2007.

MÜLLER, M. M. L.; TORMENA, C. A.; GENUÍ, A. M.; KRAMER, L. F. M.; MICHALOVICZ, L.; CAIRES, E. F. Structural quality of a no-tillage red latosol 50 months after gypsum application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 1005-1014, 2012.

NAVA, G.; ERNANI, P. R.; SÁ, A. A.; PEREIRA, A. J. Soil Composition and nutritional status of apple as affected by long-term application of gypsum. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 215-222, 2012.

NEIS, L.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PINTO, F. A. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 409-416, 2010.

NUERNBERG, N. J.; RECH, T. D.; BASSO, C. **Usos do gesso agrícola**. 2. ed. Florianópolis: Epagri, 2005. 36 p. (Boletim Técnico, 122).

OLIVEIRA, M. P.; ROQUE, C. G.; PIATI, G. L.; GODINHO, O. L.; TEODORO, P. E. Plantas de cobertura e efeito residual do calcário e gesso nos atributos físicos do solo em subsuperfície. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 9, p. 1-18, 2020.



OLIVEIRA, I. P.; COSTA, K. A. P.; FAQUIN, V.; MACIEL, G. A.; NEVES, B. P.; MACHADO, E. L. Efeitos de fontes de cálcio no desenvolvimento de gramíneas solteiras e consorciadas. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 33, n. 2, p. 592-598, 2009.

OLIVEIRA, P. S. R.; FITTIPALDI, W. L. S. L.; OLIVEIRA JÚNIOR, P. R.; GUALBERTO, R.; GUIMARÃES, A. M. Efeitos de tipos de preparo do solo e uso de gesso agrícola sobre as características químicas e produtividade de milho e braquiária em cultivo consorciado. **Scientia Agraria Paranaensis**, Cascavel, v. 6, n. 1, p. 53-65, 2007.

PACHECO, L. P.; PIRES, F. R.; MONTEIRO, F. P.; PROCOPIO, S. O.; ASSIS, R. L.; CARMO, M. L.; PETTER, F. A. Desempenho de plantas de cobertura em sobressemeadura na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 815-823, 2008.

PACHECO, L. P.; LEANDRO, W. M.; ALMEIDA-MACHADO, P. L. O. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 1, p. 17-25, 2011.

PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. A.; ASSIS, R. L. DE; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 9, p.1228-1236, 2013.

PARIZ, C. M.; ANDEOTTI, M.; BUZETTI, S.; BERGAMASCHINE, F. A.; ULIAN, N. A.; FURLAN, L. C.; MEIRELLES, P. R. L.; CAVASANO, F. A. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 2029 - 2037, 2011.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 495-505, 2014.

PAVAN, M. A. **Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais**. Piracicaba: POTAFOS - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. 3 p. (Informações Agronômicas, 35).

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 48, p. 33-38, 1984.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 46, p. 993-997, 1982.

- PELLEGRINI, B. D. **Adsorção máxima de sulfato como critério de gessagem e lixiviação de Íons em Solos contrastantes**. 2012. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/repositorio/storage/pb00007.pdf>. Acesso em: 11 maio 2022.
- PORTES, T. A.; CARVALHO, S. I. C.; OLIVEIRA, I. P.; KLUTHCOUSKI, J. Análise do crescimento de uma cultivar de braquiária em cultivo solteiro e consorciado com cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 1349-1358, 2000.
- RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.
- RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 284 p.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285 p. (Boletim técnico, 100).
- RAIJ, B. van. **Reações de gesso em solos ácidos**. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2, 1992, p. 106- 119, 1992.
- RAMOS, B. Z.; TOLEDO, J. P. V. F.; LIMA, J. M. D.; SERAFIM, M. E.; BASTOS, A. R. R.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSCIONE, A. R. Gypsum applications to coffee: influence on calcium, magnesium and potassium contents and pH of the solution of a dystrophic Red Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 4, p. 1018-1026, 2013.
- RAMPIM, L.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1623-1638, 2013.
- RAMPIM, L.; LANA M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FONTANIVA, S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1687-1698, 2011.
- RASHID, M.; IQBAL, M. N.; AKRAM, M.; ANSAR, M.; HUSSAIN, R. Role of gypsum in wheat production in rainfed areas. **Soil Environment**, Dordrecht, v. 27 p. 166-170, 2008.
- REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochimica**, Pretoria, v. 4, p. 1-6, 1972.
- RESENDE, H. O. **Efeito residual da gessagem e adubação fosfatada na cultura do milho segunda safra**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2018.

- RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. *In: KER, J. et al. (ed.). Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 47-79.
- RODRIGUES, J. C.; CARMO, D. L.; NANNETTI, D. C.; MARQUES, H.; PEREIRA, R. A. Relação Ca/Mg no solo e produtividade do cafeeiro em função de elevadas doses de gesso agrícola. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 9, 2015, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: [s.n.], 2015.*
- ROSA JUNIOR, E. J.; MARTINS, R. M. G.; ROSA, Y. B. C. J.; CREMON, C. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p. 37-44, 2007.
- ROSA JUNIOR, E. J.; VITORINO, A. C. T.; VITORINO P. F. P. G. Efeito da calagem, gessagem e adubação fosfatada sobre algumas características físicas de um Latossolo Roxo Distrófico de Dourados - MS. **Revista Científica**, v. 1, n. 1, p. 5-12, 1994.
- ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 622-630, 2011.
- ROTH, C. H.; PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D.; MEYER, B.; FREDE, H. G. Efeito das aplicações de calcário e gesso sobre a estabilidade de agregados e infiltrabilidade de água em um Latossolo Roxo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 10, n. 2, p. 163-166, 1986.
- ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, Uberlândia v. 26, p. 24-32, 2010.
- SÁ, J. C.; TIVET, F.; LAL, R.; SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 136, p. 38-50, 2014.
- SALDANHA, E. C. M.; ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J. Uso do gesso mineral em Latossolo cultivado com cana-deaçúcar. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 1, p. 36-42, 2007.
- SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. (Comunicado Técnico, 1980).
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAUER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, M. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SAN JOSÉ MARTÍNEZ, F.; CANIEGO, J.; GUBER, A.; PACHEPSKY, Y.; REYES, M. Multifractal modeling of soil microtopography with multiple transects data. **Ecological Complexity**, Amsterdam, v. 6, p. 240–245, 2009.

SANTOS, E. L.; MARONEZE, L. P.; TONSIC, D. H.; ARMACOLO, N. M.; GUIMARÃES, M. F.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.; BALBINO JR, A. A. Distribuição de raízes, resistência tênsil e friabilidade de agregados em solo com diferentes sistemas de manejo. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 16, p. 19-28, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, D. C.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; CARVALHO, J. S.; ABEIJON, L. M.; PILLON, C. N. Agregação e proteção física da matéria orgânica em planossolo háptico sob diferentes sistemas de manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 54-63, 2012.

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

SANTOS, L. N. S.; PASSOS, R. R.; SILVA, L. V. M.; OLIVEIRA, P. P.; GARCIA, G. O.; CECÍLIO, R. A. Avaliação de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho amarelo sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, p. 940-947, 2010.

SANTOS, G. G.; SILVEIRA, P. M.; MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BALBINO, L. C. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um latossolo vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 115-122, 2008.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 12-16, 2002.

SATO, J. H. **Métodos para determinação do carbono orgânico em solos do Cerrado**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

SCHLUETER, S.; VOGEL, H. J. Analysis of soil structure turnover with garnet particles and X-Ray microtomography. **Plos One**, San Francisco, v. 11, p. 1-17, 2016.

SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORDI, D. M. B. P.; SILVA, W. T. L.; SIMÕES, M. L.; CANTARELLA, H.; MARIA, I. C.; MARTIN-NETO, L. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane

straw and soil management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 321- 326, 2013.

SÉQUARIS, J. M. Modeling the effects of  $\text{Ca}^{2+}$  and clay-associated organic carbon on the stability of colloids from topsoils. **Journal of Colloid and Interface Science**, Philadelphia, v. 343, p. 408-414, 2010.

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M. E.; MILLER, W. P.; FARINA, M. P. W.; PAVAN, M. A.; FEY, M. V. Use of gypsum on soils: a review. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p. 1-111, 1989.

SILVA, Ê. F. F., TOMILLO, A. G.; SOUZA, D. H. S.; VIDAL-VÁZQUEZ, E., SIQUEIRA, G. M., GONZÁLEZ, A. P. Multifractal and joint multifractal analysis of soil micronutrients extracted by two methods along a transect in a coarse textured soil. **European Journal of Soil Science**, West Sussex, v. 36, 2020.

SILVA, F. A.; FREITAS, F. C. L.; ROCHA, P. R. R.; CUNHA, J. L. X. L.; DOMBROSKI, J. L. D.; COELHO, M. E. H.; LIMA, M. F. P. Milho para ensilagem cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional sob efeito de veranico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 1, p. 327-340, 2015.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 313-319, 1997.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A History of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 7-31, 2004.

SOARES, G. F. **Gesso e fósforo na sucessão soja/milho safrinha**. 2016. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016.

SOBRAL, L. F.; CINTRA, F. L. D.; SMYTH, T. J. Lime and gypsum to improve root depth of orange crop in an Ultisol of the Coastal Tablelands. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 836-839, 2009.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; MELLO, F. F. C. Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 965-974, 2010.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 675-688, 2008.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na

implantação do sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 928-935, 2008.

SOUSA, D. M. G.; NUNES, R.S.; REIN, T.A.; SANTOS JUNIOR, J. D.G.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção na região do cerrado. *In*: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. (ed.). **Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no cerrado**. Goiânia: Gráfica UFG, 2016. Cap. 5, p. 124-190.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; ALBRECH, J. C. Resposta a gesso pela cultura do algodão cultivada em sistema de plantio direto em um Latossolo de Cerrado. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9. 2008, Brasília, DF. **Anais [...]**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso do gesso agrícola nos solos do cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. (Circular Técnica, 32). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/568533/1/cirtec32.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2022.

SOUSA, D. M. G.; VILELA, L.; LOBATO, E.; SOARES, W. V. **Uso de gesso, calcário e adubos para pastagens no cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. (Circular Técnica, 12).

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. DOS; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 37-44, 2010a.

SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J.; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming an surface application of gypsum. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 50, p. 1254-1278, 1986.

TABATABAI, M. A.; HANWAY, J. J. Sulphur fractions and carbonnitrogenphosphorus-sulphur relationship in same Brazilian and Iowa soils. **Soil Science Society American Proceeding**, Madison, v. 39, n. 1, p. 51-55, 1975.

TEIXEIRA, M. B.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PIMENTEL, C. Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 867-876, 2011.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TOMASI, C.; INDA, A. V.; DICK, D. P. Substâncias húmicas em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Revista Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2180- 2184, 2012.

TOMILLO, A. G.; DIAS, R. S.; VÁZQUEZ, E. V.; VILA, I. V.; ARMESTO, M. V.; DAFONTE, J. D.; GONZÁLEZ, A. P. Multifractal and joint multifractal description of available nutrients concentrations extracted by two methods along short transects. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Abingdon, v. 66, p. 236–249, 2019.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 3, p. 421-428, 2008.

VEUM, K.; GOYNE, K.; KREMER, R.; MILES, R.; SUDDUTH, K. Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 117, p. 81–99, 2014.

VIDAL-VÁZQUEZ, E.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; MIRANDA, J. G. V.; MENK, J. R. F.; SIQUEIRA, G. M.; MIRÁS-AVALOS, J. M.; PAZ GONZÁLEZ, A. Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 12, n. 3, p. 1-13, 2013.

VILAS-BOAS, P. R.; ROMANO, R. A.; FRANCO, M. A. M.; FERREIRA, E. C.; FERREIRA, E. J.; CRESTANA, S.; MILORI, D. M. B. P. Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: A fast analytical technique. **Geoderma**, Amsterdam, v. 263, p. 195-202, 2016.

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

VILELA, L.; MACEDO, M. C. M.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; KLUTHCOUSKI, J. Benefícios da integração lavoura-pecuária. *In*: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. p. 145-170.

VILELA, L.; SOAREA, W. V.; SOUSA, D. M. G.; MACEDO, M. C. M. **Calagem e adubação para pastagens na região do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000. 15 p. (Circular técnica/ Embrapa Cerrados, 37).

VITAL, A. F. M.; SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; SOUTO, J. S. Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso e fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 30-36, 2005.

VITTI, G. C.; PRIORI, J. C. **Calcário e gesso: os corretivos essenciais ao plantio direto**. 2009. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA9-Fertilidade01.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2022.

VITTI, C. G.; LUZ, P. H. C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. E. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 2008. 104 p.

WANG, F.; WANG, J.; WANG, Y. Using multi-fractal and joint multi-fractal methods to characterize spatial variability of reconstructed soil properties in an opencast coal-mine dump in the Loess area of China. **Catena**, West Midlands, v. 182, p. 104-111, 2019.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONCA, E. S.; ALVARENGA, R. C. Organic-matter pools of soil under pines and annual cultures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, p. 1707-1722, 2010.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

WIDOMSKI, M. K.; STEPNIIEWSKI, W.; POLAKOWSKI, C. Molding water content of clay soils and hydraulic properties of mineral liners of waste landfills. **Ecological Chemical Engineering**, Opole, v. 22, p. 251-263, 2015.

YODER R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, n. 5, p. 337-357, 1936.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, n. 37, v. 1, p. 110-117, 2007.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, p. 128-137, 2015.

ZELEKE, T. B.; SI, B. C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. **Geoderma**, Amsterdam, v. 134, p. 440-452, 2006.

ZERZGUI, H.; GERBA, C. P.; BROOKS, J. P.; PEPPER, I. L. Long-term effects of land application of class b biosolids on the soil microbial populations, pathogens, and activity. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 39, p. 402-408, 2010.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; BIGHAM, J. M.; RESCK, D. V. S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: soil texture and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 1204-1214, 2007b.