

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

EPITÁCIO JOSÉ DE SOUZA

**NANOTECNOLOGIA APLICADA A AVALIAÇÃO FÍSICA DE UM LATOSSOLO DE
CERRADO SOB SISTEMAS DE SUCESSÃO DE CULTURAS EM PLANTIO
DIRETO**

Ilha Solteira - SP
2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

EPITÁCIO JOSÉ DE SOUZA

**NANOTECNOLOGIA APLICADA A AVALIAÇÃO FÍSICA DE UM
LATOSSOLO DE CERRADO SOB SISTEMAS DE SUCESSÃO DE
CULTURAS EM PLANTIO DIRETO**

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

Marlene Cristina Alves
Orientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729n Souza, Epitácio José de.
Nanotecnologia aplicada a avaliação física de um latossolo de cerrado sob sistemas de sucessão de culturas em plantio direto / Epitácio José de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
143 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção , 2018

Orientador: Marlene Cristina Alves
Inclui bibliografia

1. Sustentabilidade ambiental. 2. Plantas de cobertura. 3. Compactação do solo. 4. Interação organomineral. 5. *Oryza sativa* L. 6. *Phaseolus vulgaris* L.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: NANOTECNOLOGIA APLICADA A AVALIAÇÃO FÍSICA DE UM LATOSSOLO DE CERRADO SOB SISTEMAS DE SUCESSÃO DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO

AUTOR: EPITÁCIO JOSÉ DE SOUZA

ORIENTADORA: MARLENE CRISTINA ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA, especialidade: SISTEMAS DE PRODUÇÃO pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. MARLENE CRISTINA ALVES

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



Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI

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



Prof. Dr. ORIVALDO ARF

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas - Campinas/SP



Prof. Dr. SIMÉRIO CARLOS SILVA CRUZ

Unidade Acadêmica Especial de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Goiás - UFG

Ilha Solteira, 18 de janeiro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais, José Vitalino de Souza e Maria Martins do Carmo Souza, por terem me concedido o dom da vida, por terem me dado a educação, valores e por sempre estarem ao meu lado me dando forças para continuar e me incentivando mesmo nos momentos mais difíceis, pelo amor e carinho dedicados durante a minha vida e principalmente pelas suas orações.

Ao meu irmão por todo o apoio, amizade e cumplicidade.

À minha avó Izolira Maria da Silva (*in memoriam*), amor incondicional e eterno, por ter me ensinado a ser nobre, na essência da palavra, a ter garra, perseverança e otimismo. Que falta a senhora me faz!

À minha namorada, pelo apoio, incentivos, orações, conselhos, companheirismo e acima de tudo pelo amor, carinho e amizade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida, por estar presente em todos os momentos, me abençoando, me protegendo e me dando paciência, sabedoria, discernimento e tranquilidade, durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais José e Maria, pela educação, orações, incentivos e conselhos por todo carinho e amor que tiveram comigo nessa etapa de minha vida.

A professora Dra. Marlene Cristina Alves, minha orientadora e exemplo profissional, pela oportunidade concedida, dedicação, paciência, confiança, amizade e pelos ensinamentos transmitidos durante esse período, que levarei por toda a vida.

Ao meu irmão Hugo e todos os meus familiares que estiveram do meu lado me apoiando e incentivando.

À minha namorada Mariana, por todo o amor, companheirismo, compreensão e colaboração, muito obrigado por estar sempre ao meu lado nesta fase importante da minha vida.

Aos professores e funcionários do DEFERS e DEFTASE da UNESP/FEIS pela contribuição no meu crescimento profissional.

Aos professores Dr. Orivaldo Arf (DEFTASE), Dr. Rafael Montanari (DEFERS), Dr. João Carlos Silos Moraes (DFQ) por terem concedido seus equipamentos e laboratórios para a realização das análises deste trabalho, agradeço pela confiança.

Aos professores Dr. Alan Rodrigo Panosso e Dra. Glaucia Amorim Faria, pelo auxílio nas análises estatísticas dos dados.

Ao técnico Vitor Mendes (LCE-UFSCar) operador do microscópio eletrônico de transmissão, pelo o auxílio na caracterização das nanopartículas do solo.

Aos meus colegas Vagner, Paulão, Eder, Lenta, Furado e Eliza, em especial aos técnicos de laboratório e funcionários da FEPE: Carlinhos, João, Marcelo, Diego, Buchada, Alvino, Alonso, Valdivino, Alexandre, Polaco, Júlio, Juliano, César, Baiano, Têjinho, Eduardo e Tião Carreiro por toda ajuda e colaboração concedida para a execução deste trabalho e pela amizade.

Aos meus amigos e agregados da República Whiskynão: Frango, Acerola, Cotonete, Mixaria, Esfirra, Kubambo, Rosário, Geek, Sequela, Polar, Coice, Joãozinho, Fronha, Zezinha, Jequeti e Soro, que me acolheram, por toda amizade e companheirismo durante esses anos.

Aos amigos e colegas do Curso de Pós-Graduação em Agronomia que estiveram comigo nesta caminhada, pela paciência e companheirismo, obrigada pelos bons momentos que passamos juntos, estarão para sempre em minha memória.

À Capes pela bolsa de estudo concedida e à CNPq pelo financiamento do projeto de pesquisa.

RESUMO

A compactação do solo em sistemas plantio direto (SPD) tem comprometido a sua sustentabilidade. Para contornar esse problema, a escarificação mecânica e a manutenção da cobertura vegetal são sugeridas como práticas de manejo a fim de restabelecer as condições ideais de cultivo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito a curto prazo da escarificação e do uso de diferentes plantas de cobertura na manutenção do SPD envolvendo as culturas do arroz de “terras altas” e feijão de “inverno”). O trabalho foi desenvolvido em Selvíria, MS em 2014/15 e 2015/16, em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados disposto em parcelas subdivididas, tendo nas parcelas as condições da superfície do solo em SPD (com e sem escarificação mecânica) e nas subparcelas as plantas de cobertura (pousio, *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) e *Pennisetum glaucum*), com quatro repetições, cultivadas com arroz e feijão. Foram avaliadas as características fitotécnicas das culturas e atributos físicos e químicos do solo em quatro camadas (0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m). Realizou-se a análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação de médias. Além disso, na camada de 0 a 0,05 m do solo também foram analisadas as características das nanopartículas e nanoestruturas do solo. Para essas análises incluiu-se o solo de Cerrado remanescente para comparação com os tratamentos estudados. As nanopartículas (< 200nm) foram extraídas e caracterizadas por microscopia eletrônica de transmissão (MET) e espectrometria de infravermelho (FTIR). Os resultados obtidos foram avaliados por meio da análise dos componentes principais e agrupamentos hierárquicos. As plantas de cobertura e a escarificação não influenciaram a produtividade do arroz de “terras altas” e do feijão de “inverno” após dois anos de cultivo. O estudo das nanopartículas e nanoestruturas mostrou-se sensível as alterações promovidas pelo uso da escarificação e das plantas de cobertura, apresentando assim potencial para ser uma ferramenta suplementar indicadora de qualidade do solo. O fósforo (P) foi o atributo químico mais influenciado pelas práticas de manejo pela sucessão com milheto (*Pennisetum glaucum*) sem escarificação nas duas camadas superficiais e nas demais camadas pela sucessão *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*). Os atributos físicos e químicos do solo combinados com a caracterização de nanopartículas permitiram identificar que o milheto (*Pennisetum glaucum*) sem escarificação como mudanças estáveis para a

manutenção do SPD. As características geométricas e químicas das nanopartículas auxiliam na identificação de mudanças causadas pelas práticas de manejos sobre os indicadores físicos e químicos da qualidade do solo. A contribuição das plantas de cobertura para a manutenção do SPD está ligada diretamente pela adição de matéria orgânica do solo (MOS). Deste modo contribuindo para as melhorias dos atributos químicos, físicos e influenciaram no comportamento das nanopartículas e nanoestrutura do solo.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental. Plantas de cobertura. Compactação do solo. Interação organomineral. *Oryza sativa* L. *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

Soil compaction in no-tillage systems (NTS) affects the sustainability of this management. To overcome the problem, mechanical chiseling and maintenance of the cover crop were suggested as management practices reestablishing ideal cultivation conditions. Thus, the objective of this study was to evaluate the short-term effect of mechanical chiseling and the use of different cover crops in the maintenance of NTS involving as crops "dryland" rice and "winter" common bean. The experiment was conducted in Selvíria, state of Mato Grosso do Sul, Brazil, during the 2014/15 and 2015/16 growing season, on a typical clayey dystrophic Red Latosol, with experiment was evaluated in a randomized block design in split plots, with the main plots as SPD soil surface conditions (with and without mechanical chiseling) and in the subplots as cover crop (fallow, *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Urochloa ruziziensis* and *Pennisetum glaucum*), with four replications, cultivated with "dryland" rice and "winter" common bean. The agronomic characteristics of the crops and soil physical and chemical attributes in four layers (0 a 0.05; 0.05 a 0.10; 0.10 a 0.20 e 0.20 a 0.40 m). The analysis of variance and Tukey's test were performed at a 5% probability for comparison of average. In addition, treatments of the 0 to 0.05 m layer of the soil were also compared to the natural closed area, through the conventional chemical and physical properties and characteristics of its nanoparticles and nanostructures. For these analyze the remaining Cerrado soil was included for comparison with the treatments studied. As nanoparticles (<200 nm) were extracted and characterized by transmission electron microscopy (TEM) and infrared spectrometry (FTIR). The results were evaluated by principal component analysis and hierarchical groupings. Cover crops and mechanical chiseling did not influence the yield of "dryland" rice and "winter" common bean after two years of cultivation. The study of the nanoparticles and nanostructures was sensitive to the changes promoted using mechanical chiseling and the cover crops, thus presenting potential to be a supplementary soil quality indicator tool. The phosphorus (P) was the chemical attribute most influenced by management practices by succession with pearl millet (*Pennisetum glaucum*) without mechanical chiseling in the two superficial layers and in the other layers by the succession *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*). The physical and chemical attributes of the soil combined with the characterization of nanoparticles allowed to identify that

pearl millet without mechanical chiseling as stable changes to the maintenance of NTS. The geometric and chemical characteristics of the nanoparticles assist in the identification of changes caused by the management practices on the physical and chemical indicators of soil quality. The contribution of cover crops to NTS maintenance is directly linked by the addition of soil organic matter (SOM). Thus, contributing to the improvements of the chemical and physical attributes of soil and influenced the behavior of the nanoparticles and the nanostructure of the soil.

Keywords: Environmental sustainability. Cover crop. Soil compaction. Organo-mineral interaction. *Oryza sativa* L. *Phaseolus vulgaris* L.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Imagem de satélite da localização do experimento, FEPE, Selvíria, MS, Brasil.32
- Figura 2** – Croqui da área experimental, Selvíria, MS, Brasil.34
- Figura 3** - Plantas de cobertura dessecadas, antes de serem acamadas pelo rolo faca, 2014/15.35
- Figura 4** – Amostra após ser sonificada em um aparelho ultrasonificador (A) e sobrenadante após a centrifugação (B).....44
- Figura 5** - Sobrenadante diluído 1:10 (A) e sobrenadante depositado sobre as grade de Cu com filme de carbono e acondicionadas em placas de Petri (B)....44
- Figura 6** - Microscópio Eletrônico de Transmissão TECNAI™ G2 F20 (HRTEM), Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil.45
- Figura 7** – Aparelho de Infravermelho (A); e pastilhas de brometo de potássio (KBr) com partículas de Latossolo Vermelho Distrófico menores que 200 nm (B).46
- Figura 8** - Precipitação pluvial (mm), evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}) temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), durante a condução dos experimentos de plantas de cobertura, arroz de terras altas e o feijão nos anos agrícolas de 2014/15 (a) e 2015/16 (b).....48
- Figura 9** - Acúmulo térmico diário (graus dia) durante o ciclo da cultura do arroz nos anos agrícolas de (2014/15) e (2015/16).....50
- Figura 10** - Desdobramento da interação dos grãos quebrados integrais (GQI) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC) na safra 2015/16. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para ESC dentro de PC, e maiúscula, para PC dentro da ESC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.....55
- Figura 11** - Acúmulo térmico diário (graus dia) durante o ciclo da cultura do feijão nos anos agrícolas de (2014/15) e (2015/16).....57
- Figura 12**- Desdobramento da interação do teor de matéria orgânica do solo (MOS) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.....62
- Figura 13** - Desdobramento da interação do teor de fósforo (P) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, no ano agrícola 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.66

- Figura 14** - Desdobramento da interação do teor de fósforo (P) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de Plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, safra 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.....70
- Figura 15** - Desdobramento da interação do teor de fósforo (P) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, no ano agrícola de 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.74
- Figura 16** -Desdobramento da interação resistência do solo à penetração (RP) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, no agrícola de 2015/16. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.....81
- Figura 17** -Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015....90
- Figura 18** - Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015....93
- Figura 19** -Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016....96
- Figura 20** - Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016.....99
- Figura 21** - Espectros infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, com e sem o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão no ano agrícola de 2014/15 e Cerrado remanescente..... 102
- Figura 22** - Espectro infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, com e sem o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão no ano agrícola de 2015/16 e Cerrado remanescente..... 104

- Figura 23** – Médias do diâmetro de Feret de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16. 106
- Figura 24** – Médias das áreas de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nas safras de 2014/15 e 2015/16..... 108
- Figura 25** – Médias do perímetro de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16. 109
- Figura 26** – Médias da circularidade de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16. 110
- Figura 27** - Biplot construído com os dois primeiros componentes principais (CP), apresentando a distribuição dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2014/15 e o Cerrado remanescente..... 113
- Figura 28** - Dendograma de similaridade entre os tratamentos em função dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, discriminantes ($r > 0,5$) do CP1 (A); CP2 (B); CP1 CP2 (C), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2014/15 e o Cerrado remanescente..... 116
- Figura 29** - Biplot construído com os dois primeiros componentes principais (CP), apresentando a distribuição dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2015/16 e o Cerrado remanescente..... 119
- Figura 30** - Dendograma de similaridade entre os tratamentos em função dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, discriminantes ($r > 0,5$) do CP1 (A); CP2 (B); CP1 CP2 (C), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,0 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2015/16 e o Cerrado remanescente..... 121

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Atributos químicos e físicos do solo da área experimental, antes da instalação do experimento, nas camadas estudadas. Selvíria, MS, 2012.33
- Tabela 2** - Resumo da análise de variância das características, altura de planta (Alt), número de panícula (NP), massa hectolétrica (MHe), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), nas safras de 2014/15 e 2015/16.....51
- Tabela 3** - Valores médios de altura de plantas(Alt) e número de panículas m⁻² (NP) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nas safras de 2014/15 e 2015/16.....51
- Tabela 4**- Valores médios de massa hectolétrica (MHe), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.52
- Tabela 5** - Resumo da análise de variância das características, rendimento benefício do grão integral (RBI), grãos inteiros integrais (GII), grãos quebrados integrais (GQI), rendimento benefício polido (RBP), grãos inteiros polidos (GIP) e grãos quebrados polidos (GQP)do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.54
- Tabela 6**- Valores médios de rendimento benefício do grão integral (RBI), grãos inteiros integrais (GII), grãos quebrados integrais (GQI) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nas safras de 2014/15 e 2015/1655
- Tabela 7** - Valores médios de rendimento benefício polido (RBP), grãos inteiros polidos (GIP) e grãos quebrados polidos (GQP) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nas safras de 2014/15 e 2015/16.....56
- Tabela 8** - Resumo da análise de variância das características, população final (Pop.), número de vagem por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.)do feijão cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.58
- Tabela 9**– Valores médios da população final (Pop.), número de vagem por planta (NVP) e número de grãos por planta (NGP) do feijão após o cultivo de arroz de terras altas sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....58
- Tabela 10** - Valores médios do número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do feijão após o cultivo de arroz de

	terras altas sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	59
Tabela 11	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	61
Tabela 12	- Valores médios dos atributos químicos do solo, teores de fósforo (P) e matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	63
Tabela 13	- Valores médios dos atributos químicos do solo, teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	63
Tabela 14	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), teor de alumínio (Al), soma de base (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	64
Tabela 15	- Valores médios dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	65
Tabela 16	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	66
Tabela 17	- Valores médios dos teores de fósforo (P) e matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	67
Tabela 18	- Valores médios dos teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	67
Tabela 19	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), soma de base (SB), capacidade de trocas catiônicas	

	(CTC) e saturação por base (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	68
Tabela 20	-Valores médios dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	69
Tabela 21	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fosforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	69
Tabela 22	- Valores médios dos atributos químicos do solo, teor de fosforo (P) e de matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	70
Tabela 23	- Valores médios dos teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	71
Tabela 24	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	72
Tabela 25	- Valores médios dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	72
Tabela 26	- Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fosforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	73
Tabela 27	- Valores médios dos atributos químicos do solo, teor de fosforo (P) e de matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.....	74

- Tabela 28** - Valores médios dos teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.75
- Tabela 29** - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.76
- Tabela 30** - Valores médio dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.76
- Tabela 31**- Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.78
- Tabela 32** - Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.79
- Tabela 33**- Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência à penetração do solo (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.80
- Tabela 34** - Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.82
- Tabela 35** - Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (Total), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.83
- Tabela 36** - Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência à penetração do solo (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC)

	e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	83
Tabela 37	- Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	84
Tabela 38	- Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	85
Tabela 39	- Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência do solo a penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	86
Tabela 40	- Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	87
Tabela 41	- Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	87
Tabela 42	- Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência à penetração do solo (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.	88
Tabela 43	- Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015....	92
Tabela 44	- Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015....	95

- Tabela 45** - Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016.....97
- Tabela 46** - Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016.. 100
- Tabela 47** - Autovalores e porcentagem de variação explicada pelos quatros primeiros componentes principais (CP) e classificação dos coeficientes de correlação entre os indicadores e os componentes principais, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2014/15 e o Cerrado remanescente..... 112
- Tabela 48** - Autovalores e porcentagem de variação explicada pelos quatros primeiros componentes principais (CP) e classificação dos coeficientes de correlação entre os indicadores e os componentes principais, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2015/16 e o Cerrado remanescente..... 118

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	HIPÓTESES	17
3	OBJETIVOS	18
3.1	Geral	18
3.2	Específico	18
4	REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1	Sistema plantio direto e seu efeito sobre o solo	19
4.2	Escolha das plantas de coberturas para o sistema plantio direto	21
4.3	Indicadores de qualidade do solo	23
4.4	Nanotecnologia aplicada a estudos de solos	28
5	MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1	Localização e características gerais da área experimental	32
5.2	Tratamentos e delineamento experimental	33
5.3	Instalação e condução do experimento	34
5.3.1	Caracterização e preparo do solo	34
5.3.2	Implantação e condução das plantas de coberturas	34
5.3.3	Implantação e condução da cultura do arroz	35
5.3.3.1	<i>Emergência das plântulas</i>	37
5.3.3.2	<i>Florescimento</i>	37
5.3.3.3	<i>Maturação</i>	37
5.3.3.4	<i>Altura de plantas</i>	37
5.3.3.5	<i>Acamamento</i>	37
5.3.3.6	<i>Número de panículas por metro quadrado</i>	37
5.3.3.7	<i>Número total de grãos por panícula</i>	38
5.3.3.8	<i>Massa de 100 grãos</i>	38
5.3.3.9	<i>Produtividade de grãos</i>	38
5.3.3.10	<i>Massa hectolétrica</i>	38
5.3.3.11	<i>Rendimento de engenho grão integral</i>	38
5.3.3.12	<i>Rendimento de engenho grão polido</i>	38
5.3.4	Implantação e condução da cultura do feijão	39
5.3.4.1	<i>População final de plantas</i>	40
5.3.4.2	<i>Componentes da produção</i>	40
5.3.4.3	<i>Produtividade de grãos</i>	40
5.3.5	Atributos químicos do solo	41
5.3.6	Atributos físicos do solo	41
5.3.7	Caracterização de nanopartículas e nanoestruturas do solo	42
5.3.7.1	<i>Preparação e extração de nanopartículas e nanoestruturas do solo</i>	42
5.3.7.2	<i>Análise em microscópio eletrônico de transmissão (MET)</i>	44
5.3.7.3	<i>Espectrometria de infravermelho (FTIR)</i>	45
5.4	Análise estatística	46
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1	Elementos meteorológicos	48
6.2	Efeitos no desenvolvimento e produtividade do arroz de terras altas	50
6.3	Efeitos no desenvolvimento e produtividade do feijão	57

6.4	Atributos químicos do solo	61
6.4.1	Atributos químicos do solo na camada 0,00 a 0,05 m	61
6.4.2	Atributos químicos na camada 0,05 a 0,10 m	65
6.4.3	Atributos químicos na camada 0,10 a 0,20 m	69
6.4.4	Atributos químicos na camada 0,20 a 0,40 m	73
6.5	Atributos físicos do solo	78
6.5.1	Atributos físicos do solo na camada 0,00 a 0,05 m	78
6.5.2	Atributos físicos do solo na camada 0,05 a 0,10 m	82
6.5.3	Atributos físicos do solo na camada de 0,10 a 0,20 m	84
6.5.4	Atributos físicos do solo na camada 0,20 a 0,40 m	86
6.6	Caracterização das nanopartículas e nanoestruturas do solo	90
6.7	Nanopartículas, nanoestruturas e atributos físicos e químicos do solo como indicadores da sua qualidade	112
7	CONSIDERAÇÕES GERAIS	124
8	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais o Brasil se consolida no cenário mundial como uma potência agrícola. Grande parte deste sucesso, nos últimos anos, ocorreu devido a diversificação da produção, ao uso de novas tecnologias e as abundâncias de recursos naturais. No entanto, o estabelecimento de sistemas de produção competitivos para agricultura brasileira depende da adoção e manutenção de práticas agrícolas que são alicerçadas em bases sustentáveis. Dentre as diversas práticas agrícolas empregadas na agricultura brasileira, o sistema plantio direto (SPD) recebe grande destaque, pois trata-se de um sistema conservacionista, que se baseia no não revolvimento do solo, rotação de culturas e manutenção da cobertura permanente do mesmo (MATEUS; SANTOS, 2012; ALVES; CARVALHO; SOUZA, 2015).

Apesar dos inúmeros benefícios ao solo, a realização de práticas no SPD tem ocasionado problemas de compactação ocasionando um aumento de densidade e diminuição da porosidade do solo e da capacidade de infiltração de água (MIORANZA et al., 2015). Isso ocorre especialmente em áreas irrigadas, onde o uso do solo é intensificado, aumentando o tráfego de máquinas pesadas em virtude do número de operações agrícolas, que em muitas das vezes, ocorrem com umidade do solo acima do ideal. Segundo Freddi et al. (2007), a compactação do solo altera a sua densidade e a porosidade, limitando o desenvolvimento radicular e prejudicando absorção de água e nutrientes para a cultura, afetando assim a sustentabilidade do SPD (SILVA; IMHOFF; KAY, 2004).

Para contornar os efeitos deletérios da compactação do solo, algumas estratégias têm sido sugeridas em SPD implantado e/ou consolidado, tais como a escarificação mecânica (SEKI et al., 2015) e a biológica por meio do uso de plantas de cobertura (NICOLOSO et al., 2008).

A escolha da espécie vegetal para compor a cobertura do solo é fator primordial para a implantação e manutenção do SPD em área de Cerrado, pois nesta região as condições climáticas interferem na velocidade de sua decomposição (COSTA et al., 2014), afetando o papel na proteção do solo e na dinâmica de liberação de nutrientes ao sistema (CALONEGO et al., 2012). Nesta escolha, deve-se levar em consideração o volume do sistema radicular, pois sistemas profundos podem promover a escarificação biológica, devido a penetração das raízes na camada compactada

criando pequenas fendas verticais, alterando os atributos físicos do solo (CHEN; WEIL, 2010).

Na escarificação mecânica do solo a camada compactada é rompida por meio de hastes, alterando os atributos físicos desta camada (REICHERT et al., 2009a). Porém, a duração dos seus efeitos tem se apresentado por períodos variáveis em função do tipo de solo, manejo e cultivar (DRESCHER et al., 2011; NUNES et al., 2014).

Mesmo adotando estratégias de manejo do solo no intuito de reparar ou estabelecer condições desejáveis para o cultivo, as alterações esperadas não são detectadas de imediato ou, as formas de avaliação não apresentam sensibilidades suficientes na detecção destas mudanças.

Segundo Tang et al. (2009), a maioria dos processos de transformações presentes nos solos ocorrem devido as interações de partículas coloidais presentes no mesmo. Os solos contêm misturas heterogêneas de partículas orgânicas e inorgânicas de sólidos com dimensões variando da escala de milímetros a nanômetros. Em escalas nanométricas as partículas do solo podem apresentar diferenças na estrutura atômica da superfície e perto da superfície, bem como na forma do cristal e na topografia de sua superfície em função do tamanho (HOCELLA et al., 2008). Portanto, essas variações podem fazer a diferença na cinética e mecanismos de importantes reações geoquímicas e biogeoquímicas.

De acordo com Calabi-Floody et al. (2011) estudando nanopartículas de argilas em um Andisol do Chile, verificaram que a caracterização dos solos em escala nanométrica pode contribuir para melhor compreender os componentes e mecanismos envolvidos na estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) e de sua qualidade química, bem como as interações de nanopartículas naturais do solo com o transporte e persistência de xenobióticos dispostos no mesmo.

Neste sentido, algumas pesquisas têm avaliado o papel de óxidos de ferro, hidróxido de alumínio e caulinitas na interação com a matéria orgânica e sua estabilidade (SHEN, 1999; PÉDROT et al., 2011; KEILUWEIT et al., 2012; GHEZZI et al., 2014; ADHIKARI; YANG, 2015; FENG; KLAMINDER; BOILY, 2015). Segundo Vendrame et al.(2011) em solos de Cerrados estes minerais são abundantes na sua composição, portanto, estudar o comportamento das nanopartículas destes solos é de suma importância para buscar a compreensão de como a ação das práticas de manejos estão atuando sobre estes solos.

A caracterização de nanopartículas do solo por meio de microscopia eletrônica tem apresentado resultados promissores, pois possibilita obter informações da morfologia desta nanopartículas, ajudando a entender os mecanismos em que as mesmas estão ligadas (KEILUWEIT et al., 2012; GHEZZI et al., 2014; ARCHANJO et al., 2017).

2 HIPÓTESES

o cultivo em sucessão de arroz de “terras altas” e feijão de “inverno” em SPD necessitam da escarificação mecânica do solo e o uso de plantas de cobertura para a manutenção da sustentabilidade da produção.

as nanopartículas e nanoestruturas do solo possibilitam detectar em curto prazo, mudanças ocorridas no solo em função das práticas de manejo.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito a curto prazo da escarificação e do uso de diferentes plantas de cobertura na manutenção do SPD envolvendo as culturas do arroz de “terras altas” e feijão de “inverno”.

3.2 Especifico

- i) Avaliar o efeito da escarificação e do uso das plantas de cobertura sobre a produtividade da cultura do arroz de “terras altas” e feijão de “inverno”.
- ii) Avaliar o efeito da escarificação e do uso das plantas de cobertura sobre os atributos químicos e físicos do solo.
- iii) Empregar nanopartículas e nanoestruturas naturais do solo, como indicadores dos efeitos das práticas de manejos utilizadas.
- iv) Investigar a influência das nanopartículas e nanoestruturas sobre o atributos químicos e físicos do solo.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Sistema plantio direto e seu efeito sobre o solo

Para expansão da agricultura, o Cerrado teve que ser incorporado ao sistema de produção de grãos. Esta incorporação ocorreu por meio da integração destas áreas a um sistema de preparo intensivo, com incorporação de restos da vegetação nativa, de corretivos e de fertilizantes. No entanto, com o passar dos anos verificou-se que estes sistemas de preparo apresentavam dificuldades em manter a produção de modo sustentável (COSTA; GOEDERT; GOMES, 2006).

Como alternativa para estabelecer um sistema de produção de grãos sustentável, foi necessário a incorporação do sistema plantio direto (SPD). No sistema de semeadura direta, diferentemente dos demais sistemas de preparo, não ocorre a movimentação de solo, com exceção do sulco de semeadura. Em função do não revolvimento do solo e da manutenção da cobertura vegetal este sistema de preparo é classificado como um sistema conservacionista (ALVES; CARVALHO; SOUZA, 2015).

Neste sistema a presença da cobertura vegetal reduz as perdas de água por evaporação, aumenta proteção do solo em relação à erosão e as plantas daninhas (MURASHI et al., 2005). Dalmago et al. (2009) afirmam que devido a presença da cobertura vegetal e das melhorias na estrutura do solo, o SPD apresenta até 7 % a mais de água disponível que o plantio com preparo convencional. Este aumento de água disponível no solo pode economizar água de irrigação e em sistemas de sequeiro reduzir os efeitos do estresse hídrico.

Como sistema conservacionista o SPD é comprovadamente, uma técnica de manejo do solo eficiente no controle à erosão, minimizando as perdas de solo (CAMARA; KLEIN, 2005). Neste sentido Pinheiro et al. (2016) afirmam que o SPD aumenta a resistência à erosão, com perdas médias de solos inferiores a 0,10 kg ha⁻¹ quando comparadas ao sistema de plantio convencional, que variou de 2,20 a 0,25 kg ha⁻¹.

Outro efeito benéfico da manutenção da palha na superfície do solo citado é a supressão no estabelecimento de plantas daninhas à cultura utilizada. Borges et al. (2014) ao avaliarem o efeito supressivo da cobertura vegetal sobre plantas daninhas utilizando diferentes espécies e densidades de plantas de cobertura, verificaram que a *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) reduziu a

infestação das plantas daninhas em mais de 90 % e manteve a cobertura do solo superior a 80% até o florescimento da cultura da soja. Como consequências da supressão do desenvolvimento das plantas daninhas pela cobertura vegetal do SPD, ocorre o aumento do rendimento de grão (COELHO et al., 2016).

A cobertura vegetal do SPD contribui ainda na redução da incidência de doença por atuar como uma barreira física. Napoleão et al. (2005) confirmaram este efeito em relação a emergência de apotécio de *Sclerotinia sclerotiorum* na cultura do feijoeiro e ainda ressaltaram outro efeito da palhada, ao criar condições microclimáticas estáveis e propícias para o desenvolvimento de outros microrganismos que podem atuar antagonicamente sobre o patógeno.

No SPD o não revolvimento do solo e a presença de cobertura vegetal contribui para o aumento da fertilidade do solo. A decomposição da cobertura vegetal aumenta os teores de matéria orgânica do solo e disponibilidade de nutrientes (MATEUS; SANTOS, 2012; WOLSCHICK et al., 2016). No SPD a camada superficial apresenta maior quantidade de nutrientes e matéria orgânica, isso ocorre em função de que: em SPD, acúmulo destes nutrientes ocorre de maneira natural, devido a decomposição e liberação desses nutrientes oriundos dos resíduos vegetais; aos fertilizantes depositados e ao não revolvimento do solo (MUZILLI, 1983; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Por apresentar maiores teores de matéria orgânica no SPD, a CTC do solo é influenciada pela mesma (COSTA; GOEDERT; GOMES, 2006).

Na melhoria das condições físicas internas e externas do solo, o SPD, comparado com o convencional, tem demonstrado superioridade. A estabilidade de agregados na camada superficial no SPD tem se mostrado maior do que no preparo convencional. Isso ocorre devido a menor mobilização do solo no SPD, proteção da superfície e acúmulo superficial de resíduos orgânicos. Este acúmulo de resíduos, afeta direta e indiretamente a estrutura e a porosidade do solo. Diretamente pela diminuição do impacto das gotas de chuva, que reduz a formação do selamento e, portanto, o espaço poroso é mantido. Indiretamente, os resíduos culturais ativam os microrganismos, e as substâncias exsudadas são agentes cimentantes, que melhoram a estabilidade de agregados (ALVES; CARVALHO; SOUZA, 2015). Todos estes benefícios citados condicionam este sistema de produção a manter a sustentabilidade da produção agrícola.

4.2 Escolha das plantas de coberturas para o sistema plantio direto

Um dos requisitos para o estabelecimento do SPD é a formação de palhada com qualidade e quantidade sobre a superfície do solo. No entanto, a persistência da palhada é um fator que depende, além da espécie vegetal, também das condições climáticas, especialmente em regiões do Cerrado onde o clima não é favorável (CALONEGO et al., 2012). Costa et al. (2014) afirmam que nessa região, as taxas de decomposição podem situar-se entre cinco até 10 vezes superiores às taxas de regiões de clima temperado.

Deste modo a escolha correta da espécie vegetal a ser utilizada é extremamente importante, uma vez que devem ser considerados os fatores climáticos característicos de cada região e classe de solo (WOLSCHICK et al., 2016).

Segundo Fageria, Baligar e Bailey (2005) os atributos desejáveis para escolha de uma planta de cobertura são a capacidade de se estabelecer rapidamente em condições desfavoráveis, fornecer matéria seca suficiente para a cobertura do solo, fixar o nitrogênio (N) atmosférico, estabelecer um sistema radicular profundo para facilitar a absorção de nutrientes a partir de profundidades mais baixas do solo, produzir matéria orgânica com alta relação carbono/nitrogênio (C/N) e ausência de efeitos fitotóxicos ou alelopáticos nas culturas subsequentes.

Em áreas degradadas onde o estabelecimento das culturas é afetado, torna-se necessário o uso de práticas agrícolas para o reestabelecimento de condições ideais Nicoloso et al. (2008) relatam que plantas de cobertura com sistemas radiculares pivotantes e bem desenvolvidos (método biológico), possuem capacidade de crescer em camadas compactadas, formar bioporos estáveis e melhorar os atributos físicos do solo.

De acordo com Nepomuceno et al.(2012) as plantas de cobertura pertencente à família das *Poaceae*, em especial as do gênero *Urochloa* (Syn. *Brachiaria*) são consideradas as principais opções na formação de palhada para o sistema de plantio direto, devido a boa produção de matéria seca, à alta relação C/N em sua composição e que associada com grandes concentrações de lignina prolonga seu período de decomposição. A *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) é uma espécie deste gênero que tem apresentado excelentes resultados como escarificador biológico de solos com camadas compactadas.

Outro gênero da família da *Poaceae* é o gênero *Pennisetum* conhecido popularmente como milheto. Neste gênero destaca-se o *Pennisetum glaucum*, que é uma *Poaceae* anual, de clima tropical, recomendada para a produção de palhada e cobertura do solo no sistema de semeadura direta, por apresentar elevada taxa de crescimento, o que proporciona rápida cobertura do solo. Apresenta características favoráveis à ciclagem de nutrientes, com raízes vigorosas e abundantes, permitindo a recuperação de nutrientes que se encontram até a profundidade de 2,0 m, possui também alta relação C/N na palhada, garantindo assim uma decomposição mais lenta de seu resíduo; tolerância a seca e a baixos níveis de fertilidade do solo, além de sua semente ser de baixo custo e de fácil aquisição (CAZETTA; FORNASIERI FILHO; GIROTTI, 2005). Além destas características citadas esta espécie destaca-se como uma promotora de descompactação do solo em função do seu sistema radicular agressivo (GUIMARÃES et al., 2013).

As espécies do gênero *Crotalaria* L. consiste de cerca de 500 espécies, localizadas em áreas tropicais e subtropicais (CAZETTA; FORNASIERI FILHO; GIROTTI, 2005). Inicialmente era considerada uma planta daninha, mas hoje ela tem importância econômica tanto pelo seu uso no controle de nematoides quanto pela produção de forragem, produção de fibras, adubação verde e controle da erosão do solo (WANG; SIPES; SCHMITT, 2002). A *Crotalaria juncea* é uma espécie deste gênero que se destaca pela produção de matéria seca, essencial para a manutenção do SPD (MENEZES; LEANDRO, 2004). Outra característica de destaque é a sensibilidade que o sistema radicular desta espécie apresenta em camadas compactadas apresentando elevado potencial para a formação de “bioporos” (FOLONI; LIMA; BÜLL, 2006).

Outra espécie muito utilizada como cobertura vegetal é o *Cajanus cajan* popularmente conhecido como feijão guandu, que é uma planta anual ou semiperene, arbustiva, de crescimento determinado ou indeterminado, sendo uma leguminosa capaz de fixar nitrogênio (41 até 280 kg ha⁻¹ ano⁻¹) (NASCIMENTO, 2015).

O feijão guandu exibe reconhecida habilidade de enraizamento a maiores profundidades e não mostra apenas seu maior potencial na absorção de água, mas também, a possibilidade de ciclagem de nutrientes das camadas mais profundas. Neste sentido, o feijão guandu possui mecanismos para extrair P imobilizado pelos óxidos de Fe e Al e isto ocorre em função dos exsudados de malonato e ácido psídico de seu sistema radicular, assim, o P tem sua disponibilidade aumentada beneficiando

as culturas subsequentes (JOHNSON; LOEPPERT, 2006; RICHARDSON et al., 2009).

As raízes do guandu possuem grande capacidade de se desenvolverem em profundidade, mesmo quando existe, no solo, uma camada de maior resistência à penetração (JIMENEZ et al., 2008). Cavalcante et al. (2012) destacam ainda a sua capacidade de produção de biomassa e o acúmulo de nutrientes em sua parte aérea. Em comparação com as outras plantas de cobertura, o guandu apresenta uma relação C/N similar à da crotalária, no entanto, sua taxa de decomposição é menor, devido a concentração de carbono aromático, que conseqüentemente aumenta a persistência de cobertura morta sobre o solo (CARVALHO et al., 2014).

4.3 Indicadores de qualidade do solo

A implantação da agricultura traz modificações no ambiente original, especialmente no solo, afim de propiciar condições necessárias para o estabelecimento e produção das plantas cultivadas. Estas modificações no solo ocorrem em proporções físicas, químicas e biológicas. Porém, nem sempre estas alterações antrópicas ao solo dão lugar a um novo sistema ecológico sustentável (ALVES; SOUZA, 2009). Deste modo, torna-se necessário o uso de critérios que possam avaliar de forma correta, as condições atuais do solo e assim recomendar práticas de manejo que possam reestabelecer, conservar ou aprimorá-las, de forma que permitam um desenvolvimento vegetal mais sustentável.

Estes critérios são avaliados mediante adoção de indicadores de qualidade do solo, os quais são propriedades mensuráveis tanto de ordem qualitativas ou quantitativas do solo ou até mesmo das plantas, por meios de métodos que permitem caracterizar, avaliar e monitorar as alterações ocorridas no ecossistema de produção (KARLEN et al., 1997), e essas alterações integramos atributos biológicos, químicos e físicos do solo (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

Os indicadores de qualidade biológicas são medidas obtidas por meio da diversidade, da abundância da fauna edáfica (macrofauna, mesofauna e microfauna) de suas atividades ou subprodutos (DORAN; PARKIN, 1994; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; ZATORRE, 2008). Os principais indicadores biológicos utilizados são: a biodiversidade da fauna edáfica, a biomassa microbiana, a respiração microbiana, a nodulação por rizóbio, o quociente respiratório, a atividade enzimática,

o teor de carbono orgânico, nitrogênio potencialmente mineralizável e a decomposição da matéria orgânica (DUTTA, 2013; YADAV et al., 2017).

Além destes indicadores de qualidade biológica supracitados outras propriedades de caráter biológico apresentam potencial como indicador de qualidade, tais como: a avaliação da pressão de patógeno nas raízes, a taxa de decomposição de celulose, o banco de sementes de plantas daninhas, proteínas do solo e instabilidade da produtividade (SCHINDELBECK et al., 2008; DUTTA, 2013; MOEBIUS-CLUNE et al., 2016).

Os indicadores químicos do solo apresentam importância nos estudos, tanto agrônômicos quanto ambientais, e podem ser agrupados em quatro categorias: aquelas que indicam o comportamento do solo; aquelas que indicam a capacidade do solo de resistir às trocas iônicas, aquelas que indicam as necessidades nutricionais das plantas e aquelas que indicam a contaminação ou poluição (LIRA et al., 2012).

Dentre os indicadores químicos que afetam o comportamento do solo destacam-se o potencial hidrogeniônico (pH) e a condutividade elétrica do solo (CE). O pH controla a solubilidade de nutrientes no solo, exercendo grande influência sobre a absorção dos mesmos pela planta e formação de cargas nos colóides do solo (SHEN, 1999; MELLIS; CRUZ; CASAGRANDE, 2004; JONER; HARTNIK; AMUNDSEN, 2008; PAVINATO; ROSOLEM, 2008; SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008; ARAÚJO et al., 2012;). Especialmente em solos altamente intemperizados como os do Cerrado, este atributo tem se comportado como um dos principais fatores limitantes da produção agrícola (FAGERIA; BARBOSA FILHO, 2008).

A condutividade elétrica é um atributo químico usado para medir a quantidade de sais presentes em solução do solo, os quais conduzem corrente elétrica. Quanto maior a quantidade de sais presentes na solução, maior será o valor obtido (BRANDÃO, 2002; MOLIN; RABELLO, 2011). Em condições nativas, solos localizados nas regiões áridas e semiáridas do mundo, em suas condições naturais apresentam elevadas concentrações de sais (PEDROTTI et al., 2015). Solos submetidos a manejo inadequadas também podem apresentar elevações a das concentrações de sais a níveis indesejáveis (SOUTO et al., 2016). Portanto, o monitoramento destes atributos é imprescindível para a atividade agrícola.

Os indicadores químicos relacionados com a capacidade do solo em resistir as trocas iônicas (cátions e ânions) são atribuídos a formação das cargas elétricas das partículas do solo. Assim, a mineralógica do solo é um dos fatores principais na

formação de cargas. Em minerais da fração argila composto por óxidos de Fe e Al as cargas formadas são dependentes do pH, provenientes dos grupos Ferrol (-FeOH) e Aluminol (Al-OH) (HANKE et al., 2015). Em minerais silicatados (tipo 2:1 e 1:1) formação de cargas elétricas não depende de pH, ou seja são cargas permanentes (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Nas áreas do cerrado brasileiro os Latossolos são as classes de solos presentes com maior predominância, assim apresentando grande importância agrícola. No entanto, esses solos possuem baixa fertilidade, pois possuem minerais com alto grau de intemperismo como: gibbsita, goethita, hematita e caulinita (EBERHARDT et al., 2008; KER, 1998; SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008). Outro agente condicionador na formação de cargas elétricas do solo é a matéria orgânica que executa a função crucial de fornecer um número significativo de sítios de ligação para elementos essenciais presentes no solo, contribuindo para o aumento da CTC e melhor eficiência de utilização dos nutrientes (COSTA; SANGAKKARA, 2006).

Em regiões tropicais e subtropicais em função das altas temperaturas e da umidade, a decomposição da matéria orgânica ocorre de forma acelerada, assim especialmente em solo com baixa fertilidade a manutenção da matéria orgânica é de suma importância para a manutenção da sua sustentabilidade (ACOSTA et al., 2014).

Os atributos indicadores das necessidades nutricionais das plantas são os que contribuem para o aumento de produtividade e são representados por macronutrientes e micronutrientes. Especialmente em solos do cerrado os níveis de sua fertilidade são considerados baixos (KER, 1998; LOPES; GUILHERME, 2016). Portanto, para o estabelecimento de níveis adequados de fertilidade nestas áreas, ocorre inicialmente as práticas de manejo como: a derrubada da vegetação natural e o cultivo, principalmente na camada arável, em virtude da adição de corretivos e fertilizantes e de operações agrícolas.

Essas alterações dependem de vários fatores, como a cultura implantada e o manejo utilizado, a classe e a fertilidade inicial do solo, o comportamento físico-químico de cada nutriente e suas interações com o meio (FREITAS et al., 2017). Como já mencionadas, doses elevadas de fertilizantes químicos acima da condição necessária eleva a condutividade elétrica do solo (SOUTO et al., 2016), além de elevar os custos de produção.

Em solos agrícolas a presença de metais pesados e agrotóxicos são provenientes de várias práticas aplicadas na agricultura. De fato, cada vez mais a

agricultura tem sido associada com o uso agrotóxicos no controle de pragas e doenças que podem reduzir a produção (CLOYD; BETHKE, 2011). No solo, os resíduos dos agrotóxicos podem tomar os seguintes destinos: serem vaporizados juntamente com a evaporação da umidade do solo; serem transportados pelas águas no solo por meio da lixiviação ou pelo escoamento superficial. A parte da presença de metais pesados está associada principalmente a degradação dos princípios ativos deste agrotóxico (SANDRIN; MAIER, 2003), e do uso a longo prazo dos estrumes de animais e de águas residuais para solos agrícolas (KHAN et al., 2008; ZHANG; LIU; WANG, 2010). Desta forma os solos contaminados com agrotóxico ou metais pesados podem causar risco a saúde humana assim como comprometer a proliferação de fauna edáfica benéfica a saúde do solo (TARIQ; SHAFIQ; CHOTANA, 2016).

Os indicadores de qualidade física do solo avaliam o arranjo das partículas sólidas e dos poros, responsáveis pela formação da sua estrutura, que por sua vez interfere diretamente no desenvolvimento das plantas e na atividade de organismos (SHIFERAW; FREEMAN; SWINTON, 2005). Para Doran e Parkin (1994) os indicadores de qualidade física podem ser classificados em duas classes: alteráveis e inalteráveis em função do tipo de manejo do solo. Segundo estes autores os atributos físicos alteráveis são compostos pela: densidade do solo, resistência do solo à penetração, permeabilidade, aeração, agregação, porosidade e umidade do solo e os inalteráveis como: textura do solo, mineralogia, densidade de partículas e de cor. No entanto, apesar de serem inalteráveis estes atributos físicos são necessários para classificação pedogenética.

Segundo Stefanoski et al. (2013), por apresentarem interdependências entre os atributos físicos do solo, propõe-se uma outra subdivisão dos seus indicadores de qualidade física em função do grau de dificuldade de obtenção, sendo classificados em primários: aqueles mais facilmente mensuráveis, obtidos por medidas diretas de campo ou de laboratório e secundários: aqueles que, normalmente, são derivados de dados obtidos no campo e/ou no laboratório (indicadores primários), mas que exigem certo grau de tratamento estatístico ou modelagem, sendo de mais difícil interpretação.

Os indicadores primários mais utilizados para avaliação da qualidade física do solo e que atuam diretamente na sua estrutura são: a densidade do solo, a porosidade e a resistência do solo à penetração.

A densidade do solo é definida numericamente pela relação entre a massa do solo seco por unidade de volume, determinada a partir de amostras coletadas com estrutura preservada e conhecer seu valor é fundamental para a correta recomendação da calagem e adubações, para definir práticas adequadas de manejo do solo (FERREIRA, 2010; PÁDUA; GUERRA; ZINN, 2015).

A porosidade é o atributo físico do solo que representa os espaço porosos formados pelo arranjo das partículas solidas (REICHARDT; TIMM, 2004). Segundo Araújo et al. (2012), a porosidade total de um solo não oferece muitas informações sobre a sua qualidade. Deste modo, costuma-se classificar os poros do solo de acordo com as classes de tamanho, ou seja, macroporos e microporos. Os macroporos são responsáveis pela drenagem e aeração do solo e os microporos pela retenção de água (FERREIRA, 2010). Esta característica apresentada interfere diretamente no desenvolvimento radicular e na atividade da fauna edáfica do solo.

No processo de compactação do solo os principais indicadores de sua qualidade física são alterados, aumentando a densidade do solo e diminuindo a porosidade, como consequência padrão o crescimento radicular é alterado (SOLGI et al., 2015). Segundo Ribon e Tavares Filho (2008) a resistência do solo à penetração é um dos atributos físicos importantes para o manejo e estudo da qualidade física dos solos, tendo em vista que esta propriedade se apresenta relacionada a diversos atributos do solo, indicadores do grau de compactação. A resistência do solo à penetração é representada pelo força (MPa) que o solo oferece à penetração de um cone metálico a qual simula a resistência que o mesmo tem ao crescimento do sistema radicular (ASSIS et al., 2009; MEDVEDEV, 2009; BONNIN; LANÇAS; AVALOS, 2012).

Os indicadores primários mais utilizados para avaliação da qualidade física do solo são: curva de retenção de água no solo, intervalo hídrico ótimo e índice S (SILVA et al., 2010; STEFANOSKI et al., 2013).

A curva de retenção de água no solo permite estimar valores de outros atributos como, por exemplo, densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível e armazenamento de água no solo e condutividade hidráulica não saturada, porosidade total e sua distribuição, podendo demonstrar por meio de sua forma o estado estrutural do solo (STEFANOSKI et al., 2013; SILVA; BENEVENUTE; MELO, 2017).

O intervalo hídrico ótimo define o limite superior e inferior do conteúdo de água, onde são mínimas as limitações para o crescimento das plantas em função do

potencial matricial do solo, aeração do solo e resistência do solo à penetração (SILVA et al., 2010). Deste modo o intervalo hídrico ótimo integra diferentes indicadores primários de qualidade do solo em um único parâmetro (STEFANOSKI et al., 2013).

O outro indicador secundário de qualidade física foi proposto por Dexter (2004) denominado como índice S. Este índice é obtido por meio da inclinação da curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão (DEXTER, 2004; SILVA et al., 2010; STEFANOSKI et al., 2013). Este indicador de qualidade está intimamente relacionado a variáveis como textura, densidade do solo, matéria orgânica e crescimento de raízes (STEFANOSKI et al., 2013).

Além dos indicadores físicos apresentados, têm sido desenvolvidos outros atributos para avaliar a estrutura do solo, como o diagnóstico rápido da estrutura do solo -DRES, que qualifica a estrutura da sua camada superficial, baseado em características detectadas visualmente em amostras na camadas dos primeiros 25 cm (RALISCH et al., 2017)

4.4 Nanotecnologia aplicada a estudos de solos

Após 1959, quando o físico americano Richard Feynman propôs que o homem poderia manipular os átomos, desde que as leis da natureza não sejam infringidas, surgiu então um novo campo da ciência e com ele grandes avanços (CADIOLI; SALLA, 2006). Trata-se da nanotecnologia, um termo usado nos últimos anos para descrever um conjunto de tecnologias que lidam com objetos com tamanhos de 1-100 nm em pelo menos uma de suas dimensões (um nanômetro é um bilionésimo do metro) (FERREIRA; RANGEL, 2009). A definição no dicionário grego de nano é anão, mas a nanotecnologia refere-se normalmente à ciência no nível de 10^{-9} m, o que não está fora dos domínios da bioquímica, química macromolecular ou ciência de superfície (WILSON et al., 2008).

Por se tratar de tecnologia multidisciplinar, que consiste na área da física, química, biologia e medicina, o campo de aplicação da nanotecnologia é vasto, porém, os grandes destaques estão na nanoeletrônica, nanobiotecnologia e nanomateriais (CADIOLI; SALLA, 2006).

No passado recente, foram feitos esforços para melhorar o rendimento agrícola por meio de pesquisas exaustivas em nanotecnologia. A revolução verde resultou no uso cego de pesticidas e fertilizantes químicos que causaram perda de biodiversidade do solo e desenvolveram resistências contra patógenos e pragas também. A entrega

de material mediado por nanopartículas para plantas e biosensores avançados para agricultura de precisão é possível apenas por nanopartículas ou nanochipes. Os fertilizantes, pesticidas e herbicidas convencionais nanoencapsulados ajudam na liberação lenta e sustentada de nutrientes e agroquímicos, resultando em doses precisas para as plantas (DUHAN et al., 2017).

No entanto, apesar destes inúmeros avanços com o uso da nanotecnologia surgiram algumas preocupações sobre a disseminação de nanopartículas para o meio ambiente, pois faltam informações sobre quais tipos de nanopartículas que podem ser prejudiciais e sobre os volumes de produção e o uso de nanomateriais em geral. Essa informação é necessária para determinar se certos tipos de nanopartículas devem ser consideradas poluentes ambientais potencialmente nocivos (JONER; HARTNIK; AMUNDSEN, 2008; RANA; KALAICHELVAN, 2013).

Do ponto de vista ambiental o uso de nanopartículas nos últimos anos, o uso de matérias em escala nanométrica de ferro valência zero, nanotubos de carbono e nanofibras foram aplicados para a remediação de uma variedade de contaminantes, incluindo compostos clorados, hidrocarbonetos, compostos orgânicos e metais pesados no solo (JANG; LIM; HWANG, 2014; PATIL et al., 2016).

Em particular, as nanopartículas, que são menores do que 100 nm são importantes em um sistema natural devido à sua elevada área superficial e reatividade de superfície e suas propriedades associadas de adsorção ou ligação aos contaminantes orgânicos e metais traço. Isto é provavelmente devido, pelo menos em parte, as diferenças na superfície e estrutura atômica perto da superfície, bem como da forma de cristal e a topografia da superfície, como uma função do tamanho do menor dos regimes de tamanho (HOCELLA et al., 2008).

Deste modo as nanopartículas apresentam maior capacidade de transportes de contaminantes que estruturas em escala maior de mesma composição devido a maior reatividade superficial e ao menor tamanho. No entanto, a sua natureza heterogênea revela considerações importantes para enfrentar os desafios de prevenção da poluição e remediação (GHEZZI et al., 2014).

A inclusão da nanotecnologia na ciência do solo pode contribuir para significativos avanços a fim de compreender melhor certos comportamentos. Tendo em vista que os solos são misturas complexas de sólidos a partir de milímetro a dimensão das partículas em nanômetros.

De acordo com Calabi-Floody et al. (2011) estudando nanoargilas em um Andisol do Chile, verificaram que a caracterização dos solos em escala nanométrica pode contribuir para melhor compreender os componentes e mecanismos envolvidos na estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) e de sua qualidade química, bem como as interações de nanopartículas naturais do solo com o transporte e persistência de xenobióticos dispostos no mesmo.

Segundo Souto Filho et al. (2017) o estudo das nanopartículas e a morfologia de nanoestruturas do solo são bons indicadores da sua qualidade, pois apresentaram maior sensibilidade as mudanças que os indicadores relacionados aos atributos físicos e químicos ao avaliar solo com diferentes estágios de degradação.

Assim, a fração de nanoargila parece ser um local privilegiado para o acúmulo de matéria orgânica estabilizada (LEHMANN; KINYANGI; SOLOMON, 2007; MONREAL; SULTAN; SCHNITZER, 2010), e pode ser considerada como um sumidouro de carbono. Do mesmo modo, a fração de nanoargila tem o potencial de sequestro de carbono no solo e de reduzir a emissão de CO₂.

A estabilização a longo prazo do carbono atmosférico na matéria orgânica do solo envolve a estabilização física por proteção em microagregados e colóides de argila; estabilização físico-química pela proteção e interações de MOS com matrizes inorgânicas, reações de condensação e bioquimicamente por polimerização e reticulação de moléculas orgânicas recalcitrantes (MONREAL; SULTAN; SCHNITZER, 2010). No entanto, esta estabilização da matéria orgânica pode apresentar desempenho e mecanismos diferentes em função da mineralogia das nanopartículas presentes no solo (CALABI-FLOODY et al., 2015).

Por meio do uso de técnicas de microscopia eletrônica de transmissão (MET), espectrometria de infravermelho e espectrometria de raio-X que são comumente utilizadas em estudo envolvendo a nanociência, Adhikari e Yang (2015) verificaram que o mecanismo de estabilização da MOS ocorre preferencialmente pela interação do carbono aromático. No entanto, a ligação com o carbono alifático representa maior grau de estabilização.

Além da estabilidade da matéria orgânica as nanopartículas presentes podem atuar no mecanismo de disponibilidade de nutrientes. Segundo Vandervoort, Livi e Arai (2013) ao estudar o transporte de P por partículas coloidais de um Argissolo de uso agrícola na Carolina do Sul, verificaram que as presenças de nanopartículas aumentou a disponibilidade deste mineral na solução do solo. Claudio et al. (2017),

afirmam que as nanopartículas naturais do solo de óxidos de ferro podem modificar as suas cargas superficiais em função do seu tamanho, o que afeta diretamente o processo de absorção do íon fosfato.

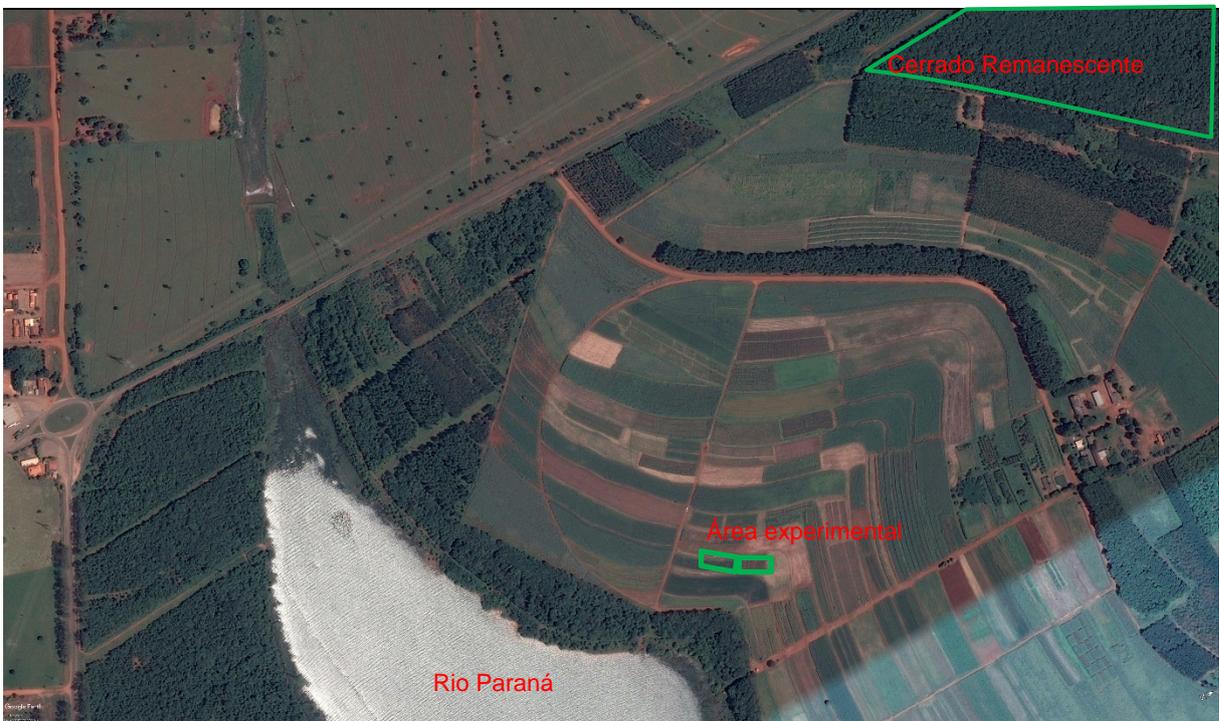
Em função da redução do tamanho as nanopartículas podem afetar a estruturação do solo. Segundo Pédrot et al. (2011) a matéria orgânica do solo MOS interfere no tamanho de nanopartículas de óxidos de ferro, que em consequência pode afetar a resistência dos nano e microagregados e a capacidade de retenção de água do solo (REGELINK, 2014).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e características gerais da área experimental

O experimento foi conduzido durante os anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), em Selvíria, MS (20° 18' S e 51° 22' W), pertencente a Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (FE/UNESP), Campus de Ilha Solteira, em área irrigada (Figura 1). A altitude da região é de 335 m e o solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso classificado por Demattê (1980) conforme Santos et al. (2014).

Figura 1 - Imagem de satélite da localização do experimento, FEPE, Selvíria, MS, Brasil.



Fonte: Google Earth Pro

O tipo climático, segundo Köppen, é Aw, caracterizado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Os valores médios anuais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar são, respectivamente, 1.370 mm, 23,5 °C e 75 % (ROSA et al., 2014).

A área onde foram instalados os tratamentos, originalmente foi ocupada por vegetação de Cerrado, onde por mais de 20 anos de exploração agrícola utilizou-se o sistema de preparo de solo convencional (grade aradora e niveladora). Atualmente apresenta um histórico do uso do sistema plantio direto (SPD) com mais de 15 anos, cultivada com arroz de terras altas, feijão e milho.

Em meados de 2012 teve início a instalação do experimento por Nascimento (2015), com a caracterização física e química da área (Tabela 1). Com base nesta caracterização foi realizada calagem conforme a recomendação de Raij et al. (1997), onde utilizou-se uma dose de 1,6 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 85%, com o uso de um distribuidor a lançaço.

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do solo da área experimental, antes da instalação do experimento, nas camadas estudadas. Selvíria, MS, 2012.

Atributos Químicos												
Camadas	P	MOS	pH	K	Ca	Mg	H + Al	Al	SB	CTC	V	m
m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmol _c dm ⁻³								%
0,00-0,05	29	24	5,9	3,5	41	25	19	0	69,5	88,5	79	0
0,05-0,10	6	17	4,9	1,8	17	12	33	2	30,8	63,8	48	6
0,10-0,20	38	15	4,5	1,3	10	7	38	6	18,3	56,3	33	25
0,20-0,40	7	13	4,8	1,4	10	8	29	2	19,4	48,4	40	9

Atributos Físicos							
Camadas	Areia	Silte	Argila	Mac.	Mic.	PT	DS
m	g kg ⁻¹			m ³ m ⁻³		Mg m ⁻³	
0,00-0,05	403	157	440	0,08	0,36	0,44	1,49
0,05-0,10	389	127	484	0,06	0,35	0,41	1,56
0,10-0,20	385	120	495	0,07	0,35	0,42	1,54
0,20-0,40	352	121	527	0,10	0,36	0,46	1,42

P: fósforo disponível (resina); MOS: Matéria orgânica; K, Ca, Mg e Al trocáveis; H + Al: Acidez potencial; SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de troca de cátions; V (%): saturação por bases; m (%): saturação por alumínio; PT: porosidade total; Mac.: Macroporosidade; Mic.: Microporosidade; DS: Densidade do solo; Fonte: Nascimento (2015)

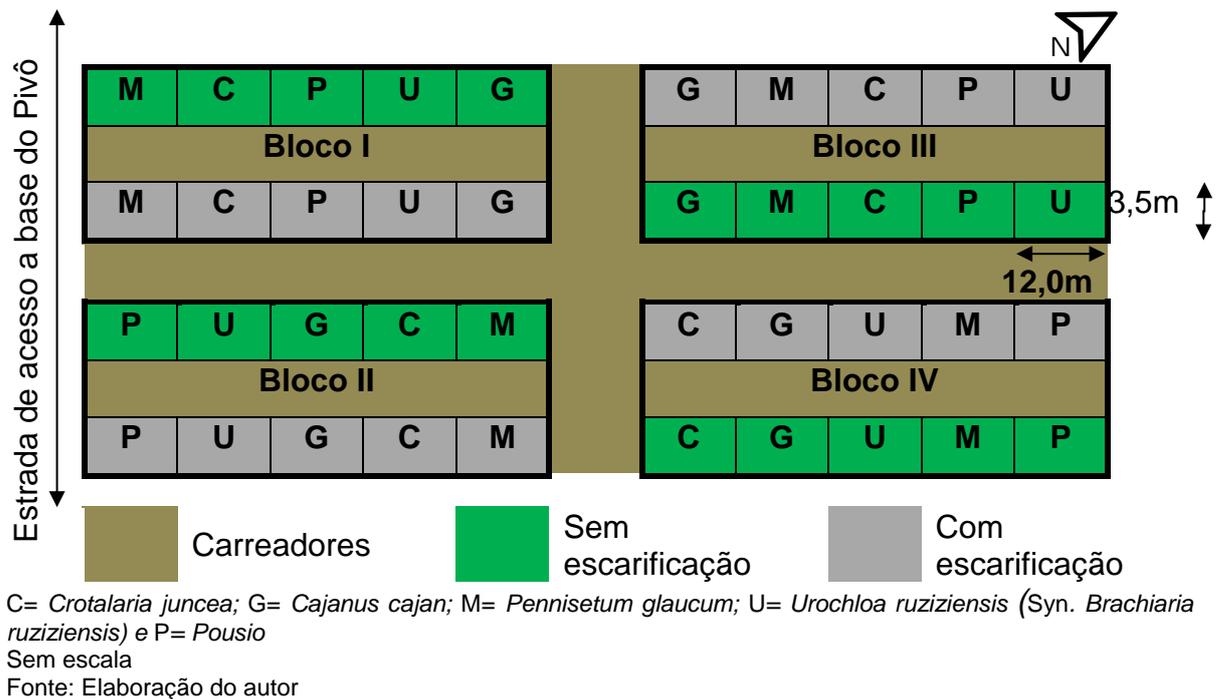
Ainda em 2012, a continuidade na implantação do experimento ocorreu com a escarificação mecânica da área, semeadura das plantas de coberturas e do arroz de terras altas. Após o cultivo do arroz (ano agrícola 2012/13) procedeu-se a semeadura do feijão de “inverno”, desta forma o experimento foi conduzido por Nascimento(2015). Foi dado prosseguimento seguindo o mesmo sistema de manejo para então, após o terceiro (2014/15) e quarto ano de implantado (2015/16) serem realizadas as avaliações para análise dos efeitos do sistema na produtividade das culturas e qualidade do solo.

5.2 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em parcelas subdivididas, tendo nas parcelas as condições da superfície do solo em SPD e nas subparcelas as plantas de coberturas, no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. A camada superficial do solo em SPD foi submetida a duas condições, sendo uma com escarificação mecânica e outra sem. As plantas de cobertura utilizadas foram duas leguminosas: *Crotalaria juncea* e *Cajanus cajan* e duas gramíneas: *Pennisetum*

glaucum e *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) e uma condição de pousio, onde permitiu-se o desenvolvimento das vegetações espontâneas, com predomínio de *Bidens pilosa*, *Ipomoea purpurea*, *Conyza bonariensis*, *Commelia benghalensis*, *Sorghum halepense*, *Panicum maximum*, *Raphanus raphanistrume*, *Digitaria sanguinalis*, portanto, totalizando 40 subparcelas. As unidades experimentais foram constituídas de 3,5 m largura por 12,0 m comprimento (Figura 2).

Figura 2 – Croqui da área experimental, Selvíria, MS, Brasil.



5.3 Instalação e condução do experimento

5.3.1 Caracterização e preparo do solo

A escarificação mecânica da área foi realizada em 03/09/2015. Para esta operação foi utilizado um escarificador da marca Jan®, modelo Jumbo Matic, composto por sete hastes, espaçadas a 0,3 m e rolo destorroador/nivelador. O implemento foi tracionado por trator Massey Ferguson®, modelo MF 660 de 150 CV e a regulagem da camada de trabalho foi de 0,3 m, realizada pelo sistema hidráulico de controle remoto sobre as articulações das rodas do implemento.

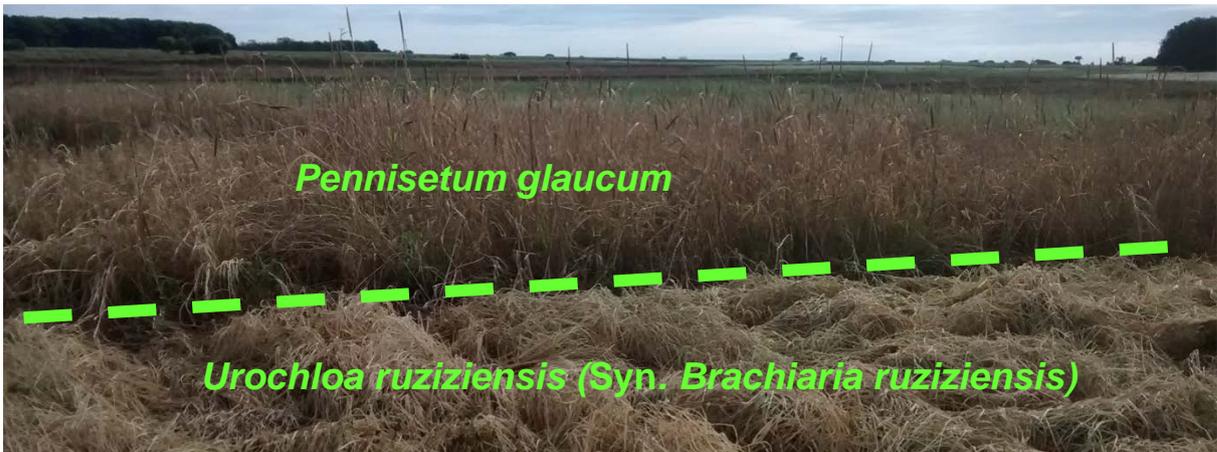
5.3.2 Implantação e condução das plantas de coberturas

As plantas de cobertura foram semeadas em 11/09/2014 e 05/10/2015 nas áreas com e sem escarificação, com um espaçamento entrelinhas de 0,45 m, sem

adubação, tratadas com piraclostrobina + tiofanato-metílico + fipronil (2,5 g + 22,5 g + 25 g do i.a. por 100 kg de sementes utilizando uma semeadora manual do tipo matraca. A densidade de semeadura utilizada para o *Cajanus cajan* foi de 60 kg ha⁻¹, *Crotalaria juncea* e *Pennisetum glaucum* de 30 kg ha⁻¹ e para *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) de 12 kg ha⁻¹. Durante o desenvolvimento das plantas de cobertura foi realizado o controle de plantas espontâneas, por meio de capina manual, com o intuito de evitar a competição das mesmas com as plantas de cobertura.

Todas as plantas de cobertura e os pousios foram dessecadas em 13/11/2014 e 03/12/2015, aos 63 dias após semeadura (DAS) e aos 59 DAS, respectivamente, com os herbicidas glyphosate (1440 g ha⁻¹ do i.a.) + 2,4-D (670 g ha⁻¹ do i.a.). Após dessecado o material vegetal foi submetido a operação de acamamento com uso de rolo faca, para facilitar o processo de semeadura do arroz (Figura 3).

Figura 3 - Plantas de cobertura dessecadas, antes de serem acamadas pelo rolo faca, 2014/15.



Fonte: Elaboração do autor

5.3.3 Implantação e condução da cultura do arroz

Após as operações de acamamento das plantas de cobertura, foi realizada a semeaduras mecânicas do arroz de terras altas em 09/01/2015 (ano agrícola 2014/15) e 22/12/2015 (ano agrícola 2015/16), sendo conduzida sob regime de irrigação por aspersão em pivô central seguindo o mesmo delineamento experimental e os tratamentos adotados, em ambos os anos agrícolas. As parcelas do arroz foram constituídas de 10 linhas de 12 m de comprimento espaçadas 0,35 m entre si, sendo consideradas como área útil as oito linhas centrais, desprezando-se 0,5 m, em ambas as extremidades de cada linha.

A adubação básica nos sulcos de semeadura foi calculada de acordo com as características químicas do solo e levando-se em consideração as recomendações de Sousa e Lobato (2004) e foi constituída de 220 kg ha⁻¹ da formulação 04-14-10 (2014/15) e 250 kg ha⁻¹ da formulação 04-30-10 (2015/16).

Utilizou-se o cultivar de arroz BRS Esmeralda, que apresenta arquitetura intermediária, porte baixo (média 1,03 m) com ciclo médio de 105 a 110 dias e floração média aos 77 dias (CASTRO et al., 2014; ALVES et al., 2015). Na semeadura utilizou-se sementes certificadas, nos dois anos de cultivo, necessário para obter uma população de 180 plantas m⁻². O tratamento de sementes foi realizado com piraclostrobina + tiofanato-metílico + fipronil (5 g + 45 g + 50 g do i.a. por 100 kg de sementes), nos dois anos de cultivo do arroz.

A adubação nitrogenada em cobertura foi realizada em dois períodos aos 20 e 50 dias após a semeadura (DAS) das plântulas na dose de 50 kg ha⁻¹ de N, aplicando em cada época 50% da dose. Como fonte de nitrogênio utilizou-se a ureia e a incorporação para minimizar as perdas por volatilização ocorreu por meio de uma irrigação de aproximadamente 13 mm.

O controle de plantas daninhas foi realizado com capinas químicas e manuais. A capina química ocorreu por meio do uso de herbicidas aplicados via pulverizador tratorizado regulado para uma vazão de 200 L ha⁻¹. Em pré-emergência utilizou-se o herbicida pendimethalin (1.400 g ha⁻¹ do i.a.) nos dois anos agrícolas. No ano agrícola 2014/15, em pós-emergência utilizou-se herbicidas metsulfuronmethil (2 g ha⁻¹ do i.a.) e o bentazon (720 g ha⁻¹ do i.a.). No ano agrícola 2015/16, em pós-emergência aplicou-se apenas o metsulfuronmethil (2 g ha⁻¹ do i.a.). As plantas daninhas não controladas pelos herbicidas foram eliminadas manualmente com auxílio de enxada, em ambos os anos de cultivo.

O controle preventivo de brusone (*Pyricularia oryzae*) foi realizado com o uso de fungicida a base de trifloxistrobina (75 g ha⁻¹ do i.a.) + tebuconazole (150 g ha⁻¹ do i.a.), sendo realizadas duas aplicações, uma aos 65 DAS e outras aos 85 DAS em ambos os cultivos. O controle de insetos pragas ocorreu devido ao ataque do percevejo do colmo (*Tibraca limbativentris*), sendo necessário realizar aplicações de inseticida a base tiametoxam (500 g ha⁻¹ do i.a.). Para as aplicações de fungicidas e inseticidas foram utilizados pulverizadores tratorizados regulado para uma vazão de 200 L ha⁻¹.

Os demais tratos culturais e fitossanitários foram os normalmente recomendados à cultura do arroz de terras altas para a região, em ambos os anos de cultivo. As colheitas foram realizadas em 24/04/2015 e 06/04/2016, utilizando uma régua de três metros para colher duas linhas da área útil, posteriormente as plantas colhidas foram trilhadas em uma trilhadora estacionária.

Durante as duas safras de arroz foram realizadas as seguintes avaliações:

5.3.3.1 *Emergência das plântulas*

Foi avaliado o número de dias após a semeadura até a emergência da maioria das plântulas.

5.3.3.2 *Florescimento*

Foi avaliado o número de dias transcorridos entre a semeadura e a floração de 50% das plantas.

5.3.3.3 *Maturação*

Foi avaliado o número de dias transcorridos entre a semeadura e a maturação de 90% das panículas da subparcela.

5.3.3.4 *Altura de plantas*

Durante o estágio de grãos na forma pastosa foi determinada em dez plantas ao acaso, na área útil de cada subparcela a distância média compreendida desde a superfície do solo até a extremidade superior da panícula mais alta, dada em metros.

5.3.3.5 *Acamamento*

Foi determinado por observações visuais na fase de maturação, utilizando-se a seguinte escala de notas: 0 – sem acamamento; 1 – até 5 % de plantas acamadas; 2 – 5 a 25 %, 3 – 25 a 50 %; 4 – 50 a 75 % e 5 – 75 a 100 % de plantas acamadas, conforme Nascimento et al. (2009).

5.3.3.6 *Número de panículas por metro quadrado*

Foi realizada a contagem do número de panículas em 1,0 m de fileira de plantas na área útil das parcelas, antes da colheita e posteriormente calculado por metro quadrado.

5.3.3.7 *Número total de grãos por panícula*

Foi realizada a contagem do número de grãos de 20 panículas coletadas ao acaso no momento da colheita, em cada subparcela.

5.3.3.8 *Massa de 100 grãos*

Foi avaliada pela coleta ao acaso e pesagem de duas amostras de 100 grãos em cada subparcela com correção de umidade a 13 % na base úmida.

5.3.3.9 *Produtividade de grãos*

Foi determinada pela pesagem dos grãos, oriundas da área útil das subparcelas, colhidas manualmente em duas linhas uniformes, com três metros de comprimento, corrigindo-se a umidade para 13% e convertendo em kg ha⁻¹.

5.3.3.10 *Massa hectolétrica*

Foi avaliada em balança para massa hectolétrica de 250 g, com teor de água nos grãos corrigidos para 13 % (base úmida), utilizando-se duas amostras por subparcela.

5.3.3.11 *Rendimento de engenho grão integral*

Foi retirada uma amostra de 100 g de grãos de arroz de cada parcela e a mesma foi processada em engenho de prova (modelo MT, Suzuki), para a retirada da casca, os grãos descascados (integrais) foram pesados, sendo que o valor encontrado foi considerado como rendimento de benefício.

Posteriormente, os grãos integrais foram colocados no “Trieur” número 1 por 30 segundos, para classificação dos grãos inteiros e quebrados. Os grãos que permaneceram no “Trieur” foram pesados, obtendo-se o rendimento de inteiros e os demais, grãos quebrados. Todos os resultados expressos em porcentagem (%).

5.3.3.12 *Rendimento de engenho grão polido*

Os grãos integrais após a classificação retornaram ao engenho de prova por um minuto para a realização do brunimento, em seguida, os grãos brunidos (polidos) foram pesados, sendo que o valor encontrado foi considerado como rendimento de

benefício. Posteriormente, os grãos polidos foram submetidos a classificação de grãos inteiros e quebrados, esta etapa foi similar a descrita para os grãos integrais.

5.3.4 Implantação e condução da cultura do feijão

Após a colheita do arroz ocorreu a semeadura do feijão. Foi realizada em 19/05/2015 e 24/05/2016, utilizando-se o cultivar Pérola que apresenta plantas do tipo III e grãos do tipo carioca (JAUER et al., 2006). Antes da semeadura as sementes foram tratadas com carboxina+ tiram (50 + 50 g de i.a. por 100 kg de sementes) e inoculadas com *Rhizobium tropici*, nos dois anos de cultivo. A cultura foi conduzida sob regime de irrigação por aspersão em pivô central, seguindo o mesmo delineamento experimental e os tratamentos adotados, em ambos os anos cultivados com arroz.

As subparcelas foram constituídas por 7 linhas de 12 m de comprimento, sendo consideradas como área útil as 5 linhas centrais, desprezando-se 0,5 m, em ambas as extremidades de cada linha. O espaçamento foi de 0,45 m entrelinhas com distribuição de sementes que permitia a obtenção de 12 plantas por metro.

A adubação básica nos sulcos de semeadura foi constituída de 250 kg ha⁻¹ da formulação 04-30-10 na safra 2014/15 e 250 kg ha⁻¹ da formulação 08-28-16 na safra 2015/16, seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004), nos dois anos agrícolas. A adubação nitrogenada (N) em cobertura foi realizada aos 36 DAS na dose de 80 kg ha⁻¹ de N, utilizando como fonte a uréia e a incorporação para minimizar as perdas por volatilização ocorreu por meio de uma irrigação com aproximadamente 13 mm.

O controle de plantas daninhas foi realizado com capinas químicas e manuais. A capina química ocorreu por meio do uso de herbicidas aplicados via pulverizador tratorizado regulado para uma vazão de 200 L ha⁻¹. O herbicida glyphosate (1.440 g ha⁻¹ do i.a.) foi aplicado na área oitos dias antes da semeadura do feijão em ambos os períodos de cultivo. Em pós emergências foram aplicados os herbicidas bentazon (720 g ha⁻¹ do i.a.) e haloxifope-p-metilico (49 g ha⁻¹ do i.a.) em ambos os cultivos. As plantas daninhas não controladas pelos herbicidas foram eliminadas manualmente com auxílio de enxada.

No segundo ano em 25/07/2016 foi realizada aplicação do fungicida tiofanato metílico (49 g ha⁻¹ do i.a.) para o controle do mofo-branco (*Sclerotinia sclerotiorum*).

O manejo para esta doença ainda consistiu na redução das lâminas de irrigação na área.

Os demais tratamentos culturais e fitossanitários foram os normalmente recomendados à cultura do feijão para a região. As colheitas foram realizadas em 20/08/2015 e 29/08/2016, utilizando uma régua de três metros para colher duas linhas da área útil de cada subparcela. As plantas foram arrancadas manualmente e deixadas para secagem a pleno sol, posteriormente as plantas colhidas foram trilhadas em uma trilhadora estacionária.

Durante as duas safras de feijão foram realizadas as seguintes avaliações:

5.3.4.1 *População final de plantas*

Aproximadamente oito dias após a emergência das plantas e durante o momento da colheita foi avaliado, em duas linhas, na área útil das parcelas, o número de plantas com o objetivo de se calcular a população final de plantas ha^{-1} .

5.3.4.2 *Componentes da produção*

Foram coletadas, por ocasião da colheita, dez plantas na área útil das subparcelas para a avaliação de:

- a) Número de vagens por planta: foi determinado por meio da relação do número total de vagens/número de plantas.
- b) Número de grãos por planta: foi obtido da relação do número total de grãos/número de plantas.
- c) Número médio de grãos por vagem: foi calculado por meio da relação do número total de grãos/número total de vagens.
- d) Massa de 100 grãos: foi obtido por meio da coleta ao acaso e pesagem de duas amostras de 100 grãos por parcela.

5.3.4.3 *Produtividade de grãos*

As plantas das duas linhas uniformes, com três metros de comprimento da área útil de cada subparcela foram arrancadas e deixadas para secagem a pleno sol. Após a secagem, as mesmas foram submetidas a trilha mecânica, os grãos foram pesados e os dados expressos em kg ha^{-1} (13 % base úmida).

5.3.5 Atributos químicos do solo

As amostras deformadas de solo foram coletadas após o cultivo do feijão em 24/08/2015 e 12/09/2016, nas camadas de 0,00 - 0,05 m; 0,05 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m em cada subparcela. Em cada camada foram coletadas cinco amostras simples que foram homogeneizadas para a formação de uma amostra composta. Após coletadas as amostras foram levadas para o laboratório de fertilidade do solo do departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos – DEFERS, onde foram secas a temperatura ambiente e depois passadas em uma peneira de 2,00 mm de abertura (TFSA).

Os atributos químicos do solo foram analisados segundo a metodologia descrita por Raij et al.(2001), onde: potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram extraídos pelo método da resina trocadora de íons e seus teores determinados por espectrofotometria de absorção atômica (modelo SpectrAA 55B, VARIAN[®]); o fósforo (P) extraído por resina trocadora de íons teve seu teor determinado por calorimetria em espectrofotômetro (modelo Cary 50, VARIAN[®]); o alumínio trocável (Al^{+3}) foi determinado por titulometria de NaOH; a acidez potencial (H+Al) foi determinada por titulometria, usando solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 para sua extração; o pH foi determinado em solução 0,01 mol L⁻¹ de CaCl₂.2H₂O e o teor de matéria orgânica do solo (MOS), pela combustão úmida com dicromato de sódio, via calorimetria em espectrofotômetro (Cary 50, VARIAN[®]). Foram calculadas as somas de bases (SB = Ca + Mg + K), capacidade de troca catiônica (CTC = SB + (H + Al)) e saturação por bases ($V\% = (100 \times SB) / CTC$).

5.3.6 Atributos físicos do solo

Para a análise dos atributos físicos, tais como: porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, as amostras indeformadas foram coletas com anéis volumétricos de (70 cm³) nas mesmas épocas e camadas das amostras deformadas, em três pontos na área útil das subparcelas. As amostras indeformadas foram levadas ao laboratório de física do solo do DEFERS, onde foram saturadas por capilaridade em bandeja com água, por 24 horas.

A porosidade total foi determinada pelo preenchimento total dos poros com água. As amostras saturadas foram submetidas a mesa de tensão com uma pressão de 0,060 kPa, para determinar a quantidade de microporos (poros < 0,05 mm). A

macroporosidade foi determinada pela diferença do volume de água das amostras saturadas e o volume de água após a mesa de tensão. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, em que as mesmas amostras coletadas para caracterizar a porosidade foram secas em estufa a 105°C durante 24 horas (TEIXEIRA et al., 2017).

A resistência do solo à penetração (RP) foi realizada com o uso de um penetrômetro eletrônico modelo Falker (PenetroLOG), em três pontos aleatórios de cada subparcela. Concomitantemente a RP foi realizada a determinação da umidade a base de massa em três pontos aleatórios dentro de cada parcela, nas mesmas camadas do solo.

5.3.7 Caracterização de nanopartículas e nanoestruturas do solo

As caracterizações das nanopartículas e nanoestruturas do solo, foram realizadas somente na camada de 0,00 a 0,05 m, devido ao fato de apresentarem maiores teores de MOS. Foi escolhida de forma aleatória, uma amostra de TFSA de cada tratamento para ser caracterizada. A partir desta seleção deu origem aos seguintes tratamentos: T1 = *Crotalaria juncea* sobre SPD sem escarificação; T2 = *Cajanus cajan* sobre SPD sem escarificação; T3 = *Pennisetum glaucum* sobre SPD sem escarificação; T4 = Pousio sobre SPD sem escarificação; T5 = *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD sem escarificação; T6 = *Crotalaria juncea* sobre SPD com escarificação; T7 = *Cajanus cajan* sobre SPD com escarificação; T8 = *Pennisetum glaucum* sobre SPD com escarificação; T9 = Pousio sobre SPD com escarificação; e T10 = *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD com escarificação.

Avaliou-se um tratamento adicional composto pela área remanescente de Cerrado natural (T11). Na área de Cerrado remanescente (Figura 1), que foi utilizada como referência, realizou-se a caracterização química e física, onde foram observado os seguintes atributos químicos e físicos na camada de 0,00 a 0,05 m :P: (10,0 mg dm⁻³); K: (1,8 mmol_c dm⁻³); Ca: (16,0 mmol_c dm⁻³); Mg(14,0 mmol_c dm⁻³); CTC: (83,8 mmol_c dm⁻³); pH: (4,5 em CaCl₂); H + Al:(52,0 mmol_c dm⁻³); MOS: (35,0 gdm⁻³); SB: (31,8 mmol_c dm⁻³); V:(38,0 %): Mac: (0,22 m³ m⁻³); Mic: (0,29 m³ m⁻³); PT: (0,51 m³ m⁻³); DS: (1,16 Mg m⁻³); RP: (0,43 MPa) e U:(0,13 kg kg⁻¹).

5.3.7.1 Preparação e extração de nanopartículas e nanoestruturas do solo

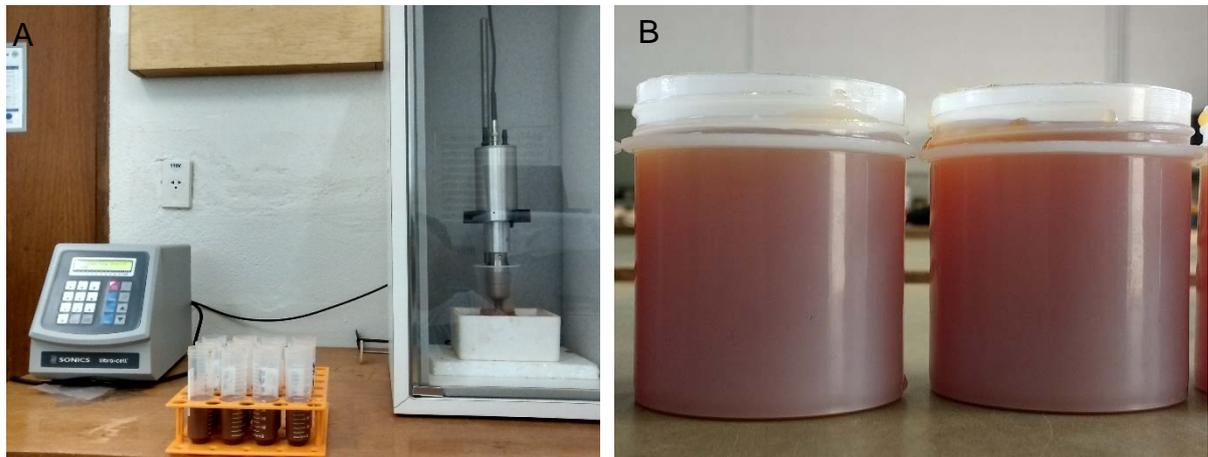
Para avaliar as características morfológicas das nanopartículas do solo, realizou-se inicialmente a dispersão da TFSA, no laboratório de física do solo do

DEFERS (FE/UNESP). Em frascos de vidro foram adicionados 10 g de TFSA e 200 mL de água ultrapura (modelo MEGA RO/UP, MEGAPURITY[®]) com condutividade elétrica variando de 0,4 a 0,7 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Essa solução foi mantida sob agitação lenta por 16 horas, utilizando um agitador de baixa rotação, do tipo Wagner.

Após este período as soluções foram submetidas ao processo de sonificação por cinco minutos a 80 % de amplitude para dispersão das partículas do solo (Figura 4A). Esse procedimento de sonificação foi realizado utilizando-se um aparelho ultrasonificador (modelo VC 500, SONICS & MATERIALS[®]) com uma sonda de 19 mm de diâmetro inserida 35 mm dentro da solução (EDWARDS; BREMMER, 1967; SÁ; LIMA, 2005). Durante o processo de sonificação o frasco de vidro foi mantido em banho de gelo para minimizar o efeito da temperatura sobre as partículas (RIBEIRO; JUNQUEIRA; RODRIGUES, 2014). Após a amostra sonificada, retirou-se 70 mL da solução com uma pipeta imersa a 10 mm, e depois colocou-se em dois tubos Falcon. Em seguida, completou-se o volume retirado com água ultrapura, e realizou-se novamente o processo de sonificação, sendo realizado por mais três vezes (SOUTO FILHO et al., 2017).

As soluções coletadas no processo de sonificação foram posteriormente centrifugadas (modelo NT 815, NOVATECNICA[®]) por 36 minutos em 4.970 rpm a 20 °C, com o intuito de separar as estruturas e partículas menores que 200 nm (GHEZZI et al., 2014). Após o processo de centrifugação, retirou-se 25 mL do sobrenadante (Figura 4B), onde o mesmo foi acondicionado em um frasco de plástico a uma temperatura de 4 °C (TANG et al., 2009). Para evitar que no momento da coleta do sobrenadante, o material depositado no fundo do tubo, fosse também retirado, utilizou-se uma pipeta imersa a 5 mm na solução.

Figura 4 – Amostra após ser sonificada em um aparelho ultrasonificador (A) e sobrenadante após a centrifugação (B).

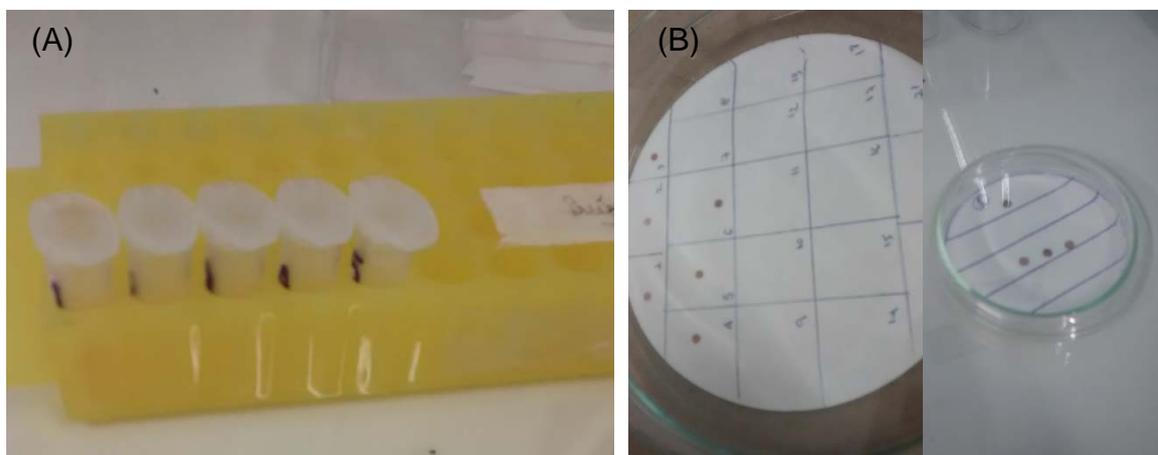


Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.7.2 Análise em microscópio eletrônico de transmissão (MET)

O sobrenadante obtido foi diluído em uma proporção de 1:10, utilizando-se água destilada ultrapura (Figura 5 A). Em seguida a amostra diluída foi colocada em eppendorf de 2 mL e depois submetida a uma nova dispersão em banho de ultrassom por doze minutos. Posteriormente, à dispersão foi depositada três gotas da diluição sobre a grade de Cu de 200 mesh, revestidas com filme de carbono (Cu 200 mesh, TED PELLA[®]). Após a deposição da suspensão, as grades foram colocadas sobre o papel filtro, secas a temperatura ambiente por 24 horas e durante este período, foram acondicionadas em placas de Petri para evitar a contaminação de agentes externos em suspensão no ambiente (Figura 5 B).

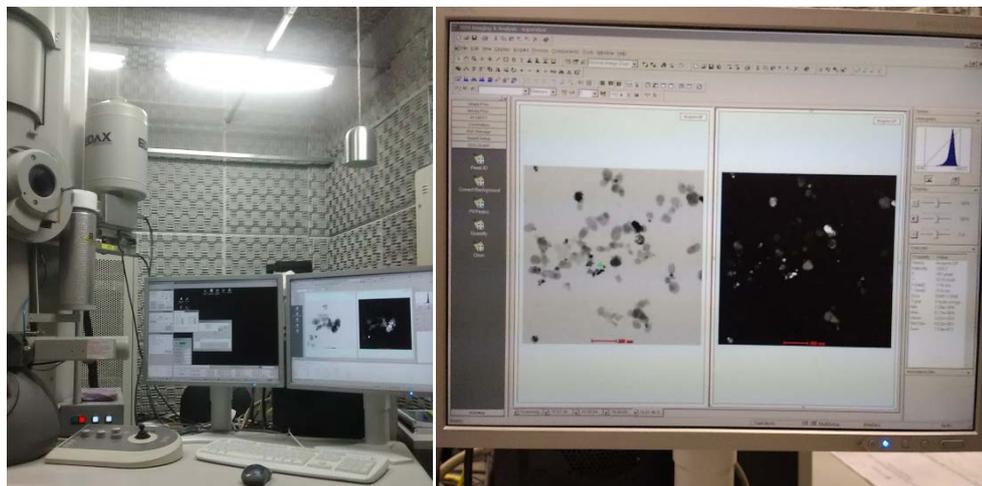
Figura 5 - Sobrenadante diluído 1:10 (A) e sobrenadante depositado sobre as grade de Cu com filme de carbono e acondicionadas em placas de Petri (B).



Fonte: Elaborado pelo autor

Depois do procedimento de preparação das amostras, foram realizadas as micrografias das nanopartículas e das nanoestruturas do solo, sendo obtidas no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), utilizando o microscópio eletrônico de transmissão TECNAI™ G2 F20 (HRTEM), operado a 200 kV acoplado à espectroscopia de energia dispersiva de Raio-X (EDS) EDAX. A aquisição das micrografias procedeu-se em três pontos aleatórios ao longo da grade com aumentos de 79.000, 160.000 e 450.000x. Durante a aquisição da imagem algumas nanopartículas e nanoestruturas foram submetidas a análise microquímica pelo EDS (Figura 6).

Figura 6 - Microscópio Eletrônico de Transmissão TECNAI™ G2 F20 (HRTEM), Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brasil.



Fonte: Elaboração do autor

As características morfológicas das nanopartículas do solo de cada tratamento foram obtidas a partir das micrografias analisadas por meio do programa Image J (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012). As características analisadas foram: área, perímetro, tamanho e circularidade das nanopartículas do solo. Para determinar o tamanho das nanopartículas utilizou-se o diâmetro de Feret (distância entre duas tangentes paralelas ao contorno da partícula) e a circularidade foi empregada para descrever a sua forma (RICE et al., 2013).

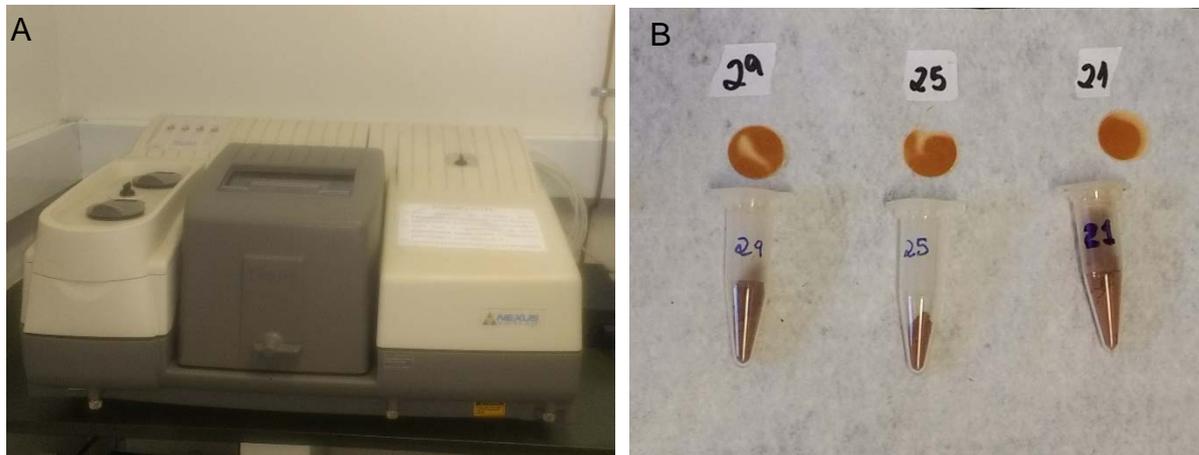
5.3.7.3 Espectrometria de infravermelho (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho com a transformada de Fourier (FTIR) estuda a interação da radiação eletromagnética na região do infravermelho (IR). Após a absorção da radiação IR, as moléculas de uma substância química vibram dando

origem a bandas de absorção compactas próximas chamadas espectro de absorção IR que corresponderá ao grupo funcional característico e às bandas presentes em uma substância química (RAPHAEL, 2011; NAZIR et al., 2016).

A caracterização dos grupos funcionais presentes nas nanoestruturas e nanopartículas foi realizada no departamento de física e química (DFQ) da Faculdade de Engenharia (FE/UNESP), Campus de Ilha Solteira em um aparelho de infravermelho (Nicolet-NEXUS 670 FT-IR) (Figura 7B). O sobrenadante foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, por 120 horas, macerado em almofariz de ágata até apresentar a textura de talco.

Figura 7 – Aparelho de Infravermelho (A); e pastilhas de brometo de potássio (KBr) com partículas de Latossolo Vermelho Distrófico menores que 200 nm (B).



Fonte: Elaboração do autor

Os espectros foram obtidos na região de $4000-400\text{ cm}^{-1}$ com uma resolução de 4 cm^{-1} . As medidas foram feitas utilizando pastilhas de brometo de potássio (KBr) na proporção de 1 mg de amostra de nanopartículas para 150 mg de KBr previamente seco. Esta técnica foi utilizada para caracterização qualitativa da estrutura dos grupos presentes nas nanopartículas.

5.4 Análise estatística

A análise das variáveis biométricas do arroz de terras altas; do feijão, assim como os atributos físicos e químicos do solo foram submetidos inicialmente aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk (5 % de significância) e de homogeneidade de Bartlett (5 % de significância). Os dados que não apresentaram distribuição normal e/ou homocedasticidade, foram transformadas, utilizando a família de transformações Box-Cox (BOX; COX, 1964).

Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade para escarificação (ESC) e as plantas de cobertura(PC). Quando constatada interação significativa entre as fontes de variação (ESC vs PC), procedeu-se o desdobramento, comparando as médias pelo teste de Tukey, adotando-se nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram processadas utilizando-se o programa de análise estatística R (TEAM, 2013).

As variáveis dos atributos químicos e físicos e as características morfológicas das nanopartículas associados com os tratamentos foram analisados por técnicas multivariadas, utilizando análise de componentes principais e de agrupamento de forma combinadas. Em ambas as técnicas foi realizada a padronização das variáveis com média 0 e variância 1 (HAIR Jr et al., 2005).

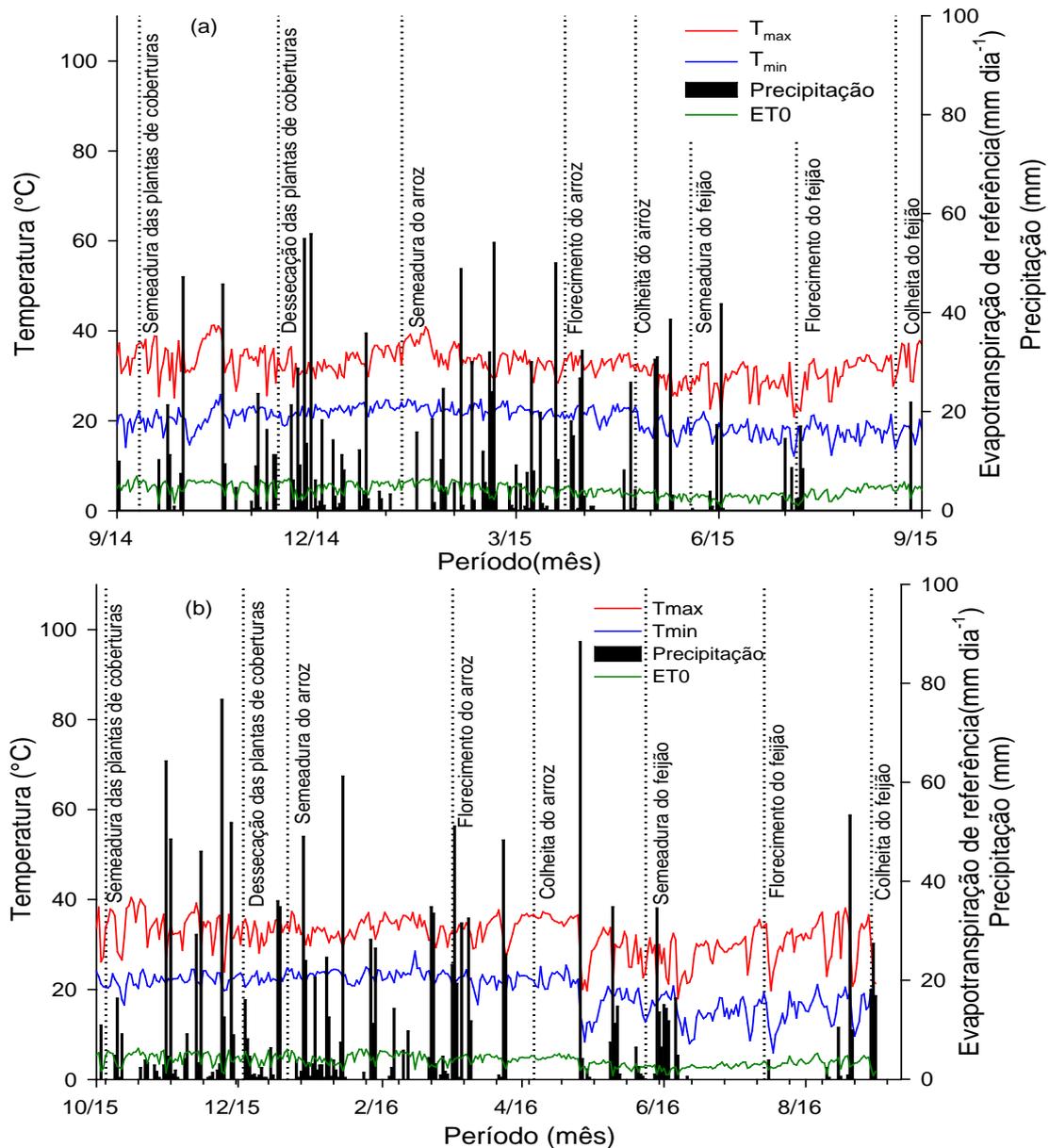
A análise de componentes principais foi aplicada afim de identificar e selecionar componentes principais e variáveis indicadoras de qualidade do solo correlacionáveis capazes de explicar a origem das maiores variabilidades dos dados. Foram selecionados os componentes principais que fossem capazes de contribuir com mais de 70% da explicação da variância total dos dados originais. A importância das variáveis em cada componente principal foi determinada pelo coeficiente de correlação em módulo $r > 0,5$. Como medida complementar aplicou-se análise de agrupamento pelo método do algoritmo de Ward, com o intuito de verificar a similaridade entre os tratamentos e a formação de grupos. A medida de dissimilaridade utilizada foi a distância euclidiana média. Todas as técnicas de estatísticas multivariadas empregadas foram conduzidas no programa STATISTICA 7.0 e as análises descritivas pelo programa EXCEL.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Elementos meteorológicos

As variações dos elementos meteorológicos diários nos dois anos agrícolas durante o desenvolvimento das plantas de cobertura, arroz e feijão em sucessão estão apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Precipitação pluvial (mm), evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}) temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), durante a condução dos experimentos de plantas de cobertura, arroz de terras altas e o feijão nos anos agrícolas de 2014/15 (a) e 2015/16 (b).



Fonte: Adaptado de estação agrometeorológica da FEPE (2016).

As temperaturas médias diárias do ar foram maiores no segundo ano agrícola de cultivo das plantas de cobertura, alcançando um valor médio de 27,9 °C, variando dentro de uma amplitude de 23,4 a 40,1 °C. O segundo ano agrícola do cultivo de arroz foi o que apresentou as maiores médias da temperatura do ar, atingindo um valor médio de 28,0 °C e uma evapotranspiração de referência (ET_0) ao longo do ciclo de 4,17 mm dia⁻¹. No cultivo de feijão o primeiro ano de cultivo foi o que apresentou as maiores médias de temperatura do ar e de ET_0 , alcançando valores de 23,5 °C e 3,1 mm dia⁻¹, respectivamente.

Por se tratar de um cultivo irrigado, as variações dos elementos meteorológicos: precipitação pluvial e ET_0 são minimizados pela suplementação hídrica, assim não chegando a causar estresse hídrico, o que afetaria no desenvolvimento das culturas ao longo dos anos de cultivos. No entanto, segundo Hoffmann Júnior et al. (2007) e Santiago, Breseghello e Ferreira (2013) a temperatura do ar é um elemento meteorológico que pode afetar o desenvolvimento em todas as fases fenológicas do feijão e do arroz, respectivamente.

Segundo Santiago, Breseghello e Ferreira (2013), a temperatura do ar ótima para o desenvolvimento do arroz de terras altas situa-se entre 20°C a 35°C. Nos dois ciclos de cultivo as temperaturas médias diárias estiveram nesta faixa, o que não afetou a duração do ciclo da cultura (WALTER et al., 2010).

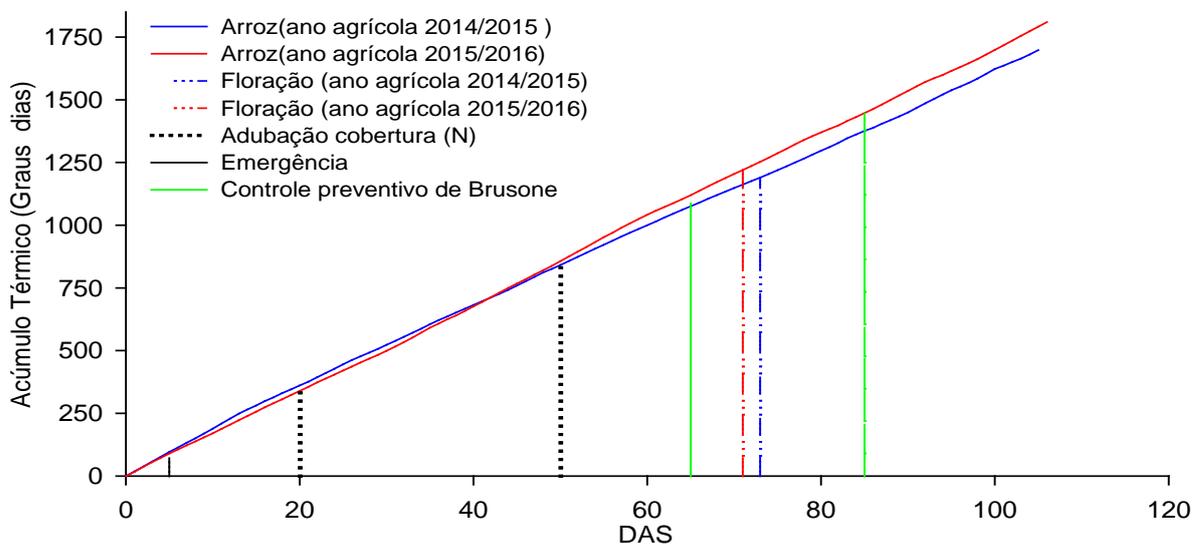
Para o feijoeiro tanto as altas como as baixas temperaturas podem afetar de forma efetiva o rendimento da cultura. Altas temperaturas durante o florescimento causam o abortamento de flores, que por sua vez pode afetar no número de vagens por plantas (PORTUGAL; PERES; RODRIGUES, 2016).

As baixas temperaturas também podem reduzir a produtividade do feijão, devido ao abortamento de flores e falhas nos órgãos reprodutores masculinos e femininos (OLIVEIRA et al., 2014). No segundo ano do cultivo do feijoeiro foram registradas temperaturas mínimas de até 5,9 °C, após o florescimento (Figura 8-b), ainda neste ano agrícola as oscilações da temperatura do florescimento até a colheita foram mais evidentes do que no primeiro ano agrícola.

6.2 Efeitos no desenvolvimento e produtividade do arroz de terras altas

A emergência das plântulas de arroz nos dois anos agrícolas ocorreu de forma uniforme no quinto dia após a semeadura (DAS) (Figura 9), evidenciando que a escarificação e as plantas de cobertura não influenciaram no estabelecimento da cultura.

Figura 9 - Acúmulo térmico diário (graus dia) durante o ciclo da cultura do arroz nos anos agrícolas de (2014/15) e (2015/16)



Fonte: Elaboração do autor; Graus dias estimado segundo a metodologia de Ometto (1981) e utilizando as temperaturas básicas de Souza et al. (1989).

As plantas de cobertura apresentam inúmeras vantagens ao solo em função da deposição do material vegetal sobre ele, em determinados casos, algumas espécies podem afetar negativamente a emergência de plântulas de arroz, devido aos efeitos físicos ou alopatícos (MENEZES et al., 2001). De acordo com Guedes Filho et al. (2015) o efeito do sistema de preparo do solo sobre a emergência das culturas está ligado a qualidade física do solo no sulco de semeadura, que em sistemas de manejo conservacionistas do solo, compreende a camada superficial que é mobilizada durante o processo de semeadura.

O florescimento (Figura 9) no primeiro ano agrícola ocorreu aos 73 DAS (1189 graus dias) e no segundo ano agrícola foi aos 71 DAS (1220 graus dias). A colheita do arroz no primeiro ano agrícolas ocorreu aos 105 DAS (1698 graus dias) e no segundo ano agrícola foi aos 106 DAS (1810 graus dias). A duração do ciclo e o período de

floração da cultivar BRS Esmeralda encontrados nos dois anos corroboram com os valores reportados por Castro et al. (2014) e Alves et al. (2015), este fato possibilita afirmar que os tratamentos utilizados não influenciaram na duração do ciclo.

A altura de planta nos dois anos não apresentou diferenças entre os tratamentos (Tabela 2). No entanto as plantas cultivadas no primeiro ano apresentaram ligeiro incremento da altura em relação ao segundo ano (Tabela 3).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância das características, altura de planta (Alt), número de panícula (NP), massa hectolétrica (MHe), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), nas safras de 2014/15 e 2015/16.

Safra (2014/15)						
F. V	GL	Quadrado médio				
		Alt	NP	MHe	M100	Prod.
ESC	1	0,0106 ^{ns}	277,73 ^{ns}	44,437 ^{ns}	0,0010 ^{ns}	1386001 ^{ns}
Bloco	3	0,0255	1251,43	65,563	0,1563	904581
Erro (A)	3	0,0105	594,40	29,058	0,0897	2116988
PC	4	0,0015 ^{ns}	225,33 ^{ns}	17,856*	0,0315 ^{ns}	859755 ^{ns}
ESC x PC	4	0,0006 ^{ns}	108,51 ^{ns}	14,727 ^{ns}	0,0160 ^{ns}	23968 ^{ns}
Erro (B)	24	0,0016	501,03	14,727	0,0393	535369
Parcela C.V (%)		9,06	12,02	10,54	10,82	30,94
Subparcelas C.V (%)		3,57	11,03	4,64	7,16	15,56
Safra (2015/16)						
ESC	1	0,126 ^{ns}	7174,9 ^{ns}	0,9364 ^{ns}	0,018 ^{ns}	2974399 ^{ns}
Bloco	3	0,017	4129,4	12,4775	0,043	1930402
Erro (A)	3	0,005	2495,20	9,4867	0,041	1648631
PC	4	0,003 ^{ns}	3717,4 ^{ns}	2,1405 ^{ns}	0,026 ^{ns}	280176 ^{ns}
ESC x PC	4	0,0024 ^{ns}	1318,7 ^{ns}	1,6952 ^{ns}	0,007 ^{ns}	849686 ^{ns}
Erro (B)	24	0,0018	408,2	7,2541	0,017	897258
Parcela C.V (%)		7,96	27,12	5,92	8,22	31,24
Subparcelas C.V (%)		4,36	13,45	5,18	5,34	23,05

**F significativo a 1 % de probabilidade; *F significativo a 5 % de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade

Tabela 3 - Valores médios de altura de plantas (Alt) e número de panículas m⁻² (NP) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nas safras de 2014/15 e 2015/16.

	Alt (m)		NP	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação				
Sem	1,11 a	0,94 a	194,42 a	211,35 a
Com	1,14 a	0,97 a	211,14 a	238,14 a
Plantas de cobertura				
Crotalaria	1,10 a	0,95 a	209,28 a	211,43 a
Guandu	1,14 a	0,95 a	194,64 a	224,28 a
Milheto	1,13 a	0,94 a	203,21 a	227,50 a
Pousio	1,14 a	0,98 a	202,14 a	244,64 a
Urochloa	1,14 a	0,96 a	204,64 a	215,90 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

A altura de planta é uma característica que no desenvolvimento da cultura interfere diretamente na ocorrência de acamamento de plantas (NASCIMENTO et al., 2009; GOES et al., 2016). Nos dois anos de cultivo não ocorreu o acamamento de planta na área útil do cultivo, sua ocorrência na cultura afeta a colheita mecanizada, além de prejuízos à qualidade das sementes e ao potencial produtivo da cultura (ZAGONEL; FERNANDES, 2007).

Em ambos os anos agrícolas, o número de panícula por área não apresentou diferenças significativa entre os tratamentos (Tabela 2). O segundo ano de cultivo apresentou um ligeiro incremento neste componente de produção (Tabela 3). No entanto, os valores apresentados ficaram abaixo dos reportados por (ALVES et al., 2015).

A massa hectolétrica apresentou diferenças significativas entre as plantas de cobertura em sucessão no primeiro ano de cultivo (Tabela 2 e Tabela 4). Neste ano agrícola o arroz cultivado em sucessão ao milho apresentou a maior massa hectolétrica de 52,70 kg 100 L⁻¹, porém, se diferenciando apenas da sucessão a crotalaria, no segundo ano as plantas de cobertura em sucessão se apresentaram estatisticamente iguais. Os valores observados nos dois anos agrícolas estão próximos aos valores reportados por Alves et al. (2015), para esta mesma cultivar, testando os efeitos das doses de thidiazuron em diferentes estádios de desenvolvimento. A massa hectolétrica corresponde à massa de grãos com casca em kg em um volume de 100 L, a qual é determinada em balança de ¼, com teor de água dos grãos corrigido para 13 % (base úmida) e que pode ser afetada durante a fase de enchimento de grãos (ARF et al., 2015).

Tabela 4- Valores médios de massa hectolétrica (MHe), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	MHe (kg 100 L ⁻¹)		M100 (g)		Prod. (kg ⁻¹)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	52,19 a	52,13 a	2,77 a	2,49 a	4515 a	3837 a
Com	50,08 a	51,82 a	2,76 a	2,45 a	4887 a	4443 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	48,87 b	51,79 a	2,67 a	2,42 a	4257a	4249 a
Guandu	50,67 ab	52,63 a	2,82 a	2,40 a	4790 a	4053 a
Milho	52,70 a	51,40 a	2,72 a	2,49 a	4710 a	4287 a
Pousio	52,19 ab	52,40 a	2,80 a	2,53 a	5161 a	4140 a
Urochloa	51,25 ab	51,66 a	2,80 a	2,50 a	4587 a	3971 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

A massa de cem grãos é um componente de produção que também é afetado na fase de enchimento de grãos (Tabela 4). Nos dois anos agrícolas a massa de cem grãos não apresentou diferenças significativas, apontando que os sistemas de preparo do solo e as plantas de cobertura não provocaram alterações capazes de influenciar este componente de produção (Tabela 2 e Tabela 4). Garcia (2017) avaliando o efeito de culturas antecessoras sobre o arroz inoculado por bactérias diazotróficas, encontrou valores médios de 2,50 g, que ficaram próximos aos valores obtidos no segundo ano de cultivo para este componente de produção.

A produtividade de grãos não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos em nenhum dos anos agrícolas (Tabela 2 e Tabela 4). Nascimento (2015) trabalhando na mesma área e com os mesmos tratamentos, porém com uma cultivar de arquitetura moderna, conseguiu verificar diferenças tanto para os sistemas de preparo quanto para as plantas de cobertura apenas no primeiro ano de cultivo. É possível constatar que do primeiro para o segundo ano de cultivo (Tabela 4), ocorreu uma redução na produtividade de grãos, onde nos sistemas de preparo a redução ficou mais pronunciada onde não teve escarificação atingindo 15 % de redução; para as plantas de cobertura em sucessão, o arroz quando cultivado sobre o pousio atingiu 19 % de redução.

Durante a condução do experimento os fatores bióticos foram controlados, mediante os tratamentos culturais exigidos pela cultura, a fim de evitar potenciais danos durante o seu desenvolvimento, o que afetaria a produtividade e qualidade dos grãos. Para Kamimura et al. (2009), os atributos físicos do solo podem em muitas das vezes interferir negativamente no desenvolvimento do sistema radicular do arroz, o que conseqüentemente afetaria a produtividade de grãos. Uma outra possibilidade para esta redução na produtividade estar atrelada ao fenômeno de autointoxicação como reportado por Marques et al. (1998). Durante a decomposição da palhada do arroz, pode ocorrer a liberação de compostos tóxicos (ácido vanílico, p-cumárico, ácido o-hidroxifenilacético, ácido ferúlico e ácido siríngico), os quais interferem na atividade radicular e na absorção de íons (SEAL et al., 2004; MATEUS; FELTRAN; CRUSCIOL, 2006; AMB; AHLUWALIA, 2016). Tendo em vista que a área vem sendo cultivada com arroz desde 2012/2013, quando Nascimento (2015), deu início ao desenvolvimento do trabalho.

Além das possíveis causas da redução da produção supracitadas, Soares (2004) afirma que esta redução está ligada à forma do nitrogênio (N) na fase inicial do

desenvolvimento. Segundo este autor o arroz sofre carência de N amoniacal, já que no primeiro mês de vida a plântula de arroz não produz/ou produz em pequena quantidade a enzima redutase do nitrato. Assim, esta deficiência afeta o desenvolvimento inicial, acarretando prejuízos direto na produção da cultura. Esta autor salienta ainda que em SPD o pouco N amoniacal produzido pela mineralização é rapidamente nitrificado a nitrato, uma vez que o meio é rico em O₂.

O efeito do sistema de preparo e das plantas de cobertura sobre a qualidade industrial do arroz de terras altas beneficiado, nos dois anos de cultivos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância das características, rendimento benefício do grão integral (RBI), grãos inteiros integrais (GII), grãos quebrados integrais (GQI), rendimento benefício polido (RBP), grãos inteiros polidos (GIP) e grãos quebrados polidos (GQP) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15)							
F. V	GL	Quadrado médio					
		RBI	GII	GQI	RBP	GIP	GQP
ESC	1	0,382 ^{ns}	13,389 ^{ns}	8,402 ^{ns}	0,261 ^{ns}	4,575 ^{ns}	0,00001 ^{ns}
Bloco	3	8,359	66,423	29,195	12,618	81,710	0,0001
Erro (A)	3	6,553	53,322	25,048	12,989	75,401	0,0007
PC	4	3,202 ^{ns}	9,987 ^{ns}	4,346 ^{ns}	5,086 ^{ns}	18,406 ^{ns}	0,0001 ^{ns}
ESC x PC	4	1,809 ^{ns}	3,773 ^{ns}	0,795 ^{ns}	0,995 ^{ns}	2,951 ^{ns}	0,00003 ^{ns}
Erro (B)	24	2,862	6,692	2,178	3,945	11,856	0,00001
Parcela C.V (%)		3,12	9,73	3,20 ⁽¹⁾	4,80	13,14	1,53 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		2,06	3,44	1,07 ⁽¹⁾	2,64	5,21	0,58 ⁽¹⁾
Ano agrícola (2015/16)							
ESC	1	0,443 ^{ns}	3,931 ^{ns}	1,731 ^{ns}	0,037 ^{ns}	1,056 ^{ns}	1,490 ^{ns}
Bloco	3	3,219	21,420	9,189	13,170	35,475	5,562
Erro (A)	3	4,176	8,999	2,535	10,860	21,844	3,481
PC	4	1,973 ^{ns}	3,622 ^{ns}	0,948 ^{ns}	5,436 ^{ns}	6,874 ^{ns}	2,222 ^{ns}
ESC x PC	4	1,877 ^{ns}	1,882 ^{ns}	2,221*	1,054 ^{ns}	3,267 ^{ns}	1,160 ^{ns}
Erro (B)	24	1,368	1,631	0,589	3,696	5,621	0,870
Parcela C.V (%)		2,48	3,95	24,70	4,39	6,99	22,59
Subparcelas C.V (%)		1,42	1,68	11,90	2,56	3,55	11,29

**F significativo a 1 % de probabilidade; *F significativo a 5 % de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

No primeiro ano de cultivo, nenhum dos fatores testados influenciaram na qualidade industrial do arroz beneficiado (Tabela 5). Segundo a normativa número 12 de 29 de Março de 2010 do MAPA - ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (BRASIL, 2010), que trata sobre os parâmetros da classificação de cada tipo de arroz beneficiado, os valores médios de grãos quebrados para o arroz beneficiado integral não atingiu o limite para a classificação como Tipo I integral (Tabela 6) deste modo os tratamentos testados receberam a classificação de arroz

Tipo II integral e apenas o arroz produzido sobre sucessão de *Urochloa* foi classificado como tipo III.

Tabela 6- Valores médios de rendimento benefício do grão integral (RBI), grãos inteiros integrais (GII), grãos quebrados integrais (GQI) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nas safras de 2014/15 e 2015/16

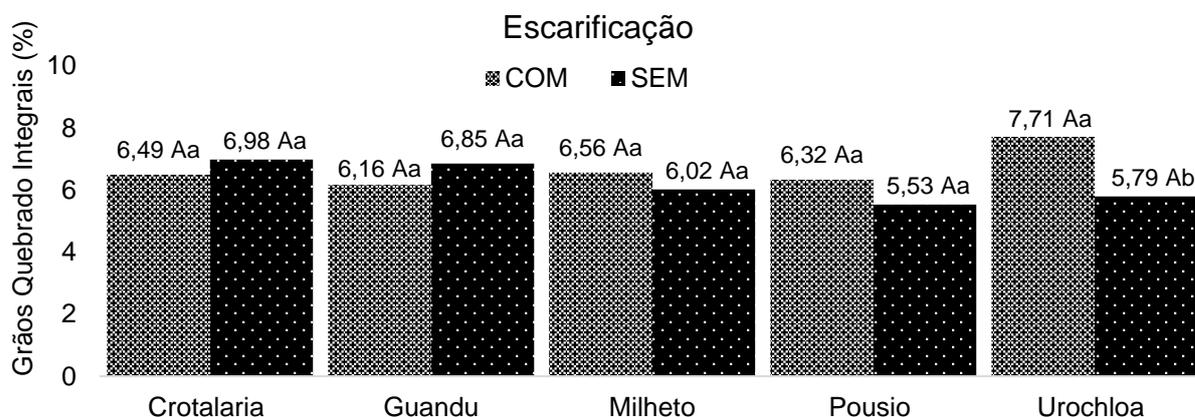
	RBI (%)		GII (%)		GQI (%)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	81,11 a	82,37 a	75,57 a	76,51 a	7,45 a	--
Com	81,91 a	82,16 a	74,41 a	76,14 a	6,53 a	--
Plantas de cobertura						
Crotalaria	81,26 a	81,93 a	73,70 a	75,19 a	7,45 a	--
Guandu	81,89 a	82,14 a	74,97 a	75,63 a	6,91 a	--
Milheto	81,58 a	81,71 a	74,79 a	75,41 a	6,79 a	--
Pousio	82,71 a	82,84 a	76,79 a	76,91 a	5,92 a	--
Urochloa	82,60 a	82,73 a	74,72 a	75,97 a	7,88 a	--

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

O segundo ano agrícola apresentou interação entre o preparo do solo e as plantas de cobertura em sucessão para o arroz beneficiado quebrado integral (Tabela 6 e Figura 10).

Figura 10 - Desdobramento da interação dos grãos quebrados integrais (GQI) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC) na safra 2015/16. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para ESC dentro de PC, e maiúscula, para PC dentro da ESC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância



Fonte: Elaboração do autor

Observou-se que o arroz integral produzido sem escarificação apresentou melhor performance no beneficiamento, pois independente da planta de cobertura em

sucessão a porcentagem de grãos quebrados resultou em uma classificação do tipo II, porém, o arroz cultivado em sucessão da *Urochloa* em SPD com esscarificação resultou em uma classificação de arroz integral tipo III (BRASIL, 2010).

Para o arroz submetido ao polimento (brunimento), nenhuma característica da qualidade industrial apresentou impacto devido aos tratamentos testados (Tabela 5 e Tabela 7).

Tabela 7 - Valores médios de rendimento benefício polido (RBP), grãos inteiros polidos (GIP) e grãos quebrados polidos (GQP) do arroz de terras altas cultivado sobre o efeito da esscarificação e de plantas de cobertura, nas safras de 2014/15 e 2015/16.

	RBP (%)		GIP (%)		GQP (%)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	74,89 a	74,99 a	66,38 a	66,93 a	8,50 a	8,06 a
Com	75,05 a	75,05 a	65,70 a	66,60 a	9,34 a	8,44 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	73,92 a	73,92 a	64,30 a	66,03 a	9,61 a	7,89 a
Guandu	74,73 a	74,61 a	65,84	66,34 a	8,89 a	8,26 a
Milheto	75,14 a	75,14 a	66,40	67,03 a	8,73 a	8,11 a
Pousio	76,13 a	76,13 a	68,38	68,28 a	7,73 a	7,85 a
<i>Urochloa</i>	74,93 a	75,31 a	65,29	66,16 a	9,64 a	9,15 a

Médias seguidas de mesma letra, para esscarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

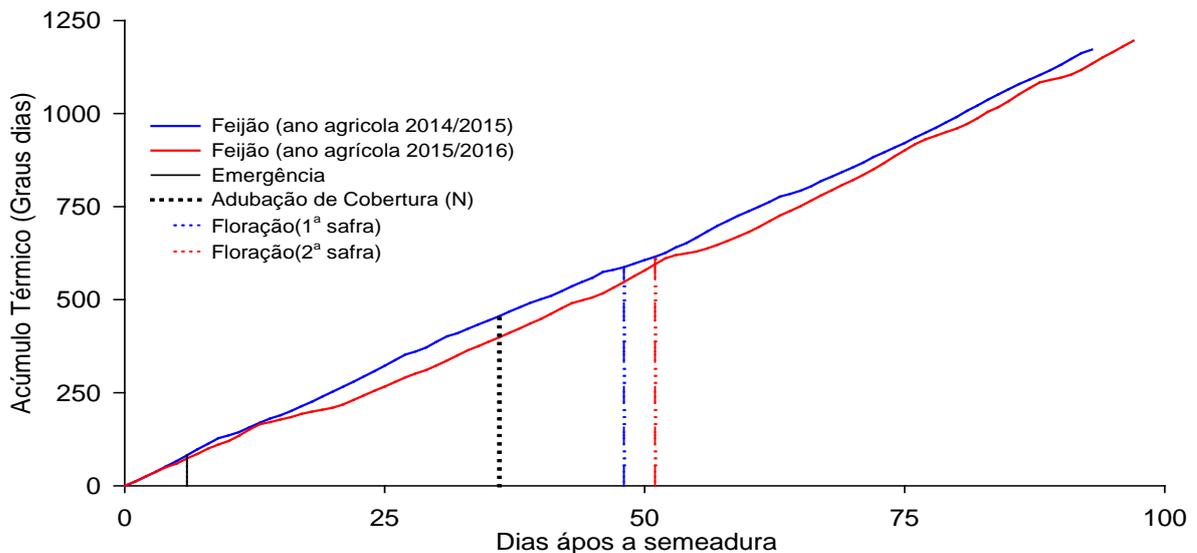
O rendimento de benefício dos grãos polidos inteiros, apresentou níveis excelentes, superiores a 40 %, considerado valor nacional padrão para comercialização (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006). O rendimento de grãos quebrados polidos (Tabela 7), apresentou uma classificação de grãos variando do tipo III ao tipo IV (BRASIL, 2010). A literatura aponta diversos fatores que afetam o rendimento benefício dos grãos integral ou polido, dentre eles destacam-se: fatores genéticos ligado as cultivares, praticas culturais, tempo e métodos de colheita (AHMAD; ALI; MAHMOOD, 2017; JABRAN et al., 2017; REHAL; KAUR; SINGH, 2017).

Segundo Blumenthal et al. (2008), a camada proteica ao redor do grão de arroz integral, confere maior resistência a ruptura do grão durante o processo de beneficiamento e que o nitrogênio é um elemento que contribui diretamente na formação desta camada. De forma indireta e parcial esta afirmação ajuda a explicar as diferenças do rendimento de grãos quebrados no integral e no polido e que o arroz em sucessão a *Urochloa*, possivelmente apresentou um desequilíbrio nutricional afetando a formação desta camada proteica.

6.3 Efeitos no desenvolvimento e produtividade do feijão

A emergência das plântulas do feijão em ambos os anos agrícolas ocorreu de forma uniforme no sexto dia após a semeadura (DAS) (Figura 11), evidenciando que a escarificação e as plantas de cobertura não influenciaram no desenvolvimento inicial da cultura.

Figura 11 - Acúmulo térmico diário (graus dia) durante o ciclo da cultura do feijão nos anos agrícolas de (2014/15) e (2015/16).



Fonte: Elaboração do autor; Graus dias estimado segundo a metodologia de Ometto (1981) e utilizando as temperaturas básicas de Miranda e Campelo Júnior (2010).

De acordo Leite et al. (2013) estudando o comportamento do feijoeiro em diferentes preparos de solo, constatou que depois do sexto dia após a semeadura, 71,17 e 66,55 % das sementes emergiram nos tratamentos com escarificação e sem escarificação, respectivamente. Segundo Muraishi et al. (2005) estudando o efeito palha de diferentes plantas de cobertura sobre sucessão milho e soja, verificaram que o efeito na emergência ocorreu devido a germinação das sementes de milho e soja e não ao efeito negativo das plantas de cobertura sobre as mesmas.

A colheita do feijão(Figura 11) no primeiro ano agrícola ocorreu aos 93 DAS (1172 graus dias) e no segundo ano agrícola foi aos 97 DAS (1196 graus dias), ficando dentro do ciclo normal de desenvolvimento da cultivar (YOKOYAMA et al., 1999).

A população final de plantas no primeiro ano agrícola não apresentou diferenças significativas para esta variável. No entanto, no segundo ano agrícola, foi possível observar diferenças na população final de plantas entre as sucessões de plantas de cobertura (Tabela 8).

Tabela 8 - Resumo da análise de variância das características, população final (Pop.), número de vagem por planta (NVP), número de grãos por planta (NGP), número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do feijão cultivado sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Safra (2014/15)							
F.V	GL	Quadrado médio					
		Pop.	NVP	NGP	NGV	M100	Prod.
ESC	1	351165930 ^{ns}	0,571 ^{ns}	18,225 ^{ns}	0,081 ^{ns}	0,127 ^{ns}	145099 ^{ns}
Bloco	3	2127318054	28,102	272,292	10,127	8,869	661883
Erro (A)	3	381242599	13,978	215,425	2,611	3,141	773203
PC	4	63252586 ^{ns}	1,137 ^{ns}	108,963 ^{ns}	0,481 ^{ns}	2,495 ^{ns}	505969 ^{ns}
ESC x PC	4	425087630 ^{ns}	5,401	182,787 ^{ns}	2,645	2,251 ^{ns}	375187 ^{ns}
Erro (B)	24	564852911	2,715	208,358	2,371	2,421	600336
Parcela C.V (%)		10,83	33,35	27,70	32,73	6,39	22,97
Subparcelas C.V (%)		13,18	14,70	27,24	31,19	5,61	20,24
Safra (2015/16)							
ESC	1	308641914 ^{ns}	5,852 ^{ns}	70,760 ^{ns}	0,045 ^{ns}	1,059 ^{ns}	139834 ^{ns}
Bloco	3	150205776	29,142	675,650	0,259	15,631	335594
Erro (A)	3	1763374303	1,204	60,810	0,089	5,507	111591
PC	4	2684027403*	3,009 ^{ns}	49,890 ^{ns}	0,091 ^{ns}	8,071 ^{ns}	53038 ^{ns}
ESC x PC	4	82947549 ^{ns}	3,210 ^{ns}	101,330 ^{ns}	0,175 ^{ns}	3,359 ^{ns}	54668 ^{ns}
Erro (B)	24	801183086	6,264	159,130	0,111	3,077	76993
Parcela C.V (%)		19,58	9,32	15,58	7,09	8,87	15,64
Subparcelas C.V (%)		13,19	21,25	25,21	7,88	6,63	12,99

**F significativo a 1 % de probabilidade; *F significativo a 5 % de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade

Fonte: Elaboração do autor.

O feijoeiro cultivado após a sucessão da crotalaria e o arroz apresentou maior população de plantas, quando comparado a sucessão com *Urochloa*, a qual apresentou população de plantas inferior 200 mil plantas por hectares (Tabela 9), estes dados corroboram com Nunes et al. (2006) que verificaram maior estande de plantas de feijoeiro quando cultivado em sucessão a *Crotalaria juncea*.

Tabela 9 – Valores médios da população final (Pop.), número de vagem por planta (NVP) e número de grãos por planta (NGP) do feijão após o cultivo de arroz de terras altas sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	Pop.		NVP		NGP	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	177284 a	211666 a	11,32 a	11,39 a	53,65	48,70
Com	183209 a	217222 a	11,08 a	12,16 a	52,30	51,36
Plantas de cobertura						
Crotalaria	180555 a	240277 a	11,63 a	11,80 a	56,37 a	49,98 a
Guandu	175617 a	223611 ab	10,67 a	11,02 a	47,85 a	48,38 a
Milheto	181790 a	211111 ab	11,46 a	11,68 a	53,25 a	50,25 a
Pousio	183024 a	204861 ab	11,22 a	11,66 a	50,87 a	47,51 a
Urochloa	180247 a	192361 b	11,04 a	12,72 a	56,50 a	54,01 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Os componentes de produção: número de vagens por plantas, número de grãos por planta, número de grãos de por vagem e massa de cem grãos, não apresentaram diferença significativa para nenhum tratamento testado (Tabela 8). Verificou-se que do primeiro para o segundo ano de cultivo houve um incremento no número de vagens por plantas. Em contrapartida, o número de grãos por planta, número de grãos por vagem e massa de cem grãos apresentaram comportamento inverso, onde o primeiro ano de cultivo apresentou valores relativamente superiores para estes componentes de produção (Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 10 - Valores médios do número de grãos por vagem (NGV), massa de 100 grãos (M100) e produtividade (Prod.) do feijão após o cultivo de arroz de terras altas sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	NGV		M100 (g)		Prod. (kg ha ⁻¹)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	4,98 a	4,26 a	27,76 a	26,60 a	3767 a	2076 a
Com	4,89 a	4,19 a	27,64 a	26,28 a	3887 a	2194 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	4,94 a	4,19 a	27,32 a	26,32 a	3896 a	2059 a
Guandu	4,79 a	4,38 a	28,60 a	26,24 a	3513 a	2235 a
Milheto	4,84 a	4,24 a	27,28 a	26,62 a	3737 a	2046 a
Pousio	4,73 a	4,08 a	27,89 a	27,92 a	3789 a	2147 a
Urochloa	5,35 a	4,22 a	27,41 a	25,11 a	4201 a	2187 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Este comportamento é relatado na literatura como efeito compensatório, que ocorre em função das alterações no estande de plantas pelos componentes número de vagens por planta, número de grãos por vagem e massa de grãos, afim de restabelecer o rendimento devido a redução da população de plantas (SHIMADA; ARF; SÁ, 2000; PIANA; DA SILVA; ANTUNES, 2007).

As variações destes componentes de produção de um ano para o outro pode ter ocorrido em função das alterações dos elementos meteorológicos que ocorreram na área durante a condução do experimento, e que podem afetar os órgãos reprodutivos (OLIVEIRA et al., 2014) além do ataque do mofo branco no final da fase reprodutiva da cultura, sendo necessário reduzir a frequência da irrigação e conseqüentemente disponibilizando menor quantidade de água para a cultura.

A produtividade de grãos não apresentou diferença significativa em nenhum ano de cultivo (Tabela 8). No entanto, do primeiro para o segundo ano foi possível observar uma redução de até 48 % (Tabela 10). Esta diferença pode ser atribuída aos danos

causado por mofo branco na fase final de enchimento de grão, o que pode ter contribuído para redução da produção, estes danos, também foram reportados por Arf et al. (2004) em sistema de plantio direto.

6.4 Atributos químicos do solo

6.4.1 Atributos químicos do solo na camada 0,00 a 0,05 m

Os teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e o pH do solo, no primeiro ano agrícola, não foram influenciados pelos sistemas de preparo e plantas de cobertura (Tabela 11). Nesta camada no primeiro ano de cultivo foi possível verificar diferença significativa para os teores de P e MOS e para o segundo apenas para o teor de Ca.

Tabela 11 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

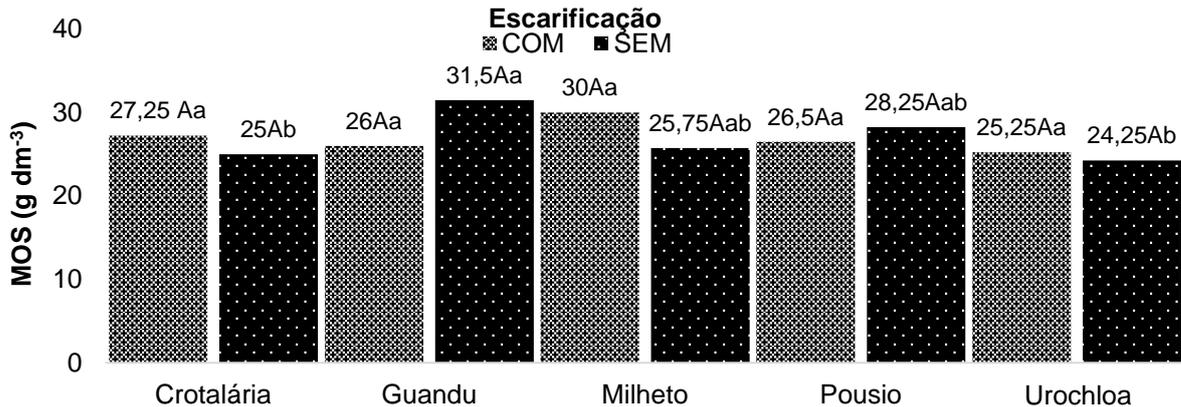
Ano agrícola (2014/15) - camada de 0,00 a 0,05m							
F. V	GL	Quadrado médio					
		P	MOS	pH	K	Ca	Mg
ESC	1	313,60**	0,025 ^{ns}	0,025 ^{ns}	3,025 ^{ns}	1,952 ^{ns}	1,415 ^{ns}
Bloco	3	2012,87	3,625	0,111	11,713	26,531	10,386
Erro (A)	3	7,80	11,491	0,123	2,221	25,016	6,384
PC	4	426,79**	19,587 ^{ns}	0,140 ^{ns}	1,261 ^{ns}	26,471 ^{ns}	10,535 ^{ns}
ESC x PC	4	192,79 ^{ns}	28,712*	0,199 ^{ns}	3,905 ^{ns}	26,951 ^{ns}	11,102 ^{ns}
Erro (B)	24	77,27	9,183	0,168	2,033	13,203	6,686
Parcela C.V(%)		6,84	12,56	5,97	29,08	33,37 ⁽¹⁾	25,64 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		21,54	11,23	6,99	27,82	24,24 ⁽¹⁾	25,25 ⁽¹⁾
Ano agrícola (2015/16) - camada de 0,00 a 0,05 m							
ESC	1	864,90 ^{ns}	36,100 ^{ns}	1,056 ^{ns}	1,806 ^{ns}	810,00*	45,455 ^{ns}
Bloco	3	154,07	31,067	0,248	2,761	61,00	2,560
Erro (A)	3	207,23	15,567	0,324	0,408	73,67	7,000
PC	4	47,21 ^{ns}	8,963 ^{ns}	0,059 ^{ns}	2,130 ^{ns}	11,50 ^{ns}	0,773 ^{ns}
ESC x PC	4	130,71 ^{ns}	11,162 ^{ns}	0,083 ^{ns}	3,608 ^{ns}	18,12 ^{ns}	1,313 ^{ns}
Erro (B)	24	91,21	10,546	0,903	1,866	24,65	1,886
Parcela C.V(%)		33,40	15,23	10,91	16,16	30,11	28,00 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		22,15	12,53	3,71	34,56	17,41	14,53 ⁽¹⁾

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 12 tem-se apresentado o efeito da interação entre a escarificação do solo e as plantas de cobertura, sobre a MOS. Esta interação aponta que os sistemas de preparo não apresentaram diferenças significativas para teor de MOS. Contrariando os resultados de Araujo et al. (2004) pois os autores afirmam que o sistema plantio direto (SPD) apresenta um ambiente menos oxidativo em relação a escarificação, o que favoreceria a este sistema uma elevação no teor de MOS.

Figura 12- Desdobramento da interação do teor de matéria orgânica do solo (MOS) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.



Fonte: Elaboração do autor

Apesar de não apresentar diferenças entre os sistemas de preparos, dentro de cada um deles as plantas de cobertura apresentaram comportamentos distintos (Figura 12). No sistema sem escarificação foi observado diferença apenas para o guandu (*Cajanus cajan*), que apresentou maior teor MOS, em relação a Crotalaria e a Urochloa. Estas duas últimas não se diferenciam entre si, nem quando comparadas com as demais. O mesmo ocorreu na área com escarificação, onde a sucessão com Urochloa novamente apresentou o menor teor de MOS, a sucessão com milheto (*Pennisetum glaucum*) apresentou maior teor de MOS para este sistema de preparo.

De acordo com Cunha et al. (2011) o aumento da matéria orgânica depende também da qualidade desses resíduos, sobretudo no que se refere à relação C/N e de constituintes recalcitrantes à decomposição microbiana, como ligninas, ceras e compostos fenólicos de alto peso molecular.

Tanto a escarificação quanto as plantas de cobertura, mostraram comportamentos diferentes para o teor de fósforo (P). O sistema de preparo sem escarificação apresentou-se superior em relação ao SPD com escarificação (Tabela 12).

Tabela 12 - Valores médios dos atributos químicos do solo, teores de fosforo (P) e matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	P (mg dm ⁻³)		MOS (g dm ⁻³)		pH	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	43,6 a	47,75 a	--	26,85 a	5,8 a	5,4 a
Com	38,0 b	38,45 a	--	24,95 a	5,9 a	5,0 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	37,25 b	47,25 a	--	27,12 a	5,8 a	5,3 a
Guandu	39,87 b	43,25 a	--	25,75 a	5,9 a	5,1 a
Milheto	53,25 a	41,37 a	--	26,75 a	5,9 a	5,2 a
Pousio	39,37 b	41,62 a	--	24,50 a	5,9 a	5,2 a
Urochloa	34,25 b	42,00 a	--	25,37 a	5,6 a	5,2 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: elaboração autor.

Nesta camada o milho foi a planta de cobertura em sucessão que apresentou o maior teor de P disponível no solo. Este resultado corrobora com os reportados por Foloni et al. (2016) que ao estudarem a disponibilidade de P no solo e na palha durante as sucessivas culturas de gramíneas tropicais fertilizadas com diferentes fosfatos, verificou que o teor de P nos solos cultivados com milho apresentava-se maior.

Para o teor de Ca no segundo ano agrícola houve diferenças significativas quando estudado o sistema de preparo (Tabela 13). O sistema de preparo sem escarificação do solo foi o que apresentou o maior teor de Ca. É possível notar que do primeiro para o segundo ano no sistema de preparo com escarificação ocorreu redução de 31 % no teor de Ca.

Tabela 13 - Valores médios dos atributos químicos do solo, teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	K (mmolc dm ⁻³)		Ca (mmolc dm ⁻³)		Mg (mmolc dm ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	5,40 a	4,16 a	35,95 a	33,00a	25,20 a	25,25 a
Com	4,85 a	3,74 a	34,90 a	24,00b	24,30 a	18,55 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	4,96 a	4,78 a	33,62 a	30,37 a	26,00 a	23,25 a
Guandu	5,31 a	3,50 a	37,50 a	27,25 a	25,50 a	20,75 a
Milheto	5,22 a	3,93 a	39,00 a	28,12 a	28,87 a	21,87 a
Pousio	5,58 a	3,55 a	40,37 a	28,87 a	27,00 a	21,62 a
Urochloa	4,53 a	3,98 a	26,62 a	27,87 a	18,37 a	22,00 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Os atributos químicos acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB) e saturação por bases (V), apresentaram poucas influencias do sistema de preparo e das plantas de cobertura. Somente no segundo ano de cultivo o atributo CTC apresentou diferenças significativas nesta camada (Tabela 14).

Tabela 14 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), teor de alumínio (Al), soma de base (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada de 0,00 a 0,05m					
F. V	GL	Quadrado médio			
		H +Al	SB	CTC	V
ESC	1	12,100 ^{ns}	13,94 ^{ns}	129,60 ^{ns}	7,225 ^{ns}
Bloco	3	27,467	136,37	538,24	256,092
Erro (A)	3	16,100	98,45	551,80	73,692
PC	4	10,787 ^{ns}	118,99 ^{ns}	837,59 ^{ns}	60,275 ^{ns}
ESC x PC	4	12,622 ^{ns}	125,15 ^{ns}	726,36 ^{ns}	101,225 ^{ns}
Erro (B)	24	40,658	66,81	356,48	108,433
Parcela C.V(%)		19,29	30,98 ⁽¹⁾	27,28	11,59
Subparcelas C.V (%)		30,65	25,52 ⁽¹⁾	21,92	14,06
Ano agrícola (2015/16) – camada de 0,00 a 0,05 m					
ESC	1	313,600 ^{ns}	2584,06 ^{ns}	1097,26*	1155,62 ^{ns}
Bloco	3	47,467	171,57	103,27	77,49
Erro (A)	3	104,133	295,02	53,44	210,82
PC	4	19,212 ^{ns}	51,70 ^{ns}	17,46 ^{ns}	43,34 ^{ns}
ESC x PC	4	13,787 ^{ns}	87,50 ^{ns}	53,18 ^{ns}	43,56 ^{ns}
Erro (B)	24	17,717	92,30	81,08	44,20
Parcela C.V(%)		31,78	31,61	8,45	23,40
Subparcelas C.V (%)		13,21	17,68	10,41	10,71

**F significativo a 1 % de probabilidade; *F significativo a 5 % de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox
 Fonte: Elaboração do autor.

No segundo ano agrícola de cultivo o sistema de preparo sem escarificação apresentou a maior CTC (Tabela 15). Esta diferença teve uma influência direta do teor de Ca neste sistema de preparo (Tabela 13), tendo em vista que o teor de Ca compõe o cálculo da CTC.

Tabela 15 - Valores médios dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	H +Al (mmol _c dm ⁻³)		SB (mmol _c dm ⁻³)		CTC (mmol _c dm ⁻³)		V (%)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação								
Sem	21,35 a	29,30 a	66,55 a	62,36 a	87,90 a	91,66a	74,45 a	67,40 a
Com	20,25 a	34,90 a	64,05 a	46,29 a	84,30 a	81,19b	73,60 a	56,65 a
Plantas de cobertura								
Crotalaria	20,25 a	30,25 a	64,58 a	58,41 a	84,83 a	88,66 a	74,75 a	65,62 a
Guandu	20,12 a	34,00 a	68,31 a	51,37 a	88,43 a	85,37 a	74,62 a	59,37 a
Milheto	21,25 a	32,25 a	71,10 a	53,93 a	92,35 a	86,18 a	75,25 a	61,00 a
Pousio	22,65 a	30,87 a	72,96 a	54,05 a	95,58 a	84,92 a	76,25 a	62,62 a
Urochloa	19,75 a	33,12 a	49,53 a	53,86 a	69,28 a	86,98 a	69,25 a	61,50 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Apesar de nem sempre apresentarem diferenças significativas entre os sistemas de preparos é possível verificar, que os teores de P, Ca, Mg e K, sem a escarificação, sempre foram superiores aos escarificados. Este comportamento pode ser atribuído, devido ao fato, que em sistema de plantio direto, o acúmulo destes nutrientes ocorre de maneira natural, na camada superficial em função da decomposição e liberação desses nutrientes oriundos dos resíduos vegetais e o não revolvimento do solo os mantem nestas camadas (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Este comportamento se estende aos atributos CTC, SB e V, os quais possuem relação direta com os atributos supracitados.

6.4.2 Atributos químicos na camada 0,05 a 0,10 m

Nos dois anos de cultivos, os atributos químicos referentes aos teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca) e o de magnésio (Mg), analisados nesta camada, apenas o teor de P apresentou influencias dos tratamentos (Tabela 16).

Tabela 16 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada de 0,05 a 0,10 m							
F. V	GL	Quadrado médio					
		P	MOS	pH	K	Ca	Mg
ESC	1	0,004 ^{ns}	10,000 ^{ns}	0,182 ^{ns}	0,676 ^{ns}	1,690 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Bloco	3	60,458	2,466	0,052	1,948	2,402	0,0035
Erro (A)	3	10,609	5,400	0,021	1,006	1,158	0,0004
PC	4	1,302 ^{ns}	6,250 ^{ns}	0,191 ^{ns}	1,514 ^{ns}	1,804 ^{ns}	0,0043 ^{ns}
ESC x PC	4	11,434^{**}	1,000 ^{ns}	0,029 ^{ns}	1,888 ^{ns}	1,747 ^{ns}	0,0076 ^{ns}
Erro (B)	24	1,645	5,975	0,206	0,972	1,526	0,0066
Parcela C.V (%)		36,37 ⁽¹⁾	11,06	2,66	39,97	17,51 ⁽¹⁾	1,61 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		14,32 ⁽¹⁾	11,63	8,25	39,29	20,10 ⁽¹⁾	5,88 ⁽¹⁾

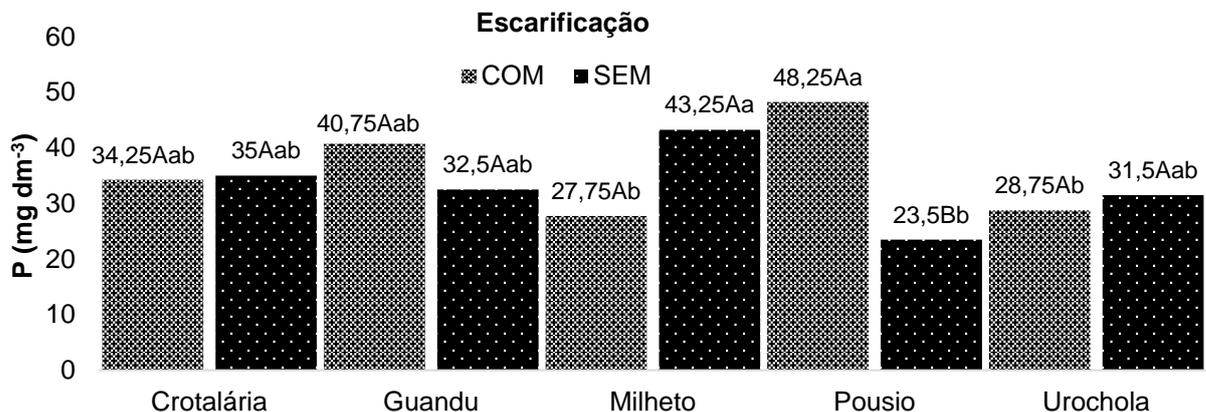
Ano agrícola (2015/16) - camada de 0,05 a 0,10 m							
ESC	1	0,179	4,900	0,132	2,304	1,069	6,581
Bloco	3	0,096	19,500	0,282	3,355	0,428	0,336
Erro (A)	3	0,231	14,033	0,434	1,664	2,612	9,080
PC	4	0,154	9,625	0,054	0,700	0,387	0,809
ESC x PC	4	0,165	2,525	0,059	0,572	0,395	1,101
Erro (B)	24	0,173	4,141	0,047	0,945	0,420	1,330
Parcela C.V (%)		13,25 ⁽¹⁾	19,46	13,14	56,09	31,78 ⁽¹⁾	44,20 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		11,46 ⁽¹⁾	10,57	4,34	42,27	12,75 ⁽¹⁾	16,92 ⁽¹⁾

^{**}F significativo a 1 % de probabilidade; ^{*}F significativo a 5 % de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

O teor de P nesta camada apresentou efeito somente no primeiro ano de cultivo, onde ocorreu a interação entre as fontes de variação (Figura 13). A sucessão em pousio com escarificação apresentou o maior teor de P, porém, diferenciando-se

Figura 13 - Desdobramento da interação do teor de fósforo (P) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, no ano agrícola 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância. apenas do milho e urochloa



Fonte: Elaboração do autor

Em contrapartida dos elevados teores de P (SOUSA; LOBATO, 2004), alcançados pela sucessão em pousio com escarificação, quando não escarificada este teor reduziu 51 %. O comportamento das sucessões sobre crotalária e guandu apresentaram as menores amplitudes de variação neste ano de cultivo. O segundo ano de cultivo agrícola, mesmo não apresentando diferenças significativas entre os tratamentos, houve um pequeno incremento de P em relação ao primeiro (Tabela 17) no entanto, este comportamento não ocorreu para MOS e pH. Esta tendência de redução no comportamento também foi verificada na maioria dos tratamentos nos atributos relacionados aos teores de K, Ca e Mg (Tabela 18).

Tabela 17 - Valores médios dos teores de fósforo (P) e matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	K (mmolc dm ⁻³)		Ca (mmolc dm ⁻³)		Mg (mmolc dm ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	2,38 a	2,54 a	25,90 a	21,75 a	17,55 a	17,30 a
Com	2,64 a	2,06 a	24,00 a	19,15 a	20,75 a	14,70 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	2,12 a	2,07 a	21,25 a	20,50 a	24,75 a	15,62 a
Guandu	2,77 a	2,76 a	25,50 a	21,37 a	17,75 a	16,25 a
Milheto	2,40 a	2,38 a	26,00 a	22,12 a	17,62 a	17,62 a
Pousio	3,12 a	2,02 a	30,37 a	20,50 a	21,00 a	15,25 a
Urochloa	2,12 a	2,25 a	21,62 a	17,75 a	14,00 a	15,25 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Tabela 18 - Valores médios dos teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	P (mg dm ⁻³)		MOS (g dm ⁻³)		pH	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	--	43,65 a	21,50 a	19,6 a	5,6 a	4,9 a
Com	--	38,50 a	20,50 a	18,6 a	5,4 a	5,1 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	--	40,00 a	20,00 a	19,75 a	5,3 a	5,1 a
Guandu	--	44,75 a	21,50 a	20,62 a	5,5 a	5,0 a
Milheto	--	45,25 a	20,75 a	19,62 a	5,6 a	5,0 a
Pousio	--	44,87 a	22,25 a	18,12 a	5,7 a	5,0 a
Urochloa	--	30,50 a	20,50 a	18,12 a	5,6 a	4,8 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Para estes atributos supracitados o K sem escarificação foi o único que apresentou incremento em seu teor nas sucessões sobre as plantas de cobertura e sistemas de preparo de solo.

Os atributos químicos acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), não apresentaram influências do sistema de preparo e das plantas de cobertura (Tabela 19).

Tabela 19 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), soma de base (SB), capacidade de trocas catiônicas (CTC) e saturação por base (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

<i>Ano agrícola (2014/15) - camada de 0,05 a 0,10 m</i>					
F. V	GL	Quadrado médio			
		H + Al	SB	CTC	V
ESC	1	5,625 ^{ns}	24,34 ^{ns}	53,36 ^{ns}	38,025 ^{ns}
Bloco	3	2,425	225,68	231,91	52,425
Erro (A)	3	3,158	37,03	49,57	3,758
PC	4	27,100 ^{ns}	266,09 ^{ns}	207,75 ^{ns}	117,838 ^{ns}
ESC x PC	4	3,250 ^{ns}	410,76 ^{ns}	407,90 ^{ns}	100,838 ^{ns}
Erro (B)	24	38,292	320,11	251,81	154,821
Parcela C.V.(%)		7,20	13,05	9,87	3,03
Subparcelas C.V (%)		25,07	38,38	22,26	19,51
<i>Ano agrícola (2015/16) - camada de 0,05 a 0,10 m</i>					
ESC	1	36,100 ^{ns}	0,200 ^{ns}	142,88 ^{ns}	225,62 ^{ns}
Bloco	3	47,800	0,039	73,08	61,29
Erro (A)	3	134,300	0,319	121,34	455,02
PC	4	10,088 ^{ns}	0,036 ^{ns}	65,41 ^{ns}	24,40 ^{ns}
ESC x PC	4	5,287 ^{ns}	0,047 ^{ns}	88,67 ^{ns}	38,00 ^{ns}
Erro (B)	24	11,821	0,057	54,10	56,45
Parcela C.V.(%)		33,68	15,54 ⁽¹⁾	15,05	40,84
Subparcelas C.V (%)		9,99	6,60 ⁽¹⁾	10,05	14,38

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

A acidez potencial aumentou em média nos tratamentos 28 % do primeiro para o segundo ano (Tabela 20). Os outros atributos nesta camada seguiram a tendência de redução no segundo ano.

Tabela 20 -Valores médios dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	H +Al (mmol _c dm ⁻³)		SB (mmol _c dm ⁻³)		CTC (mmol _c dm ⁻³)		V (%)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação								
Sem	24,30 a	33,45 a	45,83 a	41,59 a	70,13 a	75,04 a	64,75 a	54,60 a
Com	25,05 a	35,35 a	47,39 a	35,91 a	72,44 a	71,04 a	62,80 a	49,85 a
Plantas de cobertura								
Crotalária	27,00 a	32,87 a	48,12 a	38,20 a	75,12 a	71,07 a	62,00 a	53,37 a
Guandu	24,00 a	33,87 a	46,02 a	40,38 a	70,02 a	71,26 a	64,50 a	53,00 a
Milheto	23,12 a	35,50 a	46,02 a	42,13 a	69,15 a	77,63 a	65,37 a	53,75 a
Pousio	23,00 a	34,25 a	54,50 a	37,77 a	77,50 a	72,02 a	68,62 a	51,50 a
Urochloa	26,25 a	35,50 a	38,27 a	35,25 a	64,62 a	70,75 a	58,37 a	49,50 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

6.4.3 Atributos químicos na camada 0,10 a 0,20 m

Nos dois anos de cultivos, os atributos químicos referentes aos teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca) e o de magnésio (Mg), analisados nesta camada, apenas o teor de P apresentou influências dos tratamentos (Tabela 21).

Tabela 21 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fosforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

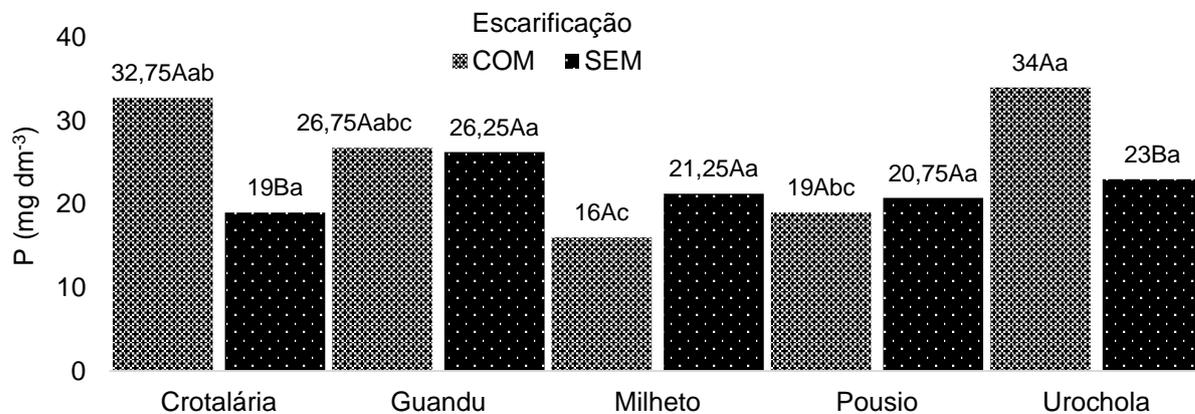
Ano agrícola (2014/15) - camada 0,10 a 0,20 m							
F. V	GL	Quadrado médio					
		P	MOS	pH	K	Ca	Mg
ESC	1	133,22 ^{ns}	2,500 ^{ns}	0,272 ^{ns}	0,0058 ^{ns}	0,000001 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Bloco	3	1570,89	7,466	0,009	0,3909	0,000337	0,0008
Erro (A)	3	23,62	5,166	0,204	0,0711	0,000746	0,0022
PC	4	151,69*	2,400 ^{ns}	0,069 ^{ns}	0,0600 ^{ns}	0,000203 ^{ns}	0,0001 ^{ns}
ESC x PC	4	137,16*	1,125 ^{ns}	0,016 ^{ns}	0,1243 ^{ns}	0,000410 ^{ns}	0,0010 ^{ns}
Erro (B)	24	47,51	2,462	0,084	0,0837	0,000167	0,0005
Parcela C.V(%)		20,36	12,69	8,95	67,26 ⁽¹⁾	3,24 ⁽¹⁾	5,36 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		28,87	8,76	5,74	72,97 ⁽¹⁾	1,53 ⁽¹⁾	2,59 ⁽¹⁾
Ano agrícola (2015/16) - camada 0,10 a 0,20 m							
ESC	1	0,007 ^{ns}	0,225 ^{ns}	0,072 ^{ns}	1,444 ^{ns}	1,069 ^{ns}	1,04 ^{ns}
Bloco	3	0,253	18,025	0,229	1,964	4,447	2,21
Erro (A)	3	0,905	6,425	0,293	0,330	9,121	11,68
PC	4	0,445 ^{ns}	2,025 ^{ns}	0,039 ^{ns}	0,337 ^{ns}	1,024 ^{ns}	0,79 ^{ns}
ESC x PC	4	0,011 ^{ns}	0,225 ^{ns}	0,060 ^{ns}	0,450 ^{ns}	2,627 ^{ns}	1,94 ^{ns}
Erro (B)	24	0,169	1,808	0,033	0,408	1,135	0,72
Parcela C.V(%)		31,95 ⁽¹⁾	15,155	11,52	36,94	47,14 ⁽¹⁾	56,53 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		13,81 ⁽¹⁾	8,040	3,90	41,09	16,63 ⁽¹⁾	14,11 ⁽¹⁾

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

O teor de P nesta camada apresentou efeito somente no primeiro ano de cultivo, onde ocorreu a interação entre os tratamentos (Figura 14). A sucessão sobre a Urochloa com escarificação apresentou o maior teor de P, seguido pela crotalária com escarificação. A não escarificação do solo com relação ao teor de P apresentou diferenças entre as plantas de cobertura neste ano agrícola.

Figura 14 - Desdobramento da interação do teor de fósforo (P) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de Plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, safra 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.



Fonte: Elaboração do autor

Os atributos MOS, pH, K, Ca e Mg seguiram o comportamento de redução das camadas superiores de até 10 % (Tabela 22 e Tabela 23).

Tabela 22 - Valores médios dos atributos químicos do solo, teor de fósforo (P) e de matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	P (mg dm ⁻³)		MOS (g dm ⁻³)		pH	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	--	22,35 a	18,15 a	16,80 a	5,1 a	4,75 a
Com	--	21,55 a	17,65 a	16,65 a	5,0 a	4,6 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	--	24,25 a	17,12 a	17,00 a	4,9 a	4,8 a
Guandu	--	25,87 a	18,62 a	17,00 a	5,0 a	4,7 a
Milheto	--	22,75 a	17,87 a	17,25 a	5,2 a	4,7 a
Pousio	--	22,12 a	18,12 a	16,25 a	5,1 a	4,7 a
Urochloa	--	14,75 a	17,75 a	16,12 a	5,0 a	4,6 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Tabela 23 - Valores médios dos teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	K (mmol _c dm ⁻³)		Ca (mmol _c dm ⁻³)		Mg (mmol _c dm ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	1,95 a	1,74 a	19,6 a	13,60 a	14,80 a	11,45 a
Com	1,91 a	1,36 a	21,9 a	12,75 a	16,85 a	10,75 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	1,78 a	1,46 a	17,62 a	14,25 a	13,12 a	11,87 a
Guandu	2,26 a	1,81 a	16,75 a	13,62 a	21,87 a	11,62 a
Milheto	1,61 a	1,73 a	18,50 a	13,25 a	14,37 a	11,00 a
Pousio	2,08 a	1,38 a	21,87 a	12,87 a	16,25 a	10,62 a
Urochloa	1,91 a	1,37 a	29,00 a	11,87 a	13,25 a	10,37 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

De maneira geral, observou-se que os teores de P do solo obtidos até esta terceira camada são considerados adequados à alto e médio a adequado para culturas anuais irrigadas (21 – 35 > e 15 - 35 mg dm⁻³), respectivamente, as duas primeiras e terceira (SOUSA; LOBATO, 2004). Segundo Muzilli (1983), em sistemas plantio direto, os fertilizantes são depositados na superfície do solo durante a adubação de semeadura, o P tende a se acumular perto da superfície do solo, devido a não incorporação mecânica ao longo do tempo. Esta afirmação corrobora com o comportamento do P nas camadas superiores supracitados, pois a movimentação do P no perfil do solo é muito limitada (FRANCHINI; PAVAN; MIYAZAWA, 2004).

Os atributos químicos acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), não apresentaram influências do sistema de preparo e das plantas de cobertura (Tabela 24 e Tabela 25).

Tabela 24 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada 0,10 a 0,20 m					
F. V	GL	Quadrado médio			
		H +Al	SB	CTC	V
ESC	1	46,225 ^{ns}	0,000009 ^{ns}	0 ^{ns}	0,0001 ^{ns}
Bloco	3	15,558	0,000035	0	0,0048
Erro (A)	3	28,092	0,000164	0	0,1910
PC	4	22,163 ^{ns}	0,000048 ^{ns}	0 ^{ns}	0,0464 ^{ns}
ESC x PC	4	25,163 ^{ns}	0,000085 ^{ns}	0 ^{ns}	0,0598 ^{ns}
Erro (B)	24	28,262	0,000044	0	0,0495
Parcela C.V.(%)		20,80	36,98 ⁽¹⁾	0,001 ⁽¹⁾	11,05 ⁽¹⁾
Subparcelas C.V (%)		17,91	11,83 ⁽¹⁾	0,001 ⁽¹⁾	5,62 ⁽¹⁾
Ano agrícola (2015/16) – camada 0,10 a 0,20 m					
ESC	1	67,600 ^{ns}	1,188 ^{ns}	4,48 ^{ns}	96,10 ^{ns}
Bloco	3	63,800	3,128	85,23	163,53
Erro (A)	3	97,933	8,206	91,94	377,63
PC	4	25,788 ^{ns}	0,808 ^{ns}	14,96 ^{ns}	51,95 ^{ns}
ESC x PC	4	14,037 ^{ns}	1,875 ^{ns}	35,35 ^{ns}	70,35 ^{ns}
Erro (B)	24	13,596	0,839	19,24	35,65
Parcela C.V.(%)		26,18	36,98 ⁽¹⁾	15,06	48,22
Subparcelas C.V (%)		9,75	11,83 ⁽¹⁾	6,89	14,81

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

O atributo químico SB foi o que apresentou a maior redução, entorno de 47 %, quando o solo foi cultivado sobre a sucessão de Urochloa

Tabela 25 - Valores médios dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	H +Al (mmol _c dm ⁻³)		SB (mmol _c dm ⁻³)		CTC (mmol _c dm ⁻³)		V (%)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação								
Sem	28,60 a	36,10 a	31,35 a	26,79 a	64,95 a	63,29 a	53,25 a	41,85 a
Com	30,75 a	39,1 a	39,90 a	24,86 a	69,39 a	63,96 a	54,00 a	38,75 a
Plantas de cobertura								
Crotalaria	31,75 a	36,12 a	32,53 a	27,58 a	64,28 a	63,71 a	47,50 a	43,37 a
Guandu	30,50 a	37,00 a	39,48 a	27,06 a	66,83 a	64,06 a	56,87 a	41,87 a
Milheto	28,37 a	39,12 a	34,48 a	25,98 a	62,86 a	65,11 a	53,00 a	39,62 a
Pousio	27,62 a	36,50 a	27,46 a	24,88 a	67,58 a	61,38 a	54,37 a	40,00 a
Urochloa	30,12 a	40,25 a	44,16 a	23,62 a	74,28 a	63,87 a	56,37 a	36,62 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

6.4.4 Atributos químicos na camada 0,20 a 0,40 m

Somente houve influência dos sistemas de manejo no teor de P, na camada de 0,20 a 0,40 m (Tabela 26). Comportamento mencionado nas camadas de solo anteriores.

Tabela 26 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, teores de fósforo (P), matéria orgânica do solo (MOS), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

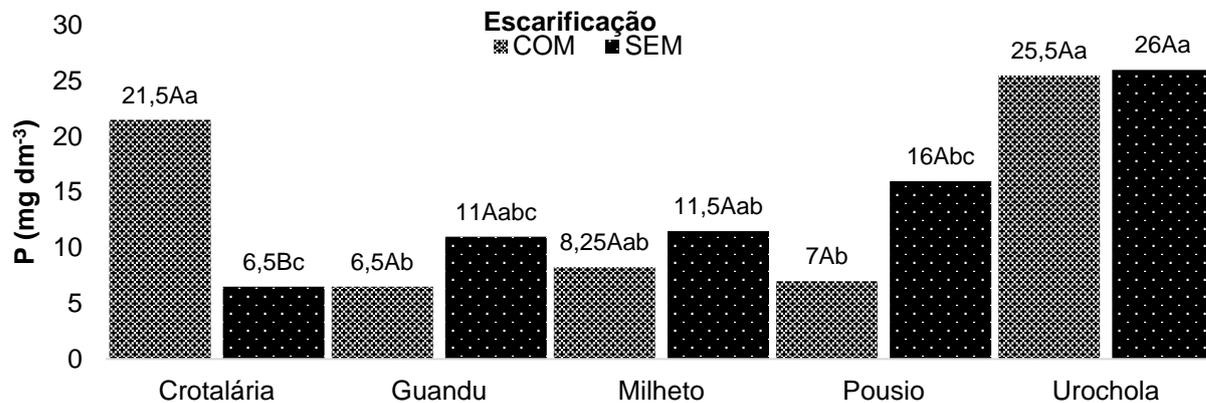
<i>Ano agrícola (2014/15) - camada 0,20 a 0,40 m</i>							
F. V	GL	Quadrado médio					
		P	MOS	pH	K	Ca	Mg
ESC	1	0,011 ^{ns}	2,025 ^{ns}	0,056 ^{ns}	0,000 ^{ns}	46,230 ^{ns}	16,900 ^{ns}
Bloco	3	0,232	22,291	0,058	6,827	416,820	113,433
Erro (A)	3	0,013	0,825	0,178	0,580	33,830	8,633
PC	4	0,053**	4,225 ^{ns}	0,034 ^{ns}	1,263 ^{ns}	62,850 ^{ns}	29,350 ^{ns}
ESC x PC	4	0,039**	4,650 ^{ns}	0,025 ^{ns}	0,650 ^{ns}	40,230 ^{ns}	17,025 ^{ns}
Erro (B)	24	0,007	5,037	0,089	0,711	39,050	13,971
Parcela C.V(%)		9,65 ⁽¹⁾	5,61	8,18	51,31	38,32	25,66
Subparcelas C.V (%)		6,84 ⁽¹⁾	13,87	5,80	56,79	41,18	32,64
<i>Ano agrícola (2015/16) - camada 0,20 a 0,40 m</i>							
ESC	1	0,148 ^{ns}	0,100 ^{ns}	0,006 ^{ns}	0,380 ^{ns}	8,100 ^{ns}	3,025 ^{ns}
Bloco	3	0,316	7,133	0,141	0,727	6,066	0,958
Erro (A)	3	1,183	2,700	0,057	0,114	17,100	19,958
PC	4	0,205 ^{ns}	1,650 ^{ns}	0,017 ^{ns}	0,039 ^{ns}	2,462 ^{ns}	0,775 ^{ns}
ESC x PC	4	0,078 ^{ns}	1,600 ^{ns}	0,016 ^{ns}	0,084 ^{ns}	1,037 ^{ns}	0,150 ^{ns}
Erro (B)	24	0,438	1,208	0,019	0,206	4,33	1,645
Parcela C.V (%)		53,67 ⁽¹⁾	11,02	5,05	31,60	39,01	48,42
Subparcelas C.V (%)		32,69 ⁽¹⁾	7,377	2,91	42,36	19,63f	13,90

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

O comportamento do teor de P nesta camada apresentou efeito somente no primeiro ano de cultivo, onde ocorreu a interação entre os tratamentos (Tabela 26). A sucessão sobre a *Urochloa* foi a que apresentou as maiores médias independente do preparo do solo utilizado. Este comportamento do P nas camadas analisadas corroboram com os reportados por Nascimento (2015).

Figura 15 - Desdobramento da interação do teor de fósforo (P) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, no ano agrícola de 2014/15. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância.



Fonte: Elaboração do autor

Os teores de P no segundo ano apresentou maiores valores em relação ao primeiro ano (Tabela 27).

Tabela 27 - Valores médios dos atributos químicos do solo, teor de fósforo (P) e de matéria orgânica do solo (MOS) e potencial hidrogeniônico (pH), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	P (mg dm ⁻³)		MOS (g dm ⁻³)		pH	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	--	9,25 a	16,40 a	14,95 a	5,2 a	4,76 a
Com	--	9,25 a	15,95 a	14,85 a	5,1 a	4,73 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	--	9,75 a	15,50 a	14,75 a	5,1 a	4,8 a
Guandu	--	11,00 a	15,50 a	15,37 a	5,1 a	4,7 a
Milheto	--	6,75 a	16,37 a	15,37 a	5,2 a	4,7 a
Pousio	--	10,25 a	16,25 a	14,37 a	5,2 a	4,7 a
Urochloa	--	8,50 a	17,25 a	14,62 a	5,2 a	4,6 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Em todas as camadas a sucessão sobre Urochloa apresentou valores expressivos em relação ao teor de P no solo (Tabela 27). Segundo Richardson et al. (2009), algumas espécies vegetais apresentam diversos mecanismos para otimizar o acesso ao P do solo, como: a presença de um sistema radicular com maior área de superfície de contato com o solo; alta capacidade de absorção de P por unidade de comprimento da raiz; acidificação da rizosfera; habilidade de acessar formas solúveis

e insolúveis de P, e alta afinidade com micorrizas arbusculares. Muitas destas características supracitadas são encontradas na *Urochloa* o que justificaria este comportamento ao longo das camadas.

Os atributos pH e MOS apresentaram novamente a tendência de redução já apresentada a eles nas camadas anteriores. Na Tabela 28 é possível notar que este comportamento na redução dos atributos de um ano para o outro chegou a atingir 50 % na sucessão com *Urochloa* nos teores de K e Ca.

Tabela 28 - Valores médios dos teores de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	K (mmol _c dm ⁻³)		Ca (mmol _c dm ⁻³)		Mg (mmol _c dm ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	1,48 a	1,17 a	16,25 a	11,05 a	12,10 a	9,50 a
Com	1,48 a	0,97 a	14,10 a	10,15 a	10,80 a	8,95 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	1,18 a	1,01 a	13,25 a	11,00 a	10,37 a	9,50 a
Guandu	1,52 a	1,16 a	14,00 a	11,12 a	10,00 a	9,50 a
Milheto	1,15 a	1,12 a	14,50 a	10,87 a	11,87 a	9,25 a
Pousio	1,42 a	1,00 a	14,00 a	10,00 a	10,37 a	9,12 a
<i>Urochloa</i>	2,13 a	1,06 a	20,12 a	10,00 a	14,62 a	8,75 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Os atributos químicos acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), não apresentaram nenhuma influência do sistema de preparo e das plantas de cobertura (Tabela 29 e Tabela 30).

Tabela 29 - Resumo da análise de variância dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada 0,20 a 0,40 m					
F.V	GL	Quadrado médio			
		H +Al	SB	CTC	V
ESC	1	5,625 ^{ns}	119,03 ^{ns}	176,40 ^{ns}	27,23 ^{ns}
Bloco	3	15,225	1130,08	1320,49	425,02
Erro (A)	3	68,825	75,24	146,44	122,83
PC	4	3,788 ^{ns}	200,56 ^{ns}	190,69 ^{ns}	116,91 ^{ns}
ESC x PC	4	5,062 ^{ns}	122,62 ^{ns}	151,39 ^{ns}	40,91 ^{ns}
Erro (B)	24	19,192	111,37	105,36	99,86
Parcela C.V.(%)		33,41	30,85	22,86	21,76
Subparcelas C.V (%)		17,64	37,54	19,39	19,62
Ano agrícola (2015/16) - camada 0,20 a 0,40 m					
ESC	1	17,822 ^{ns}	5,57 ^{ns}	0,961 ^{ns}	82,08 ^{ns}
Bloco	3	38,019	3,29	30,87	53,60
Erro (A)	3	26,436	14,40	92,66	115,19
PC	4	20,817 ^{ns}	1,11 ^{ns}	10,78 ^{ns}	23,22 ^{ns}
ESC x PC	4	6,385 ^{ns}	0,35 ^{ns}	8,69 ^{ns}	5,53 ^{ns}
Erro (B)	24	9,388	2,50	27,34	16,28
Parcela C.V.(%)		14,80	33,77 ⁽¹⁾	17,30	28,72
Subparcelas C.V (%)		8,82	14,09 ⁽¹⁾	9,40	10,79

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 30 - Valores médio dos atributos químicos do solo, acidez potencial (H +Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	H +Al (mmolc dm ⁻³)		SB (mmolc dm ⁻³)		CTC (mmolc dm ⁻³)		V (%)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação								
Sem	25,30 a	34,05 a	29,83 a	21,72 a	55,03 a	55,77 a	51,75 a	38,80 a
Com	24,45 a	35,38 a	26,38 a	20,07 a	50,83 a	55,46 a	50,10 a	35,93 a
Plantas de cobertura								
Crotalaria	25,50 a	33,37 a	24,81 a	21,51 a	50,31 a	54,88 a	47,50 a	38,75 a
Guandu	25,50 a	34,87 a	25,53 a	21,78 a	51,02 a	56,66 a	48,37 a	37,75 a
Milheto	24,62 a	33,25 a	27,52 a	21,25 a	52,15 a	54,50 a	51,75 a	38,87 a
Pousio	23,87 a	34,83 a	25,80 a	20,12 a	49,67 a	54,96 a	49,87 a	36,71 a
Urochloa	24,62 a	37,25 a	36,88 a	19,81 a	61,51 a	57,06 a	57,12 a	34,75 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Com esta condição natural de fertilidade, o estabelecimento de atividades agrícolas no Cerrado, requer a introdução de práticas agrícolas como as utilizadas nas demais áreas deste estudo que visem estabelecer padrões satisfatórios de fertilidade do solo. Nas áreas de plantio direto verificou-se que o teor de matéria

orgânica do solo (MOS) no SPD sem escarificação apresentou valores numéricos, em sua maioria, superior aos escarificados, apesar de não ter apresentado diferença estatística. Esta situação evidencia que a escarificação influenciou na oxidação da MOS, oriunda das coberturas vegetais testadas. Segundo Araujo et al. (2004), os SPD apresentam um ambiente menos oxidativo em relação a escarificação.

6.5 Atributos físicos do solo

6.5.1 Atributos físicos do solo na camada 0,00 a 0,05 m

Para os dois anos de cultivos, os atributos físicos referentes a macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), analisados nesta camada, apenas a RP no segundo ano de cultivo apresentou influências ($p < 0,05$) dos tratamentos (Tabela 31). No primeiro ano de cultivo nenhuma intervenção realizada apresentou diferença significativa sobre os atributos físicos dos solos, comportamento diferente do encontrado por Nascimento (2015), que verificou diferenças significativas para todos os atributos estudados em função da escarificação e do uso de plantas de cobertura.

Tabela 31- Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada de 0,00 a 0,05 m							
F. V	GL	Quadrado médio					
		Mac	Mic	PT	DS	RP	U
ESC	1	0,0229 ^{ns}	0,0038 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0056 ^{ns}	0,0032 ^{ns}	0,000007 ^{ns}
Bloco	3	0,0400	0,0007	0,0011	0,0058	0,4558	0,000063
Erro (A)	3	0,3690	0,0002	0,0002	0,0048	0,7151	0,000771
PC	4	0,0192 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0049 ^{ns}	1,5908 ^{ns}	0,000209 ^{ns}
ESC x PC	4	0,0187 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0044 ^{ns}	0,7765 ^{ns}	0,000470 ^{ns}
Erro (B)	24	0,0227	0,0003	0,0007	0,0046	1,5280	0,000259
Parcela C.V(%)		12,64 ⁽¹⁾	15,16	3,85	4,70	41,39	20,59
Subparcelas C.V (%)		9,92 ⁽¹⁾	5,48	6,59	4,63	60,50	11,92
Ano agrícola (2015/16) - camada de 0,00 a 0,05 m							
ESC	1	0,0195 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,4347 ^{ns}	0,000112 ^{ns}
Bloco	3	0,0172	0,0039	0,0032	0,0137	0,2294	0,001008
Erro (A)	3	0,0966	0,0055	0,0043	0,0115	0,1407	0,003363
PC	4	0,0397 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0013 ^{ns}	0,0034 ^{ns}	0,2058 ^{ns}	0,000757 ^{ns}
ESC x PC	4	0,1959 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0050 ^{ns}	1,1453*	0,001161 ^{ns}
Erro (B)	24	0,3050	0,0011	0,0004	0,0055	0,3237	0,000714
Parcela C.V(%)		18,42 ⁽¹⁾	19,42	14,40	7,40	24,21	29,91
Subparcelas C.V (%)		10,35 ⁽¹⁾	8,81	4,61	5,14	36,73	13,78

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

Os valores médios dos atributos físicos referentes aos espaços porosos estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	Mac (m ³ m ⁻³)		Mic (m ³ m ⁻³)		PT (m ³ m ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	0,08 a	0,07 a	0,35 a	0,38 a	0,42 a	0,46 a
Com	0,10 a	0,08 a	0,33 a	0,39a	0,43 a	0,46 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	0,10 a	0,09 a	0,34 a	0,38 a	0,41 a	0,47 a
Guandu	0,07 a	0,06 a	0,35 a	0,39a	0,42 a	0,44 a
Milheto	0,09 a	0,07 a	0,34 a	0,40a	0,43 a	0,47 a
Pousio	0,10 a	0,08 a	0,33 a	0,37 a	0,43 a	0,46 a
Urochloa	0,09 a	0,06 a	0,34 a	0,39 a	0,43 a	0,45 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

O efeito não significativo ($p < 0,05$) das práticas de manejo utilizadas sobre os atributos físicos Mac, Mic e PT, também foi observado em outras pesquisas, com objetivos similares (BORGES et al., 2016; CAMARA; KLEIN, 2005).

Ainda mesmo sem apresentar diferenças significativas, a escarificação no primeiro ano agrícola apresentou Mac com valor igual ao limite crítico (0,10 m³ m⁻³) ao contrário do manejo sem escarificação que apresentou um valor inferior (Tabela 32). Assim valores inferiores a este, podem oferecer limitações ao desenvolvimento radicular das plantas (FERREIRA, 2010; GLIŃSKI; LIPIEC, 1990). No entanto, este efeito não persistiu para o ano subsequente.

Quanto as plantas de cobertura, mesmos sem exibirem diferenças significativas entre os tratamentos, algumas sucessões se destacaram, como a crotalária e o pousio que apresentaram uma Mac igual ao limite crítico (Tabela 32). Porém, este efeito não persistiu para o segundo ano agrícola. Os valores não inferiores ao limite crítico da Mac na sucessão sobre crotalária, também foi observado por Nascimento (2015) em anos anteriores.

Todas as práticas de manejo, independente do ano de cultivo, apresentaram valores de PT abaixo de 0,50 m³ m⁻³ que é considerado um valor ideal (AZEVEDO; DALMOLIN, 2006; REICHARDT; TIMM, 2004), porém, estes valores de PT no segundo ano agrícola, apresentaram ligeira melhoria em relação a condição original do solo e ao primeiro ano. Assim como para o atributo Mac a sucessão sobre crotalária

se destacou na PT, apesar de apresentar valor inferior ao ideal, esta sucessão foi a que exibiu condições mais próximas ao valor das condições naturais do solo.

A contribuição da escarificação sobre o atributo PT foi não significativo em relação ao SPD não escarificado no primeiro ano agrícola após a escarificação (Tabela 32). Estes resultados não corroboram com outras pesquisas que afirmam que esta prática apresenta diferença significativa sobre o atributo PT (KLEIN et al., 2008; NASCIMENTO, 2015).

Os valores médios dos atributos densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U) estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33- Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência à penetração do solo (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	DS (Mg m ⁻³)		RP (MPa)		U (kg kg ⁻¹)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	1,48 a	1,45 a	2,05 a	--	0,13 a	0,19 a
Com	1,46 a	1,45 a	2,03 a	--	0,14 a	0,19 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	1,46 a	1,43 a	1,92 a	--	0,14 a	0,20 a
Guandu	1,49 a	1,46 a	1,53 a	--	0,14 a	0,19 a
Milheto	1,46 a	1,43 a	2,17 a	--	0,14 a	0,18 a
Pousio	1,44 a	1,47 a	2,72 a	--	0,14 a	0,18 a
Urochloa	1,51 a	1,46 a	1,85 a	--	0,13 a	0,19 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

A DS foi outro atributo que não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, porém, apresentou uma redução numérica em relação a condição inicial. No segundo ano agrícola tanto o SPD com escarificação quanto o sem mantiveram a redução e, apresentaram o mesmo valor para este atributo, porém, a redução mais marcante de um ano para o outro ocorreu no SPD sem escarificação, esta redução pode ser atribuída ao efeito dos sistemas radiculares que atuaram em ambos os sistemas de preparo, desempenhando um papel como promotor de descompactação (SANTOS et al., 2014a).

As plantas de cobertura que proporcionaram os maiores aumentos do volume de poros e conseqüentemente as menores densidades do solo foram as sucessões sobre a crotalária e o milheto, ambas influenciaram a densidade do solo no segundo ano de

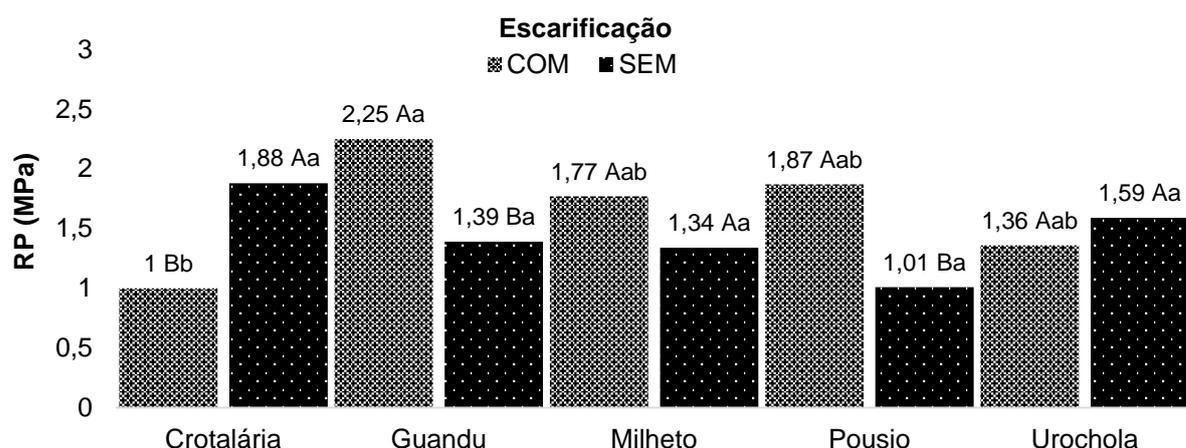
cultivo ($1,46 \text{ Mg m}^{-3}$). O limite crítico da densidade do solo para o desenvolvimento do sistema radicular, pode depender do tipo de solo e de sua classe textura (REINERT et al., 2008), e normalmente para Latossolo Vermelho, esta limitação está próxima de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ (ARGENTON et al., 2005).

A umidade do solo não apresentou diferença significativa sobre a interferência da escarificação nem sobre as plantas de cobertura. No entanto, Seki et al. (2015) ao avaliar o efeito da escarificação nos atributos físicos do solo, verificou que o SPD sem escarificação apresentou o maior teor de água no solo.

No primeiro ano agrícola a RP, os sistemas de preparo do solo apresentaram valores superiores ao limite crítico, assim como nas sucessões com milho e em pousio. Valores de RP acima de 2MPa são considerados críticos para este indicador de qualidade do solo, pois interfere no desenvolvimento radicular (COLLARES et al., 2006; REICHERT et al., 2009b).

No segundo ano agrícola, as práticas de manejo adotadas apresentaram interação entre si para a RP (Figura 16) e ainda apresentaram valores inferiores ao outro ano agrícola (Tabela 33).

Figura 16 -Desdobramento da interação resistência do solo à penetração (RP) após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,00 a 0,05 m, no agrícola de 2015/16. Médias seguidas de mesma letra minúscula, para PC dentro de ESC, e maiúscula, para ESC dentro da PC, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de significância



Fonte: Elaboração do autor

Neste ano agrícola, a escarificação do SPD apresentou uma RP média de 1,65 MPa e no tratamento sem escarificação este valor ficou em 1,44 MPa. O comportamento das plantas de cobertura sobre a RP indica que a crotalária e o pousio como sendo as sucessões, que mais contribuíram para a redução deste atributo,

ambas apresentaram valores médios de 1,44 MPa. No entanto as práticas de manejo adotadas não apresentaram um comportamento similar ao descrito por Borges et al. (2016) em que afirmam que o aumento da Mac contribui para a redução da RP, pois neste ano agrícolas a Mac (Tabela 32) apresentou valores a baixo do limite crítico e mesmo assim a RP apresentou valores dentro do limite crítico (2 MPa).

6.5.2 Atributos físicos do solo na camada 0,05 a 0,10 m

Nos dois anos de cultivos nenhum dos atributos físicos referentes macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U) apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) (Tabela 34). Comportamento diferente de (NASCIMENTO, 2015), que encontrou diferenças significativas para esses atributos supracitados nessa mesma camada de solo.

Tabela 34 - Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

<i>Ano agrícola (2014/15) - camada de 0,05 a 0,10 m</i>							
F. V	GL	Quadrado médio					
		Mac	Mic	PT	DS	RP	UG
ESC	1	0,0043 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	11,3977 ^{ns}	0,00014 ^{ns}
Bloco	3	0,1031	0,0018	0,0033	0,0295	0,1826	0,00013
Erro (A)	3	0,0073	0,0010	0,0007	0,0049	2,7409	0,00063
PC	4	0,0110 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0019 ^{ns}	0,2522 ^{ns}	0,00009 ^{ns}
ESC x PC	4	0,0070 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0015 ^{ns}	2,4973 ^{ns}	0,00060 ^{ns}
Erro (B)	24	0,0116	0,0002	0,0003	0,0029	1,1631	0,00011
Parcela C.V.(%)		5,46 ⁽¹⁾	9,64	6,61	4,54	35,92	17,64
Subparcelas C.V. (%)		6,86 ⁽¹⁾	4,43	4,48	3,51	23,40	7,51
<i>Ano agrícola (2015/16) - camada de 0,05 a 0,10 m</i>							
ESC	1	0,0202 ^{ns}	0,00005 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0081 ^{ns}	0,4277 ^{ns}	0,00033 ^{ns}
Bloco	3	0,0276	0,00192	0,0005	0,0022	0,3572	0,00051
Erro (A)	3	0,0758	0,00193	0,0007	0,0063	0,2247	0,00116
PC	4	0,0057 ^{ns}	0,00027 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,6103 ^{ns}	0,00047 ^{ns}
ESC x PC	4	0,0192 ^{ns}	0,00007 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0024 ^{ns}	0,1335 ^{ns}	0,00101 ^{ns}
Erro (B)	24	0,0142	0,00057	0,0001	0,0018	0,3953	0,00047
Parcela C.V.(%)		17,50 ⁽¹⁾	11,77	6,47	5,14	18,77	17,49
Subparcelas C.V. (%)		7,85 ⁽¹⁾	6,38	3,27	2,79	24,90	11,13

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

Os valores médios dos atributos físicos referente aos espaços porosos estão representados pela Tabela 35.

Tabela 35 - Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (Total), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	Mac ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		Mic ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		PT ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	0,07 a	0,05 a	0,35 a	0,38 a	0,42 a	0,43 a
Com	0,08 a	0,06 a	0,33 a	0,37 a	0,41 a	0,43 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	0,08 a	0,06 a	0,34 a	0,37 a	0,43 a	0,43 a
Guandu	0,07 a	0,05 a	0,35 a	0,38 a	0,41 a	0,43 a
Milheto	0,06 a	0,06 a	0,34 a	0,38 a	0,41 a	0,44 a
Pousio	0,08 a	0,06 a	0,33 a	0,36 a	0,42 a	0,43 a
Urochloa	0,08 a	0,06 a	0,34 a	0,38 a	0,41 a	0,43 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Diferente do que ocorreu na camada superior nenhum tratamento apresentou Mac acima do limite crítico $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (FERREIRA, 2010; GLIŃSKI; LIPIEC, 1990). O mesmo ocorreu com a PT, cujos valores foram inferiores ao ideal de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (AZEVEDO; DALMOLIN, 2006; REICHARDT; TIMM, 2004). Como consequências a redução dos espaços porosos aumenta a DS e a RP (STEFANOSKI et al., 2013). Os valores médios desses atributos estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência à penetração do solo (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,05 a 0,10 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	DS (Mg m^{-3})		RP (MPa)		U (kg kg^{-1})	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	1,54 a	1,56 a	5,14 a	2,42 a	0,14 a	0,19 a
Com	1,53 a	1,53 a	4,07 a	2,62 a	0,14 a	0,19 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	1,51 a	1,56 a	4,60 a	2,21 a	0,15 a	0,19 a
Guandu	1,55 a	1,55 a	4,33 a	2,32 a	0,15 a	0,19 a
Milheto	1,54 a	1,56 a	4,80 a	2,89 a	0,14 a	0,19 a
Pousio	1,55 a	1,55 a	4,70 a	2,70 a	0,14 a	0,20 a
Urochloa	1,54 a	1,54 a	4,58 a	2,48 a	0,14 a	0,18 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Em todos os tratamentos a DS e a RP apresentaram valores superiores aos limites críticos, respectivamente $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ e $2,00 \text{ MPa}$ (ARGENTON et al., 2005; COLLARES et al., 2006; REICHERT et al., 2009b). Esta diferença nos atributos físicos do solo principalmente em relação a DS em profundidade é atribuída ao teor MOS, ao peso das camadas superiores e em alguns tipos de solo a eluviação das partículas na

fração argila (PÁDUA; GUERRA; ZINN, 2015). A RP no primeiro para o segundo ano apresentou uma redução média de 54,9 %, a qual poder ter sido induzida pela U, que altera a coesão da partículas do solo, assim oferecendo redução da RP (SILVEIRA et al., 2010). No primeiro ano a U variou 0,14 a 0,15 kg kg⁻¹ e no segundo ano 0,18 a 0,20 kg kg⁻¹.

De modo geral o efeito da escarificação sobre os atributos físicos de solos nesta camada superficial apresentou um comportamento efêmero, similar com os resultados apresentado por Drescher et al. (2011, 2016).

6.5.3 Atributos físicos do solo na camada de 0,10 a 0,20 m

Nos dois anos de cultivos, os atributos físicos referentes a macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), analisados nesta camada, apenas para a Mac no primeiro ano de cultivo houve influências ($p < 0,05$) dos tratamentos (Tabela 37).

Tabela 37 - Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada 0,10 a 0,20 m							
F. V	GL	Quadrado médio					
		Mac	Mic	PT	DS	RP	UG
ESC	1	0,00254*	0,0011 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	11,11 ^{ns}	0,00009 ^{ns}
Bloco	3	0,00376	0,0019	0,0008	0,0196	1,80	0,00009
Erro (A)	3	0,00008	0,0013	0,0016	0,0085	1,59	0,00021
PC	4	0,00047 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0011 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,00002 ^{ns}
ESC x PC	4	0,00050 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0029 ^{ns}	1,09 ^{ns}	0,00025 ^{ns}
Erro (B)	24	0,00057	0,0002	0,0002	0,0021	0,60	0,00018
Parcela C.V(%)		13,05	10,86	10,01	6,06	25,88	10,16
Subparcelas C.V (%)		33,25	4,58	4,19	3,05	15,96	9,28
Ano agrícola (2015/16) - camada 0,10 a 0,20 m							
ESC	1	0,4966 ^{ns}	0,000005 ^{ns}	0,0012 ^{ns}	0,0046 ^{ns}	0,1537 ^{ns}	0,00003 ^{ns}
Bloco	3	0,6923	0,003024	0,0008	0,0175	0,7293	0,00038
Erro (A)	3	1,6285	0,002843	0,0048	0,0198	0,4348	0,00113
PC	4	0,1176 ^{ns}	0,000401 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,1873 ^{ns}	0,00067 ^{ns}
ESC x PC	4	0,3188 ^{ns}	0,000453 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0016 ^{ns}	0,4294 ^{ns}	0,00103 ^{ns}
Erro (B)	24	0,2568	0,000884	0,0003	0,0021	0,3496	0,00040
Parcela C.V(%)		44,19 ⁽¹⁾	16,58	15,88	9,31	17,69	17,67
Subparcelas C.V (%)		17,55 ⁽¹⁾	7,95	4,37	3,04	15,86	10,52

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5 % de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

Os valores médios dos atributos físicos referentes aos espaços porosos estão representados na Tabela 38.

Tabela 38 - Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	Mac (m ³ m ⁻³)		Mic (m ³ m ⁻³)		PT (m ³ m ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	0,06 b	0,06 a	0,35 a	0,37 a	0,41 a	0,43 a
Com	0,08 a	0,07 a	0,34 a	0,37 a	0,41 a	0,45 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	0,06 a	0,08 a	0,34 a	0,36 a	0,41 a	0,44 a
Guandu	0,07 a	0,07 a	0,34 a	0,37 a	0,41 a	0,44 a
Milheto	0,06 a	0,06 a	0,34 a	0,38 a	0,40 a	0,45 a
Pousio	0,08 a	0,06 a	0,35 a	0,37 a	0,42 a	0,44 a
Urochloa	0,08 a	0,07 a	0,34 a	0,38 a	0,42 a	0,44 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

No primeiro ano esta camada apresentou diferenças significativas entre os sistemas de preparo sobre a Mac, onde a escarificação propiciou maior valor para este atributo (Tabela 38). No entanto, o valor alcançado ficou abaixo do limite crítico deste atributo (FERREIRA, 2010; GLIŃSKI; LIPIEC, 1990). Entre as plantas de cobertura apenas a sucessão com crotalária apresentou um incremento na Mac de um ano para o outro, tendo uma variação de 0,06 m³ m⁻³ para 0,08 m³ m⁻³, estes valores foram similares aos reportados por (NASCIMENTO, 2015).

Quanto a PT, o segundo ano apresentou um incremento em todos fatores testados em relação ao primeiro ano e a condição inicial (Tabela 38). No entanto, nenhum dos tratamentos atingiram condição ideal de 0,50 m³ m⁻³ (AZEVEDO; DALMOLIN, 2006; REICHARDT; TIMM, 2004).

Os valores médios dos atributos densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U) estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência do solo a penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,10 a 0,20 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	DS (Mg m ⁻³)		RP (MPa)		U (kg kg ⁻¹)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	1,52 a	1,52 a	5,40 a	3,78 a	0,14 a	0,19 a
Com	1,53 a	1,50 a	4,35 a	3,66 a	0,15 a	0,18 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	1,52 a	1,50 a	5,06 a	3,91 a	0,14 a	0,19 a
Guandu	1,53 a	1,51 a	4,91 a	3,59 a	0,15 a	0,19 a
Milheto	1,53 a	1,52 a	4,58 a	3,77 a	0,15 a	0,19 a
Pousio	1,51 a	1,51 a	4,48 a	3,80 a	0,14 a	0,19 a
Urochloa	1,53 a	1,51 a	5,33 a	3,54 a	0,14 a	0,17 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Apesar de apresentar pequena redução na DS do primeiro ano para o segundo, mesmo assim os valores obtidos apresentaram-se superiores ao limite crítico (Tabela 39). O mesmo ocorreu com a RP, no entanto, esta redução pode ser atribuída ao aumento da U, que como já supracitado interfere consideravelmente neste atributo (SILVEIRA et al., 2010).

6.5.4 Atributos físicos do solo na camada 0,20 a 0,40 m

Os atributos físicos referentes a macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U) dos dois anos de cultivos, analisados nesta camada, apenas Mic no primeiro ano de cultivo apresentou diferenças entre os tratamentos (Tabela 40). No segundo ano de cultivo nenhuma intervenção realizada apresentou diferenças significativas sobre os atributos físicos dos solos, comportamento diferente do encontrado por Nascimento (2015), que verificou diferenças significativas para todos os atributos estudados em função das intervenções utilizadas.

Tabela 40- Resumo da análise de variância dos atributos físicos, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

Ano agrícola (2014/15) - camada 0,20 a 0,40 m							
F. V	GL	Quadrado médio					
		Mac	Mic	PT	DS	RP	U
ESC	1	0,000008 ^{ns}	0,0036 ^{ns}	0,0028 ^{ns}	0,0164 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,00034 ^{ns}
Bloco	3	0,007916	0,0017	0,0056	0,0618	0,0008	0,00026
Erro (A)	3	0,000337	0,0006	0,0016	0,0165	0,0012	0,00086
PC	4	0,001724 ^{ns}	0,0012*	0,0003 ^{ns}	0,0053 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,00034 ^{ns}
ESC x PC	4	0,000728 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0014 ^{ns}	0,0013 ^{ns}	0,00025 ^{ns}
Erro (B)	24	0,000825	0,0003	0,0005	0,0030	0,0004	0,00043
Parcela C.V.(%)		19,01	7,27	9,10	9,19	5,12 ⁽¹⁾	19,10
Subparcelas C.V (%)		29,76	5,46	5,11	3,97	3,08 ⁽¹⁾	13,56
Ano agrícola (2015/16) - camada 0,20 a 0,40 m							
ESC	1	0,1123 ^{ns}	0,0028 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0020 ^{ns}	0,7046 ^{ns}	0,0022 ^{ns}
Bloco	3	0,1157	0,0043	0,0044	0,0429	0,0638	0,0022
Erro (A)	3	0,2387	0,0041	0,0021	0,0079	0,2637	0,0027
PC	4	0,0169 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,3444 ^{ns}	0,0034 ^{ns}
ESC x PC	4	0,0772 ^{ns}	0,0014 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0052 ^{ns}	0,1563 ^{ns}	0,0041 ^{ns}
Erro (B)	24	0,0664	0,0012	0,0004	0,0018	0,1328	0,0030
Parcela C.V.(%)		26,42 ⁽¹⁾	16,60	9,94	6,41	15,21	25,59
Subparcelas C.V (%)		13,93 ⁽¹⁾	9,22	4,49	3,12	10,79	27,09

**F significativo a 1% de probabilidade; *F significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} significativo a 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ dados transformados pelo método Box-Cox

Fonte: Elaboração do autor.

Os valores médios dos atributos físicos referente aos espaços porosos estão representados na Tabela 41.

Tabela 41 - Valores médios dos atributos físicos do solo, macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	Mac (m ³ m ⁻³)		Mic (m ³ m ⁻³)		PT (m ³ m ⁻³)	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	0,10 a	0,08 a	0,36 a	0,39 a	0,41 a	0,47 a
Com	0,10 a	0,09 a	0,34 a	0,38 a	0,41 a	0,47 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	0,09 a	0,09 a	0,35ab	0,38 a	0,43 a	0,48 a
Guandu	0,09 a	0,07 a	0,36 a	0,39 a	0,41 a	0,46 a
Milheto	0,09 a	0,09 a	0,36 a	0,39 a	0,41 a	0,48 a
Pousio	0,12 a	0,09 a	0,33 b	0,38 a	0,42 a	0,47 a
Urochloa	0,11 a	0,08 a	0,34 ab	0,39 a	0,41 a	0,47 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e Plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

Antes da implantação do experimento esta camada já apresentava atributos da porosidade com valores dentro dos limites que interferem no desenvolvimento

radicular. Mesmo após a ação do preparo do solo os valores iniciais da Mac permaneceram inalterados. Nas sucessões sobre as plantas de cobertura apenas a Urochloa e o pousio apresentaram valores superiores ao limite crítico no primeiro ano, porém, o segundo ano agrícola os valores de Mac ficaram todos abaixo do limite crítico.

Com relação a Mic, este atributo apresentava valores acima do ideal, que é de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, assim, no primeiro ano agrícola a sucessão sobre o guandu e o milho mantiveram a Mic inicial, de modo a diferenciar ($p < 0,05$) das demais que exibiram valores inferiores a condição inicial. No segundo ano todos os tratamentos testados apresentaram valores superiores a condição inicial e a considerada ideal para um bom desenvolvimento das culturas.

De modo geral entre as plantas de cobertura vale destacar a contribuição da crotalaria sobre os atributos relacionados aos espaços porosos, que também ocorreu nas demais camadas superiores. Segundo Fologi; Lima e Büll (2006), a crotalaria possui a capacidade de desenvolver raízes de diâmetro reduzido capaz de penetrar em camadas mais compactadas.

Os valores médios dos atributos densidade do solo (DS), resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo a base de massa (U), para a camada de 0,20 a 0,40 m, estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 - Valores médios dos atributos físicos do solo, densidade do solo (DS), resistência à penetração do solo (RP) e umidade do solo a base de massa (U), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação (ESC) e de plantas de cobertura (PC), na camada de 0,20 a 0,40 m, nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.

	DS (Mg m^{-3})		RP (MPa)		U (kg kg^{-1})	
	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16	2014/15	2015/16
Escarificação						
Sem	1,37 a	1,38 a	4,67 a	3,50 a	0,15 a	0,21 a
Com	1,41 a	1,39 a	4,61 a	3,24 a	0,16 a	0,19 a
Plantas de cobertura						
Crotalaria	1,41 a	1,38 a	4,90 a	3,44 a	0,16 a	0,19 a
Guandu	1,42 a	1,39 a	4,21 a	3,21 a	0,15 a	0,23 a
Milheto	1,37 a	1,39 a	4,47 a	3,57 a	0,15 a	0,20 a
Pousio	1,40 a	1,37 a	4,64 a	3,54 a	0,15 a	0,19 a
Urochloa	1,37 a	1,39 a	4,99 a	3,10 a	0,16 a	0,18 a

Médias seguidas de mesma letra, para escarificação e plantas de cobertura, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

Fonte: Elaboração autor.

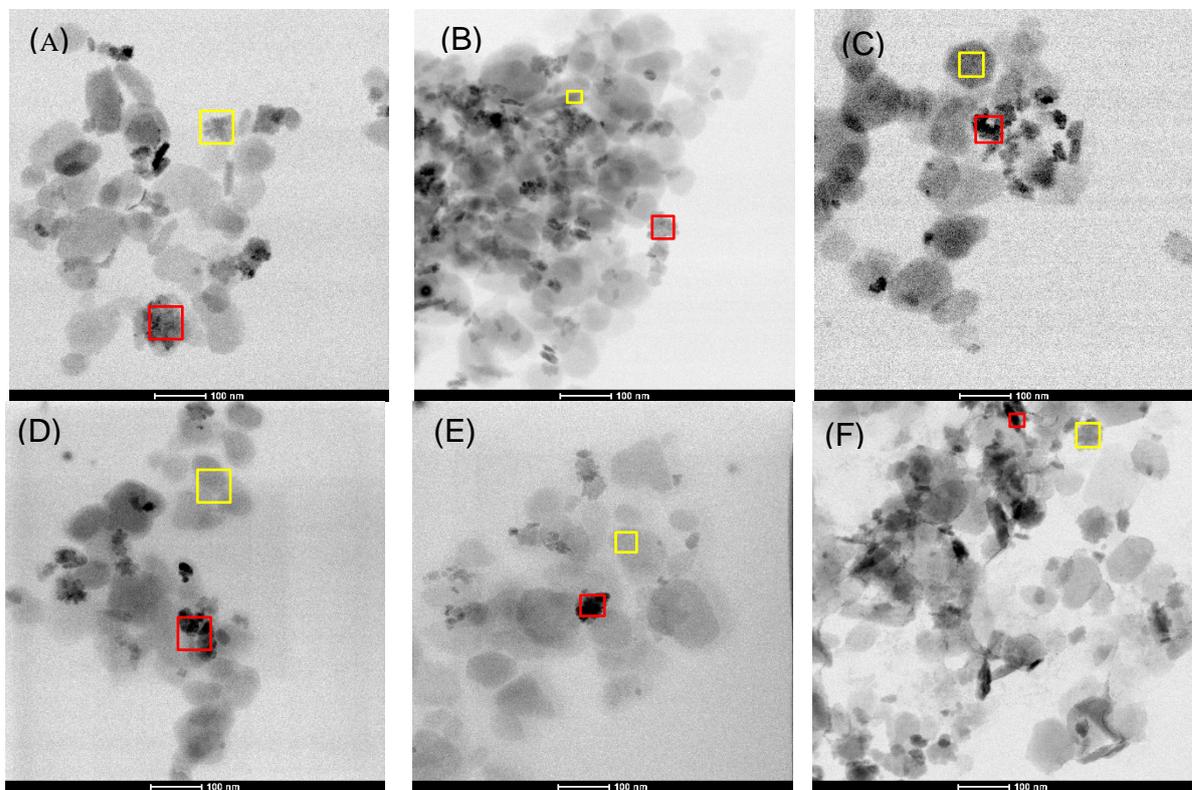
A DS nesta camada chama atenção por apresentar valores inferiores as camadas superficiais (0 a 0,05 m). No entanto, esta condição não corrobora com a afirmação de Pádua, Guerra e Zinn (2015) que nas camadas mais profundas a DS é

superior às das camadas superficiais e que este comportamento é atribuído ao teor MOS, ao peso das camadas superiores e em alguns tipos de solo a eluviação das partículas na fração argila. Ressalta-se que o uso intensivo do solo, a movimentação de máquinas pesadas com umidade elevada é capaz de elucidar este comportamento da DS da camada superficial, ou seja, o fato de estar mais elevada do que nas camadas inferiores (BORGES et al., 2016; DRESCHER et al., 2016; STEFANOSKI et al., 2013). A RP nesta camada apresentou valores superiores ao limite crítico e apresentando um comportamento similar as camadas 0,05 a 0,10 m e a de 0,10 a 0,20m, onde a redução da RP ocorreu concomitantemente com o aumento da U.

6.6 Caracterização das nanopartículas e nanoestruturas do solo

As micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas obtidas após o primeiro ano agrícola apresentaram diferentes formas e coloração das mesmas (Figura 17 e Figura 18). Na Figura 17, são apresentadas as micrografias dos tratamentos compostos pelas sucessões das plantas de cobertura sem a escarificação do solo.

Figura 17 -Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015.



(A) T1: *Crotalaria juncea* sobre SPD sem escarificação; (B) T2: *Cajanus cajan* sobre SPD sem escarificação; (C) T3: *Pennisetum glaucum* sobre SPD sem escarificação; (D) T4: Pousio sobre SPD sem escarificação; (E) T5: *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD sem escarificação e (F) T11: Cerrado remanescente; retângulo vermelho indica a primeira região onde foi realizada a análise de energia dispersiva de Raio-X (EDS) e amarelo a segunda região.

Fonte: Elaboração do autor

É possível notar que o tratamento T2 (Figura 17- B) apresenta semelhança visual com o tratamento T11 (Figura 17- F), em relação a distribuição espacial e coloração das nanopartículas. Quanto à forma, algumas nanopartículas assemelham-se a um hexágono, com bordas regulares e vértices bem definidos com coloração opaca. Outras nanopartículas e nanoestruturas apresentam uma coloração mais escuras, sem definição de bordas com aspecto grumoso. Uma outra forma que foi identificada

durante as análises das micrografias, em quase todos os tratamentos sem escarificação, exceto no T1 foi formato quadrilátero, com dois lados de comprimentos similares e coloração escura. Em todos os tratamentos é possível notar que em algumas regiões as nanopartículas hexagonais e grumosas aparentam estar interligadas, formando aglomerados de vários tamanhos, sendo inferiores a 200 nm.

Em diferentes regiões das micrografias da MET foram feitas análises de EDS, afim de caracterizar a composição química das mesmas (DALMORA et al., 2016). Por meio da análise de EDS (Tabela 43) observou-se que as nanopartículas e nanoestruturas apresentaram como principais elementos químicos: O, Al, Si e Fe. Estes elementos químicos supracitados são constituintes dos principais minerais presentes nos Latossolos, tais como: gibbsita, goethita, hematita e caulinita (EBERHARDT et al., 2008; KER, 1998; SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008). A predominância destes elementos químicos também foi verificada por (LU; SUN; ZONG, 2013), ao estudar composição química, estrutura e as fases minerais das nanopartículas em um Anthrosol na província de Zhejiang na China.

Tabela 43 - Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015.

Elementos Químicos	R. A.	Tratamentos					
		T1	T2	T3	T4	T5	T11
Porcentagem de massa (%)							
O	1 ^a	50,98	48,46	45,93	44,61	36,47	49,13
	2 ^a	45,74	58,15	52,38	46,78	35,86	42,18
Al	1 ^a	6,12	2,64	1,47	7,95	1,84	7,12
	2 ^a	2,94	12,58	13,67	3,83	1,63	3,29
Fe	1 ^a	30,76	43,98	32,12	10,00	3,39	32,54
	2 ^a	41,09	--	--	0,05	0,04	49,48
Si	1 ^a	9,73	3,07	17,65	36,31	56,73	8,69
	2 ^a	9,14	29,26	33,91	49,31	61,33	3,85
P	1 ^a	1,05	--	--	--	--	--
	2 ^a	1,07	--	--	--	--	--
S	1 ^a	--	--	--	--	--	--
	2 ^a	--	--	--	--	--	0,45
Ca	1 ^a	1,32	--	--	--	--	--
	2 ^a	--	--	--	--	--	--
Mg	1 ^a	--	--	--	1,10	1,37	1,15
	2 ^a	--	--	--	--	1,10	0,91
Ti	1 ^a	--	1,83	1,81	--	0,17	--
	2 ^a	--	--	0,03	--	--	--
Mn	1 ^a	--	--	0,99	--	--	--
	2 ^a	--	--	--	--	--	--
Cl	1 ^a	--	--	--	--	--	0,89
	2 ^a	--	--	--	--	--	0,26

R. A.= Região analisada; 1^a= região do retângulo vermelho; 2^a= região do retângulo amarelo; T1: *Crotalaria juncea* sobre SPD sem escarificação; T2: *Cajanus cajan* sobre SPD sem escarificação; T3: *Pennisetum glaucum* sobre SPD sem escarificação; T4: Pousio sobre SPD sem escarificação; T5: *Urochloa ruziziensis* (*Syn. Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD sem escarificação e T11: Cerrado remanescente. Os resultados correspondem aos tratamentos da Figura 8 (A, B, C, D, E e F), respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor

O elemento P foi encontrado apenas no tratamento T1, em ambas as regiões das análises de EDS (Tabela 43). A presença deste elemento químico na composição destas nanopartículas e nanoestruturas leva a crer que esteja ocorrendo o fenômeno de fixação do P na superfície dos constituintes minerais de solo intemperizados (CORRÊA et al., 2008a; VILAR et al., 2010).

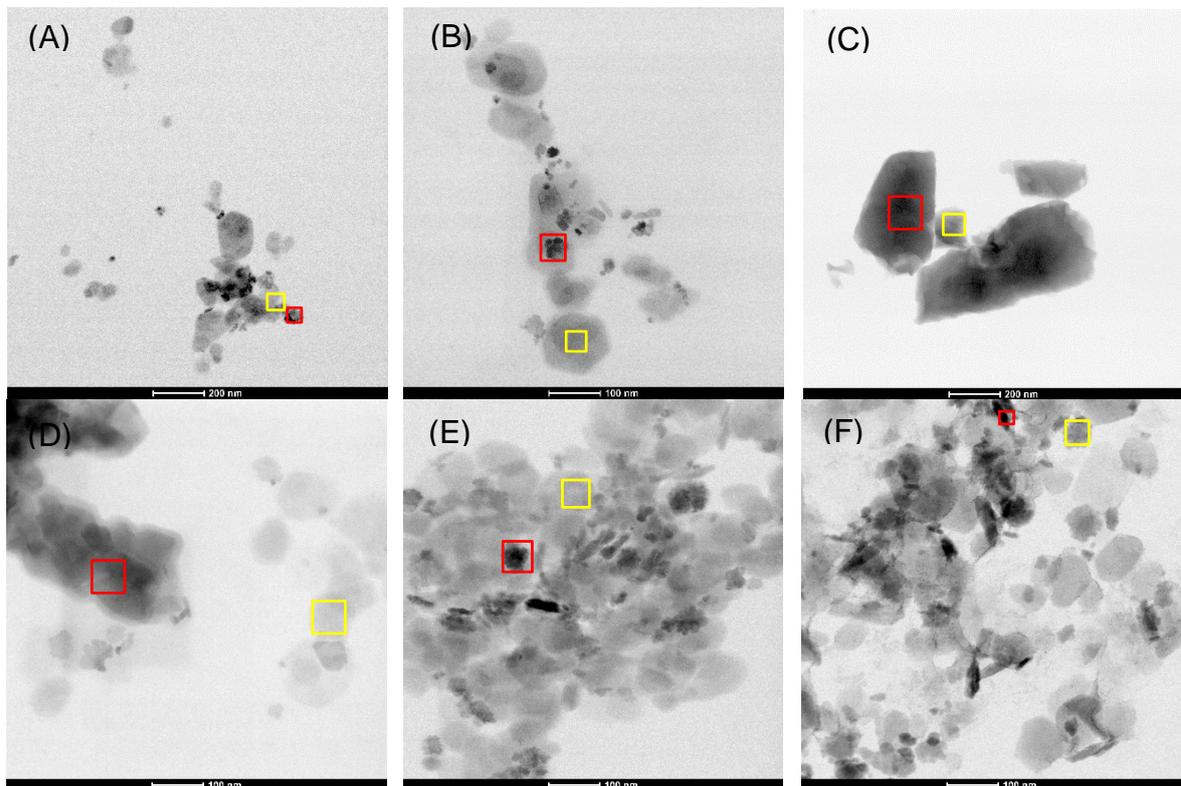
Os tratamentos T5 e T4 apresentaram nanopartículas e nanoestruturas que continham o elemento magnésio (Mg), o qual também foi identificado nas duas regiões analisadas do tratamento (T11) (Tabela 43). A presença deste elemento pode ser atribuída ao íon Mg²⁺ ligado a superfície da nanopartícula ou presença deste elemento na composição do mineral. A análise de EDS apesar de identificar a composição química do material, não é possível distinguir espécies iônicas, não-iônicas e isotrópicas (MANSUR, 2007).

O titânio (Ti) foi outro elemento químico que foi identificado pela análise de EDS nos tratamentos T2, T3 e T5, este elemento químico está presente nos Latossolos na fração argila como óxidos de Ti (SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008).

As partículas submicroscópicas, devido sua origem química e por apresentarem elevada área superficial específica, atuam com eficiência na adsorção de ânions inorgânicos, ânions orgânicos, vários biocidas e cátions (KÄMPF; CURTI, 2000). Deste modo a presença de outros elementos químicos apresentados pela análise de EDS, podem estar presentes devido a esta adsorção na superfície das nanopartículas.

Na Figura 18 são apresentadas as micrografias dos tratamentos compostos pelas sucessões das plantas de cobertura com a escarificação do solo no primeiro ano de estudo (2014/15).

Figura 18 - Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015.



(A) T6: *Crotalaria juncea* sobre SPD com escarificação; (B) T7: *Cajanus cajan* sobre SPD com escarificação; (C) T8: *Pennisetum glaucum* sobre SPD com escarificação; (D) T9: Pousio sobre SPD com escarificação; (E) T10: *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD com escarificação e (F) T11: Cerrado remanescente; retângulo vermelho indica a primeira região onde foi realizada análise de energia dispersiva de Raio-X (EDS) e amarelo a segunda região.

Fonte: Elaboração do autor.

O tratamento T10 (Figura 18- E), foi o que apresentou maior semelhança visual com o tratamento T11 (Figura 18- F), em função da distribuição espacial e coloração das nanopartículas. Quanto à forma das nanopartículas dos tratamentos com escarificação, estas apresentaram formas semelhantes as encontradas nos tratamentos sem escarificação (hexagonais e grumosas) exceto no tratamento T8(Figura 18- C).

Assim como ocorreu nos tratamentos sem escarificação, o formato quadrilátero também foi observado com uma menor frequência nos tratamentos onde foi realizada a escarificação, exceto no T6 e T8, onde não foi verificado este formato. No entanto, as nanopartículas presentes no tratamento T8 exibiam características particulares, pois as mesmas apresentavam uma forma irregular, coloração escura e uma formação aglomeradas entre si. Do mesmo modo como ocorreu nos tratamentos sem escarificação foi possível notar que em quase todos os tratamentos exceto no T8, ocorreu a interação entre as nanopartículas hexagonais e grumosas, obtendo aglomerados.

Na Tabela 44 apresenta-se a análise de EDS das diferentes regiões das nanopartículas e nanoestruturas presentes nas micrografias dos tratamentos que receberam a escarificação do solo no primeiro ano de cultivo.

Tabela 44 - Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2014/2015.

Elementos Químicos	R. A	Tratamentos					
		T6	T7	T8	T9	T10	T11
		Porcentagem de massa (%)					
O	1 ^a	56,56	52,40	49,83	50,92	39,48	49,13
	2 ^a	57,12	59,04	57,78	52,55	41,35	42,18
Al	1 ^a	--	9,89	--	1,52	3,63	7,12
	2 ^a	--	15,92	--	8,36	4,07	3,29
Fe	1 ^a	4,50	18,83	--	0,19	4,93	32,54
	2 ^a	2,12	0,56	--	1,08	1,72	49,48
Si	1 ^a	38,93	18,86	3,28	11,71	49,86	8,69
	2 ^a	37,76	24,47	5,96	37,90	51,89	3,85
S	1 ^a	--	--	--	--	--	--
	2 ^a	--	--	--	--	--	0,45
Ca	1 ^a	--	--	46,88	35,61	--	--
	2 ^a	--	--	36,25	0,06	--	--
Mg	1 ^a	--	--	--	0,01	--	1,15
	2 ^a	--	--	--	0,01	--	0,91
Ti	1 ^a	--	--	--	--	--	--
	2 ^a	2,97	--	--	--	--	--
F	1 ^a	--	--	--	--	2,03	--
	2 ^a	--	--	--	--	0,91	--
Cl	1 ^a	--	--	--	--	--	0,89
	2 ^a	--	--	--	--	--	0,26

R. A= Região analisada; 1^a= região do retângulo vermelho; 2^a= região do retângulo amarelo; T6: *Crotalaria juncea* sobre SPD com escarificação; T7: *Cajanus cajan* sobre SPD com escarificação; T8: *Pennisetum glaucum* sobre SPD com escarificação; T9: Pousio sobre SPD com escarificação; T10: *Urochloa ruziziensis*(Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD com escarificação e T11: Cerrado remanescente. Os resultados correspondem aos tratamentos da Figura 9(A, B, C, D, E e F), respectivamente.

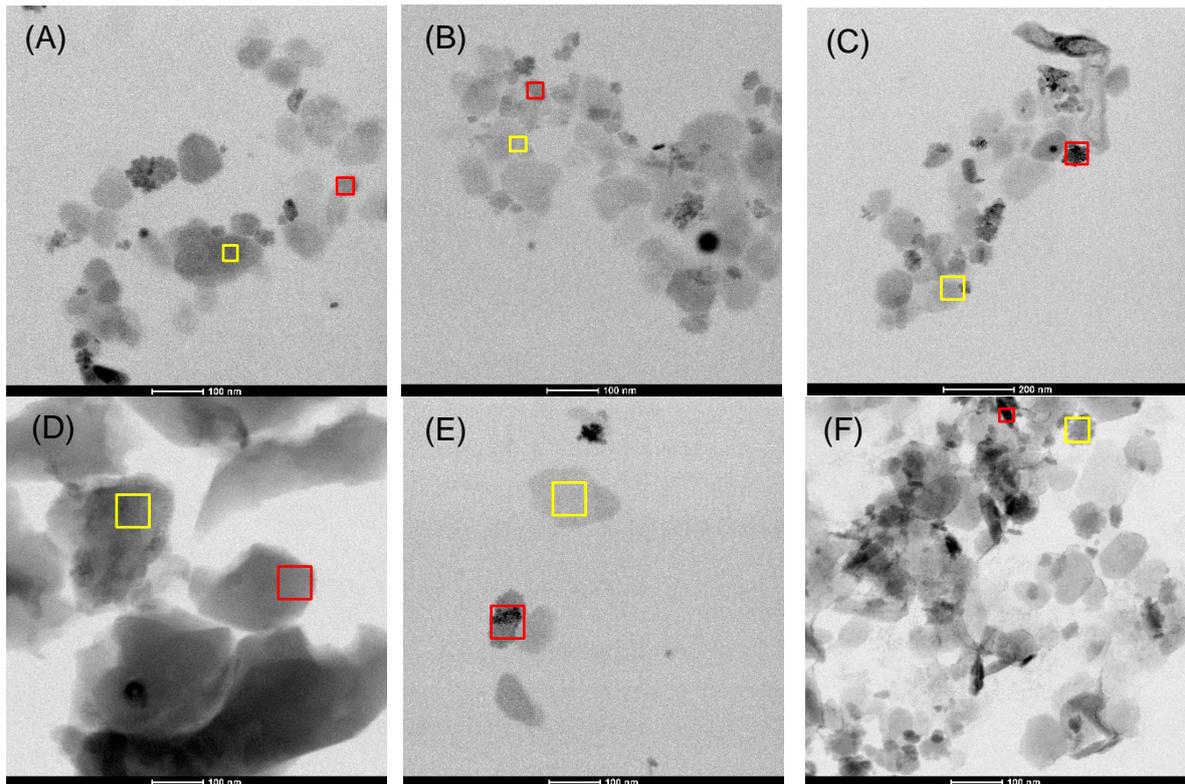
Fonte: Elaboração do auto

De modo geral observou-se na Tabela 44 as nanopartículas e nanoestruturas apresentaram em sua composição predominância dos elementos químicos: O, Al, Si e Fe, exceto nos tratamentos T6 e T8, onde ocorreram as ausências de Al e Fe, respectivamente.

O tratamento T8 apresentou nas duas regiões analisadas pelo EDS presença do elemento químico cálcio (Ca) em sua composição (Tabela 44). Baseado na composição química e na semelhança da morfologia apresentada pelas nanopartículas (Figura 18- C), sugere que as mesmas possam ser nanopartículas de oxalato de cálcio (CaC_2O_4), algum polimorfo de carbonato de cálcio (CaCO_3) com a presença de sílica (SiO_2) ou até mesmo a silicato de cálcio (CaSiO_3) (FRANCISCO; TEIXEIRA, 2008; HAKAMY; SHAIKH; LOW, 2015; RUIZ-AGUDO et al., 2017). A presença do elemento Ca também foi verificada na primeira região analisada no tratamento T9, no entanto, não ocorreu a ausência de Fe e Al.

Na Figura 19, são apresentadas as micrografias dos tratamentos compostos pelas sucessões das plantas de cobertura sem a escarificação do solo no segundo ano agrícola.

Figura 19 -Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016.



(A) T1: *Crotalaria juncea* sobre SPD sem escarificação; (B) T2: *Cajanus cajan* sobre SPD sem escarificação; (C) T3: *Pennisetum glaucum* sobre SPD sem escarificação; (D) T4: Pousio sobre SPD sem escarificação; (E) T5: *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD sem escarificação e (F) T11: Cerrado remanescente; retângulo vermelho indicam a primeira região onde foi realizada análise de energia dispersiva de Raio-X (EDS) e amarelo a segunda região.

Fonte: Elaboração do autor

As micrografias do segundo ano agrícola sem escarificação (Figura 19) apresentaram menor similaridade visual com as nanopartículas presentes no solo do Cerrado remanescentes (T11) em relação ao primeiro ano (Figura 17). No entanto, verificou-se a presença da interação entre nanopartículas de formato hexagonal com nanopartículas de formato grumoso e também a presença de nanopartículas com formato quadrilátero. Em ambos os anos o tratamento T2 (Figura 17- B e Figura 19- B) apresentou similaridade com o tratamento T11, apesar de apresentarem densidades de partículas diferentes de um ano para outro este tratamento foi o que apresentou a estabilidade visual diante dos outros tratamentos onde não ocorreu a escarificação.

Na Tabela 45 apresenta-se a análise de EDS das diferentes regiões das nanopartículas e nanoestruturas presentes nas micrografias dos tratamentos que não receberam a escarificação do solo no segundo ano de cultivo (Figura 19).

Tabela 45 - Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, sem escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016.

Elementos Químicos	R. A	Tratamentos					
		T1	T2	T3	T4	T5	T11
Porcentagem de massa (%)							
O	1 ^a	52,01	55,54	50,20	46,60	49,64	49,13
	2 ^a	65,68	61,40	58,46	58,17	57,26	42,18
Al	1 ^a	1,58	5,03	2,70	3,80	4,00	7,12
	2 ^a	9,03	10,42	3,06	18,73	9,29	3,29
Fe	1 ^a	33,56	17,57	23,10	0,55	27,58	32,54
	2 ^a	0,69	--	2,80	--	0,94	49,48
Si	1 ^a	12,21	20,08	23,98	3,58	18,77	8,69
	2 ^a	24,11	27,78	33,91	22,12	32,38	3,85
P	1 ^a	0,60	--	--	--	--	--
	2 ^a	0,30	--	--	--	--	--
S	1 ^a	--	--	--	--	--	--
	2 ^a	--	--	0,48	--	--	0,45
Ca	1 ^a	--	--	--	45,45	--	--
	2 ^a	--	--	0,85	0,97	--	--
Mg	1 ^a	--	--	--	--	--	1,15
	2 ^a	--	--	--	--	--	0,91
Ti	1 ^a	--	--	--	--	--	--
	2 ^a	--	--	--	--	0,10	--
Cl	1 ^a	--	--	--	--	--	0,89
	2 ^a	0,16	--	--	--	--	0,26
Ni	1 ^a	--	1,76	--	--	--	--
	2 ^a	--	0,39	--	--	--	--
K	1 ^a	--	--	--	--	--	--
	2 ^a	--	--	0,41	--	--	--

R. A= Região analisada; 1^a= região do retângulo vermelho; 2^a= região do retângulo amarelo; T1: *Crotalaria juncea* sobre SPD sem escarificação; T2: *Cajanus cajan* sobre SPD sem escarificação; T3: *Pennisetum glaucum* sobre SPD sem escarificação; T4: Pousio sobre SPD sem escarificação; T5: *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD sem escarificação e T11: Cerrado remanescente. Os resultados correspondem aos tratamentos da Figura 10 (A, B, C, D, E e F), respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor

Assim como ocorreu no primeiro ano agrícola, à análise de EDS revelou que as nanopartículas e nanoestruturas presentes no solo que recebeu os tratamentos sem escarificação do segundo ano agrícola também apresentaram predominância dos elementos químicos O, Al, Si e Fe (Tabela 45). O tratamento T1, novamente apresentou a presença de P em ambas as regiões analisadas pelo EDS nas micrografias. No entanto, verificou-se que ocorreu uma redução na porcentagem de massa deste do primeiro ano para o segundo. Esse comportamento pode estar relacionado com a ação dos ácidos orgânicos provenientes da decomposição da MOS

e de exsudados radiculares, que podem competir nos sítios de adsorção do P aumentando a sua disponibilidade no solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

O elemento químico enxofre (S) esteve presente em um dos pontos analisados das nanopartículas do tratamento referente a condição natural do Cerrado remanescente (T11) e também no tratamento T3 (Tabela 45). Este elemento no solo pode estar presente tanto na forma orgânica e inorgânica, porém, a forma orgânica é que mais predomina (SCHERER, 2009). Deste modo a matéria orgânica e sua mineralização apresenta um papel importante na disponibilização do S na forma de sulfato (SO_4^{2-}) para a solução do solo (TIECHER et al., 2012). Os íons SO_4^{2-} podem ser adsorvidos por grupos funcionais presentes nos argilominerais e de óxidos presentes no solo (CASAGRANDE et al., 2003; INSKEEP, 1989; RAO; SRIDHARAN, 1984).

As presenças de P e S nas nanopartículas e nanoestruturas analisadas no solo que recebeu os tratamentos T1 e T3, respectivamente, podem ser resultantes da retenção dos íons fosfatos e sulfatos por óxidos, especialmente em solos altamente intemperizados como os Latossolos (GEELHOED; HIEMSTRA; VAN RIEMSDIJK, 1997; GUSTAFSSON; AKRAM; TIBERG, 2015; PARFITT, 1979; PEAK; FORD; SPARKS, 1999), tendo em vista que nas regiões analisadas apresentam-se também elevadas porcentagens de O, Al e Fe, os quais são elementos constituintes dos mesmos.

O tratamento T2 apresentou, em ambas as regiões de suas nanopartículas e nanoestruturas o elemento químico níquel (Ni) (Tabela 45). Segundo Mellis; Cruz; Casagrande (2004), a introdução de Ni no solo ocorre devido a ação antrópica, mediante o uso de fertilizantes fosfatados, pesticidas e biossólidos, apesar de ser considerado um micronutriente essencial as plantas, concentrações elevada no solo podem oferecer riscos ao ambiente (CEMPEL; NIKEL, 2006).

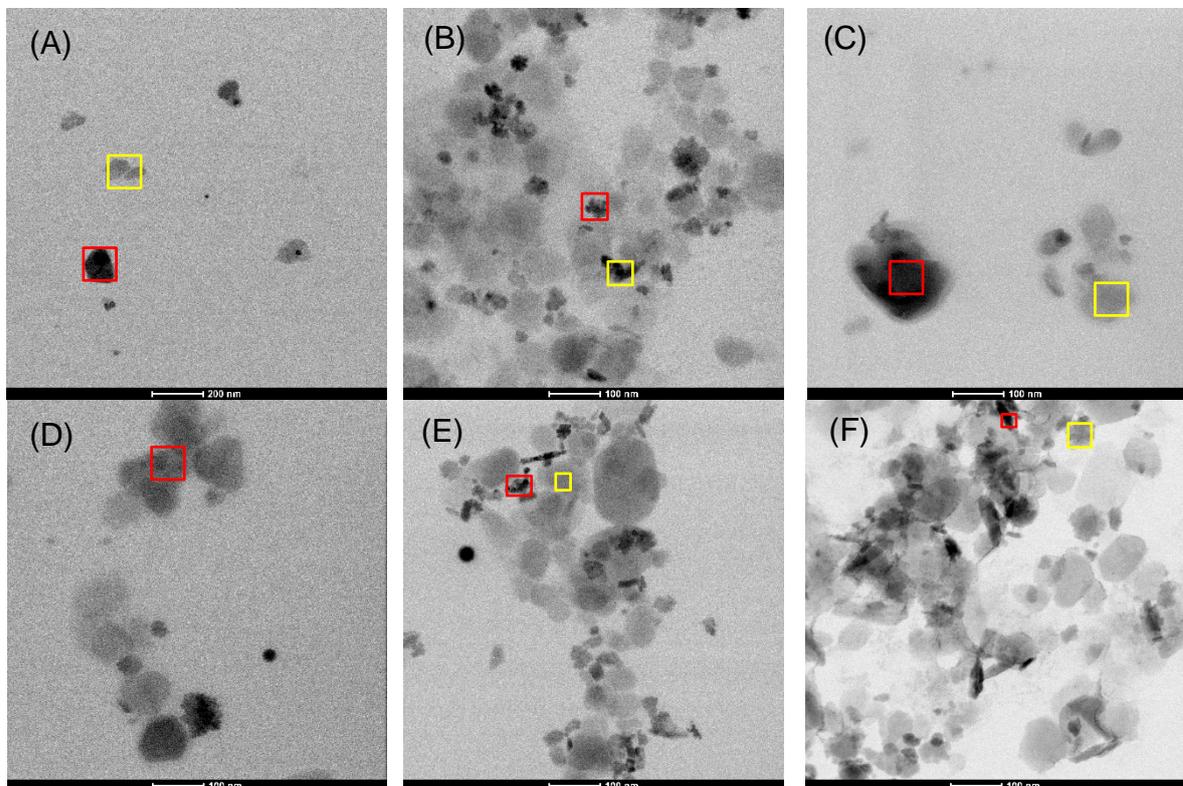
No entanto, os minerais secundários presentes nos solos tropicais apresentam papel importante na manutenção da qualidade ambiental, pois apresentam afinidade na retenção de metais nocivos ao ambiente (MELLIS; CRUZ; CASAGRANDE, 2004). Nos óxidos de ferro, a capacidade de adsorção de Ni pode ser influenciada de forma positiva ou negativa, pela presença ácidos orgânicos oriundos da exsudados radiculares e da matéria orgânica do solo (FLYNN; CATALANO, 2017; MELLIS; CRUZ; CASAGRANDE, 2004; ZHANG et al., 2015).

Segundo Axe e Trivedi, (2002), a afinidade destes minerais para a retenção de metais nocivos está relacionada com a área superficial e a presença de microporos e

a abundância de sítios de ligações. Assim diante desta afirmação é possível também inferir que as nanopartículas destes minerais podem apresentar papel importante na retenção e também servir como ferramenta na avaliação da presença de agentes contaminantes.

Na Figura 20 estão apresentadas as micrografias dos tratamentos compostos pelas sucessões das plantas de cobertura com a escarificação do solo no segundo ano agrícola.

Figura 20 - Micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016



(A) T6: *Crotalaria juncea* sobre SPD com escarificação; (B) T7: *Cajanus cajan* sobre SPD com escarificação; (C) T8: *Pennisetum glaucum* sobre SPD com escarificação; (D) T9: Pousio sobre SPD com escarificação; (E) T10: *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD com escarificação e (F) T11: Cerrado remanescente; retângulo vermelho indicam a primeira região onde foi realizada análise de energia dispersiva de Raio-X (EDS) e amarelo a segunda região.

Fonte: Elaboração do autor.

A similaridade visual em relação a distribuição espacial e a coloração das nanopartículas e nanoestruturas dos tratamentos que receberam escarificação, com a área de Cerrado remanescente T11 (Figura 20- F), foi maior nos tratamentos T7 e T10 (Figura 20- B e E). A micrografia do tratamento T8(Figura 20- C), apresenta uma formação aglomerada de coloração escura, sem definição de bordas. O tratamento

T10 foi o que apresentou maior estabilidade na similaridade visual de um ano para o outro, entre os tratamentos que receberam a escarificação do solo.

Na Tabela 46 apresenta-se a análise de EDS das diferentes regiões das nanopartículas e nanoestruturas presentes nas micrografias dos tratamentos que receberam a escarificação do solo no segundo ano de cultivo (Figura 20).

Tabela 46 - Análise de energia dispersiva de raio -X (EDS), em regiões das micrografias de microscopia eletrônica de transmissão (MET) das nanopartículas e nanoestruturas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, com escarificação e sobre a sucessão de plantas de cobertura, arroz de terras altas e feijão no ano agrícola de 2015/2016.

Elementos Químicos	R. A	Tratamentos					
		T6	T7	T8	T9	T10	T11
Porcentagem de massa (%)							
O	1 ^a	61,67	62,63	54,78	63,99	41,78	49,13
	2 ^a	58,93	52,19	58,84	--	50,80	42,18
Al	1 ^a	16,07	2,18	--	0,38	4,17	7,12
	2 ^a	11,94	9,32	--	--	13,54	3,29
Fe	1 ^a	0,70	18,93	--	8,03	37,88	32,54
	2 ^a	--	23,48	--	--	1,56	49,48
Si	1 ^a	21,37	16,24	10,24	27,58	16,15	8,69
	2 ^a	26,32	14,98	38,06	--	34,09	3,85
S	1 ^a	0,16	--	--	--	--	--
	2 ^a	0,48	--	--	--	--	0,45
Ca	1 ^a	--	--	34,85	--	--	--
	2 ^a	--	--	2,83	--	--	--
Mg	1 ^a	--	--	--	--	--	1,15
	2 ^a	2,30	--	--	--	--	0,91
Cl	1 ^a	--	--	--	--	--	0,89
	2 ^a	--	--	--	--	--	0,26

R. A= Região analisada; 1^a= região do retângulo vermelho; 2^a= região do retângulo amarelo; T6: *Crotalaria juncea* sobre SPD com escarificação; T7: *Cajanus cajan* sobre SPD com escarificação; T8: *Pennisetum glaucum* sobre SPD com escarificação; T9: Pousio sobre SPD com escarificação; T10: *Urochloa ruziziensis* (*Syn. Brachiaria ruziziensis*) sobre SPD com escarificação e T11: Cerrado remanescente. Os resultados correspondem aos tratamentos da Figura 11 (A, B, C, D, E e F), respectivamente.

Fonte: Elaboração do autor

A análise de EDS novamente revelou a predominância dos elementos químicos O, Al, Si e Fe na composição das nanopartículas e nanoestruturas do solo, exceto no tratamento T8, onde não foi verificado a presença de Al e Fe (Tabela 46). Assim como correu no primeiro ano, o segundo ano agrícola também apresentou nanopartículas e nanoestruturas com a presença de Ca. As nanopartículas analisadas no tratamento T6 apresentaram a presença de magnésio (Mg) e enxofre (S). Como já discutido a presença do S nas nanopartículas e nanoestruturas está ligada a existência da MOS, tendo em vista que não foi feito nenhum tratamento para a remoção da mesma para se efetuar as caracterizações. As análises de EDS, revelaram que nos tratamentos não escarificados, a presença dos elementos P, Ca,

Mg e K, ocorreu com maior frequência em suas nanopartículas e nanoestruturas em relação aos tratamentos com solo escarificado.

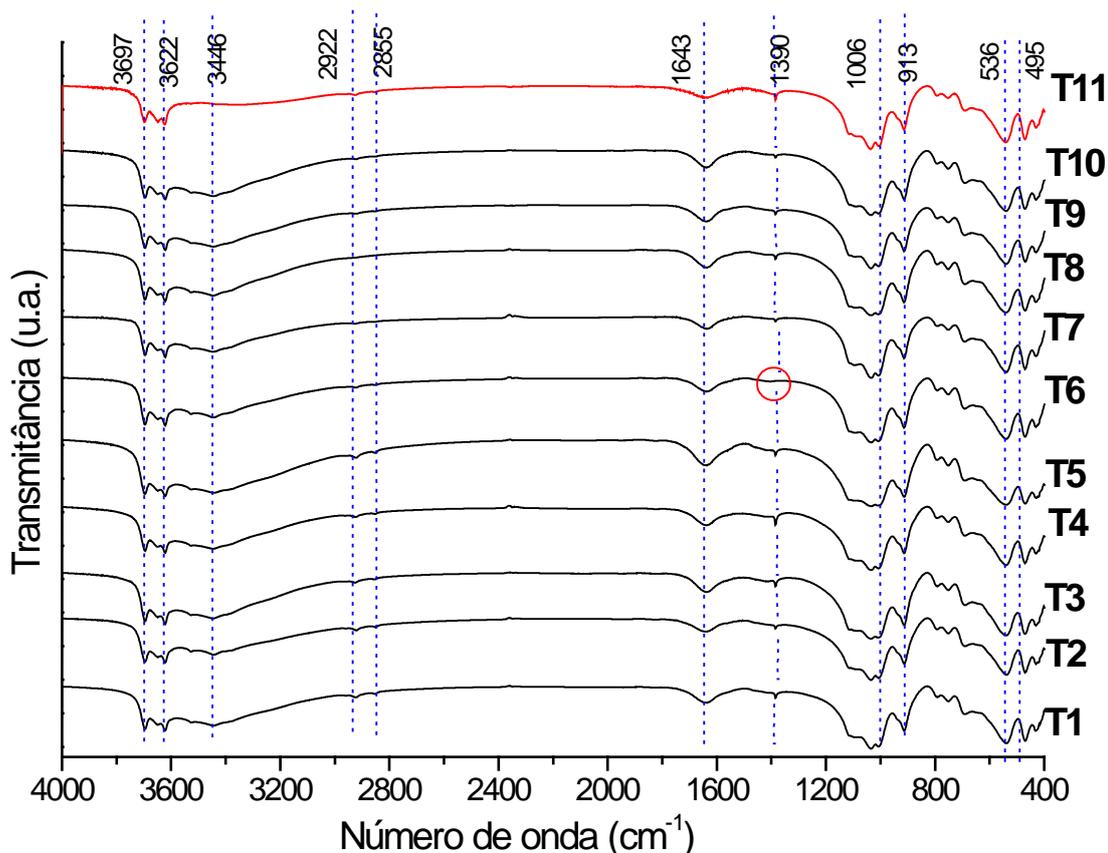
Esta condição pode estar atrelada a um comportamento que ocorre de maneira frequente nos sistemas de plantio direto, em virtude da decomposição de resíduos vegetais e posterior liberação desses nutrientes, além dos oriundos de fertilizantes, os quais se acumulam nas camadas superficiais, devido ao não revolvimento do solo (MUZILLI, 1983; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Acredita-se que a escarificação pode ter interferido nas dinâmicas de acúmulo destes elementos e na decomposição da matéria orgânica, que além de nutrientes também ocorre a liberação de ácidos orgânicos (CORRÊA et al., 2008b). Estes ácidos orgânicos possuem papel fundamental nos processos de adsorção de nutrientes em solos intemperizados com mineralogia de carga variável (ADELEKE; NWANGBURUKA; OBOIRIEN, 2017; JOHNSON; LOEPPERT, 2006). Deste modo, é provável que o efeito destes ácidos, teve ação sobre as nanopartículas e nanoestruturas, sendo evidenciado este efeito por meio da presença destes elementos em maior frequência, nos tratamentos sem escarificação.

As formas hexagonais das nanopartículas se assemelham com às descritas por Tsao et al. (2012 e 2013) os quais sugerem ser caulinita. No entanto, Santos et al. (2006) afirmam que esta morfologia da caulinita é similar à da gibbsita, um óxido de alumínio (Al) comum em Latossolos (EBERHARDT et al., 2008). Esta similaridade morfológica pode ser atribuída ao processo de formação da gibbsita, que pela dessilicatização dos minerais filossilicatos (Caulinita), forma os minerais não silicatados como a gibbsita (GHIDIN et al., 2006). Deste modo é provável que a dessilicatização não tenha afetado a estrutura octaédrica de alumínio e a morfologia hexagonal tenha sido mantida na gibbsita. As análises EDS, revelaram que estas nanopartículas hexagonais apresentam em sua composição a presença de Al, O e Si e outras com apenas Al e O, o que reforça a hipótese de serem caulinita e gibbsita. Segundo Pédrot et al. (2011) a coloração opaca de nanopartículas do solo ocorre em virtude de sua baixa espessura ao feixe de elétrons transmitidos para a captura das micrografias.

Quanto as nanopartículas e nanoestruturas com aspectos grumoso e de coloração escura, estas se assemelham com as reportadas por CLAUDIO et al., 2017; GHEZZI et al. (2014), os quais sugerem ser óxidos de Fe.

A espectrometria na região do infravermelho foi utilizada como ferramenta complementar na caracterização das nanopartículas e nanoestruturas do solo. Os espectros de FTIR das nanopartículas do primeiro e segundo anos agrícolas são representados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 - Espectros infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, com e sem o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão no ano agrícola de 2014/15 e Cerrado remanescente.



Fonte: Elaboração autor.

Todos os espectros de FTIR representados na Figura 21 são similares aos encontrados em minerais da fração argila, onde foram observadas bandas de absorção em 3697 e 3622 cm^{-1} , as quais são atribuídas ao grupamento OH da ligação Al-OH, o que indica a presença de caulinita, sendo confirmada pela vibração de O-Al-OH em 1035 e 913 cm^{-1} , pela vibração Si-O em 1006 cm^{-1} (BRAVARD; RIGHI, 1988; MARTINELLI et al., 2014; MERLIN; LIMA; SANTOS-TONIAL, 2015; PADILHA et al., 2017; SOUZA et al., 1989).

A presença de hematita e goethita foram confirmadas pelas vibrações em 536 cm^{-1} que indicam a ligação Fe-O (hematita) e as bandas em 495 e 798 cm^{-1} indicam flexão Fe-O-H, existentes na goethita (GOTIC; MUSIC, 2007; KUMAR;

RAJKUMAR, 2013). Verificou-se que os picos que indicam a presença da hematita são mais intensos que os da goethita, o que corrobora para a maior presença de hematita na composição das nanopartículas e nanoestruturas do solo. A banda em 1643 cm^{-1} , usualmente é atribuída à presença de água (H_2O) estrutural em espectros relacionados ao estudo de minerais do solo (BRAVARD; RIGHI, 1988; MARTINELLI et al., 2014; PADILHA et al., 2017; SILVA; DICK; INDA JUNIOR, 2008; ZANNAH et al., 2016).

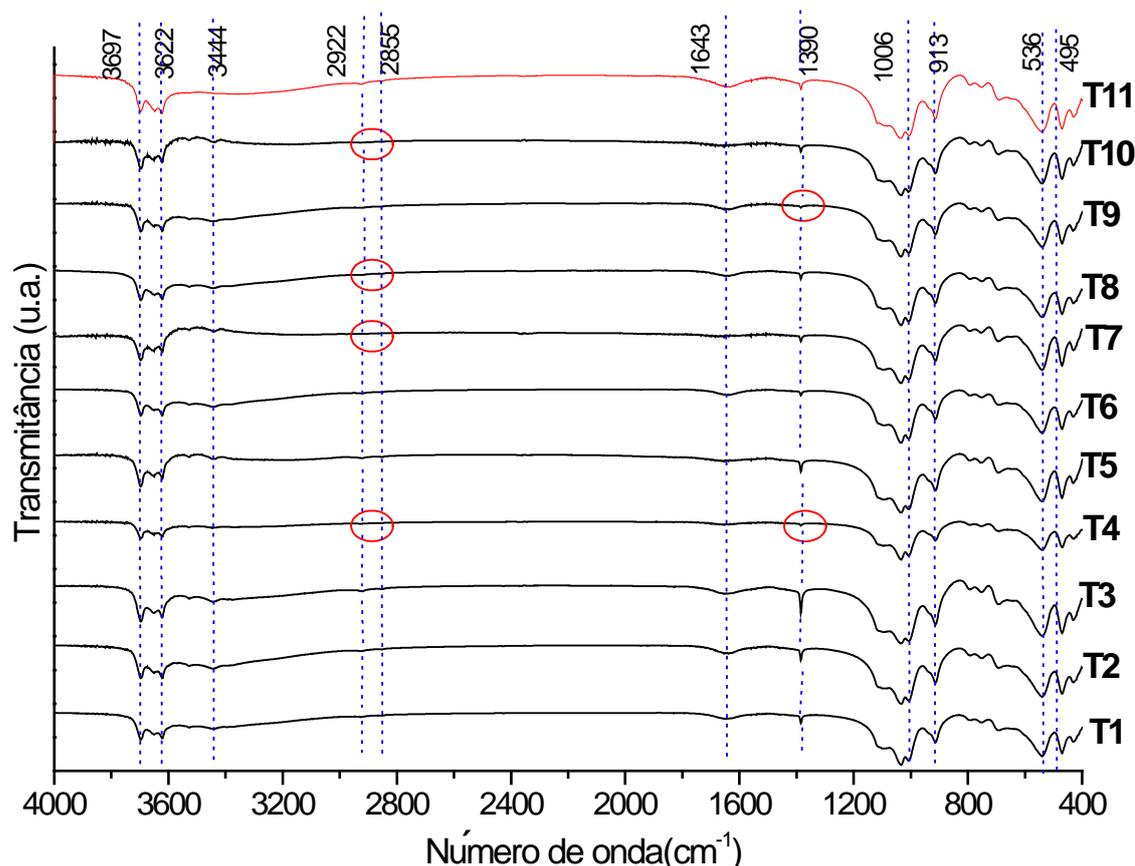
Neste ano agrícola os espectros que representam as bandas típicas da vibração O-Al-OH da gibbsita foram menos pronunciados na região de 3600 a 3400 cm^{-1} (3532 , 3446 e 3383 cm^{-1}), devido a presença de MOS (BRAVARD; RIGHI, 1988; SILVA; DICK; INDA JUNIOR, 2008; ZANNAH et al., 2016). Observou-se que nestes solos, as bandas referentes à matéria orgânica foram comparativamente melhor definidas, destacando-se: 3446 cm^{-1} (estiramento de O-H em sobreposição à banda de gibbsita), 2925 e 2853 cm^{-1} (estiramento C-H de grupos alifáticos), duplete em 1643 e 1390 cm^{-1} (estiramento C=O de COO^- , em sobreposição à de H_2O estrutural), exceto para o tratamento T6. Esta composição, semelhante em todos os solos analisados, é típica de matéria orgânica humificada (MERLIN; LIMA; SANTOS-TONIAL, 2015; SILVA; DICK; INDA JUNIOR, 2008; ZANNAH et al., 2016).

É provável, que além da gibbsita, possam coexistir nanopartículas amorfas de hidróxido de Al, apresentando bandas de adsorção com comprimento de onda similares, e que também são sobrepostas pela MOS presente. Deste modo, acredita-se que, nanopartículas desses amorfos de hidróxidos de Al, estejam interagindo com a MOS, pois estudos tem indicado alta capacidade adsorptiva e estabilizadora da MOS, por estes minerais (SCHNEIDER et al., 2010).

Quanto aos óxidos de ferro, a interação da MOS com as hematitas, apresentam maior estabilidade e resistência, quando ligadas com os carbonos dos grupos alifáticos do que com os carbonos dos grupos aromáticos em função dos processos de redução dos óxidos de Fe do solo (ADHIKARI; YANG, 2015). Estes mesmos autores afirmam ainda que o mecanismo envolvido na interação entre a MOS com a hematita, ocorre por meio da formação de aglomerados esféricos complexos, onde a parte alifática da MOS fica localizada internamente no aglomerado, envolvida por hematitas e a parte aromática fica adsorvida externamente a superfície destes óxidos de Fe.

Os espectros do segundo ano agrícola (Figura 22) apresentaram semelhanças com o primeiro ano, porém, apresentando algumas particularidades.

Figura 22 - Espectro infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, com e sem o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão no ano agrícola de 2015/16 e Cerrado remanescente.



Fonte: Elaboração autor.

Nos dois anos agrícolas observou-se uma absorção intensa na região de 1100 a 980 cm^{-1} (1114, 1035, 1006 e 913 cm^{-1}) que indica vibrações Si-O-Si, as quais referem-se a presença de quartzo. Segundo Carvalho et al. (2013), a presença deste mineral é comum ocorrer na fração areia, porém, em casos raros pode estar presentes na fração de argila fina. Um outro motivo capaz de indicar presença deste mineral é a possível quebra de minerais da fração areia em partículas de tamanho inferior, devido a energia de ultrassom (VITORINO et al., 2007).

As bandas referentes as ligações que caracterizam as nanopartículas dos minerais caulinita, gibbsita e os óxidos de Fe (hematita e goethita), apresentadas no primeiro ano agrícola, também foram exibidas na maioria dos espectros dos tratamentos no segundo ano agrícola. Com exceção dos espectros dos tratamentos T4, T7, T8 e T10, que não apresentaram as bandas de 2925 e 2853 cm^{-1} , que indicam

o estiramento C-H de grupos alifáticos, os tratamentos T4 e T9 não apresentaram os dupletos em 1643 e 1390 cm^{-1} que estão associados ao estiramento C=O de COO^- , em sobreposição à de H_2O estrutural.

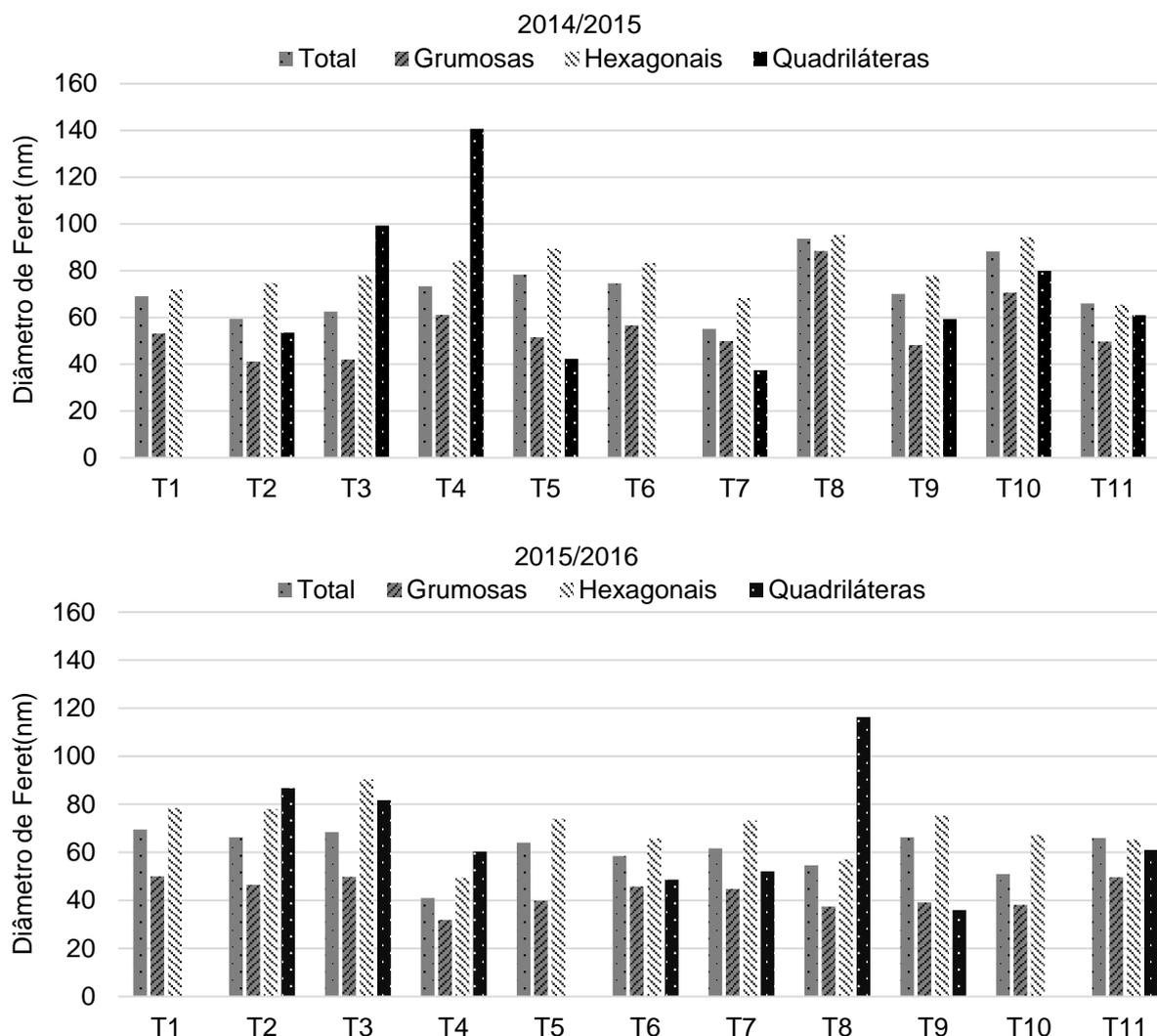
Este comportamento, oferece indícios contundentes de que a escarificação influencia os aspectos qualitativos da MOS presente nas nanoestruturas, tendo em vista que a maioria dos tratamentos que receberam a escarificação apresentou este comportamento. A qualidade da MOS, apresenta relação direta com a atividade microbiana do solo, onde em sistema de plantio direto, a interferência nesta atividade é inferior em comparação com os demais sistemas de preparo (DADALTO et al., 2015).

As interações exibidas em vários tratamentos entre as nanopartículas de formato hexagonais (caulinita e óxidos de Al) e de formato grumoso (óxidos de Fe), podem ser atribuídas às ligações eletrostáticas. Segundo Wei et al. (2012), a interação entre a caulinita com óxidos de Fe é conduzida mediante as ligações eletrostáticas das cargas superficiais dos mesmos e que no caso dos óxidos de Fe presentes nos Latossolos, possuem cargas variando em função do pH (KER, 1998). No entanto, as interações entre óxidos de Al e de Fe, onde ambos possuem cargas em função dos grupos hidroxílicos em sua superfície, apenas seria possível por meio de adsorção de MOS.

A formação destas nanoestruturas podem influenciar a formação de estruturas com escalas superiores, devido ao arranjo das nanopartículas minerais que compõem (PEREIRA et al., 2010b) e, o aporte de carbono no solo (ADHIKARI; YANG, 2015; SCHNEIDER et al., 2010). Deste modo, as nanoestruturas formadas a partir das interações das nanopartículas de diferentes formatos, podem desempenhar um papel importante como indicador no processo de estabilização da MOS.

A análise da morfologia geométrica das diferentes nanopartículas exibidas nas micrografias de TEM, apresenta valores médios dos seus tamanhos Figura 23.

Figura 23 – Médias do diâmetro de Feret de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.



Fonte: Elaboração do autor.

O solo do Cerrado remanescente apresentou nanopartículas com um tamanho médio de 66,00 nm (Figura 23). No solo com atividade agrícola, em seu primeiro ano de cultivo as nanopartículas dos tratamentos sem escarificação exibiram tamanhos inferiores aos das áreas escarificadas, sendo 68,46 nm e 76,62nm, respectivamente. No segundo ano ocorreu uma inversão, pois as nanopartículas das áreas escarificadas apresentaram uma média de tamanho de 58,38 nm e a não escarificada 61,82 nm. Estes tamanhos encontrados corroboram com a faixa de tamanho de 5 a 100 nm, reportado por Theng e Yuan (2008), que afirmam ainda ser característico de nanopartículas compostas por óxido e hidróxidos de Fe e Al.

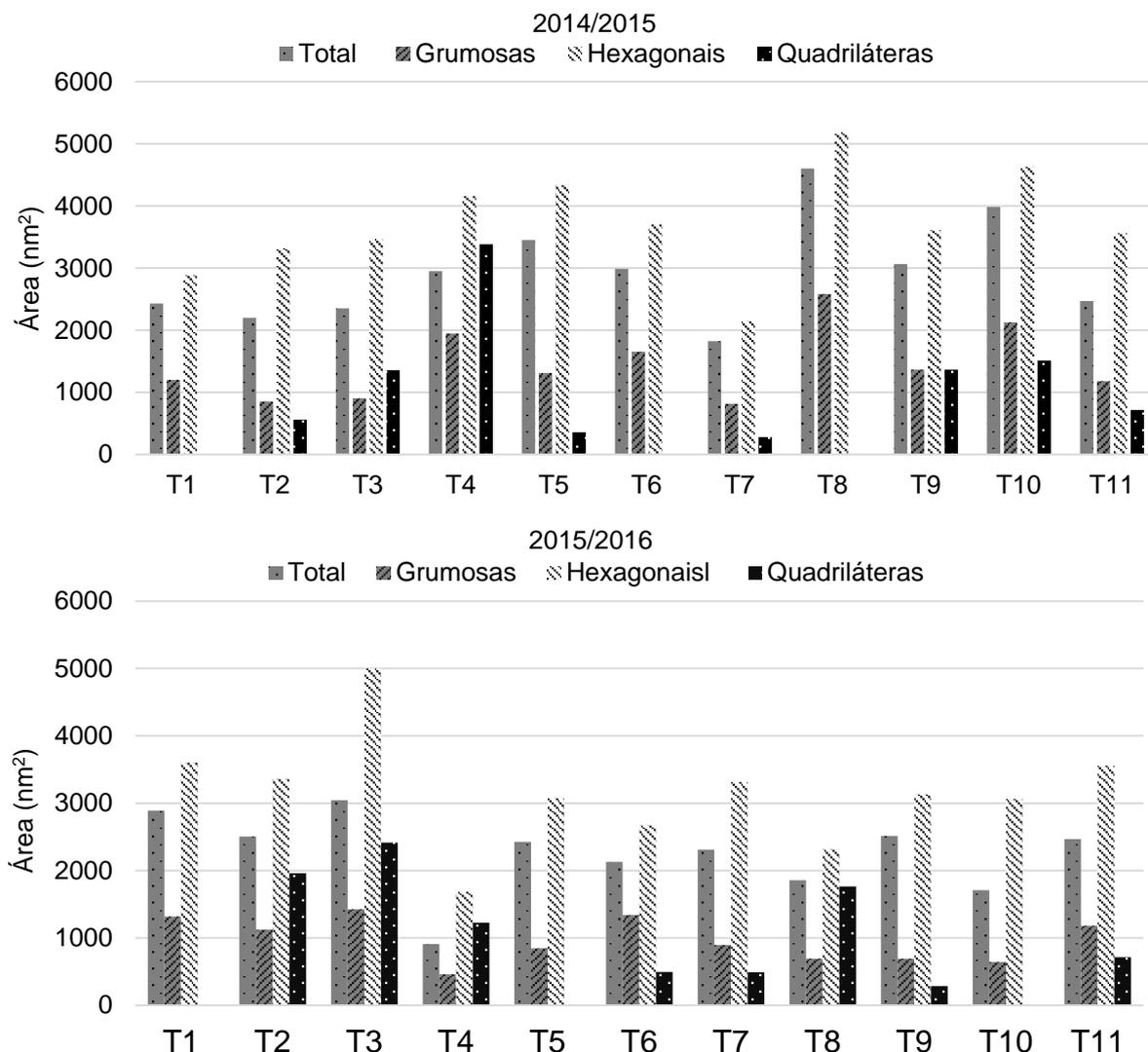
Com relação às coberturas vegetais no primeiro ano agrícola, os tratamentos que utilizaram o *Cajanus cajan* T2 e T7 apresentaram os menores tamanhos de nanopartículas, sendo de 59,38 e 55,00 nm, respectivamente. Para o segundo ano agrícola os tratamentos em sucessão ao pousio T4 e T9, foram os que exibiram os menores tamanhos 41,00 e 66,23, respectivamente.

As formas com aspectos grumosos, identificadas como óxidos de Fe, foram as que apresentaram os menores tamanhos de nanopartículas, mantendo este comportamento em relação as outras formas, independente do sistema de preparo ou planta de cobertura em sucessão. No primeiro ano agrícola o tamanho médio destas nanopartículas foram de 49,75 e 62,67 nm, para os tratamentos sem e com escarificação, respectivamente. No segundo ano estas dimensões foram ainda menores, 43,60 e 41,02 nm, para os tratamentos sem e com escarificação, respectivamente. Vandevort, Livi e Arai, (2013), ao estudar o transporte de P por partículas coloidais de um Argissolo de uso agrícola na Carolina do Sul, verificaram a presença de nanopartículas de hematita com tamanho médio de 10 nm.

As partículas com formato hexagonal, as quais apresentavam Al e identificadas como, caulinita ou gibbsita, foram as que apresentaram os maiores tamanhos médios, 79,63 e 83,78 nm, para os tratamentos sem e com escarificação, respectivamente. No segundo ano estas dimensões apresentaram uma redução 74,03 e 67,71 nm, para os tratamentos sem e com escarificação, respectivamente. Estes resultados corroboram com Camargo et al. (2008), ao estudarem a variabilidade espacial dos atributos mineralógicos dos minerais na fração argila de um Latossolo, encontraram valores próximos com dimensões variando de 22 a 58 nm e 79 a 99 nm, para caulinita e gibbsita, respectivamente.

As áreas medidas obtidas pela projeção bidimensional das nanopartículas pelas micrografias de MET e os seus valores médios estão representados na Figura 24.

Figura 24 – Médias das áreas de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nas safras de 2014/15 e 2015/16.



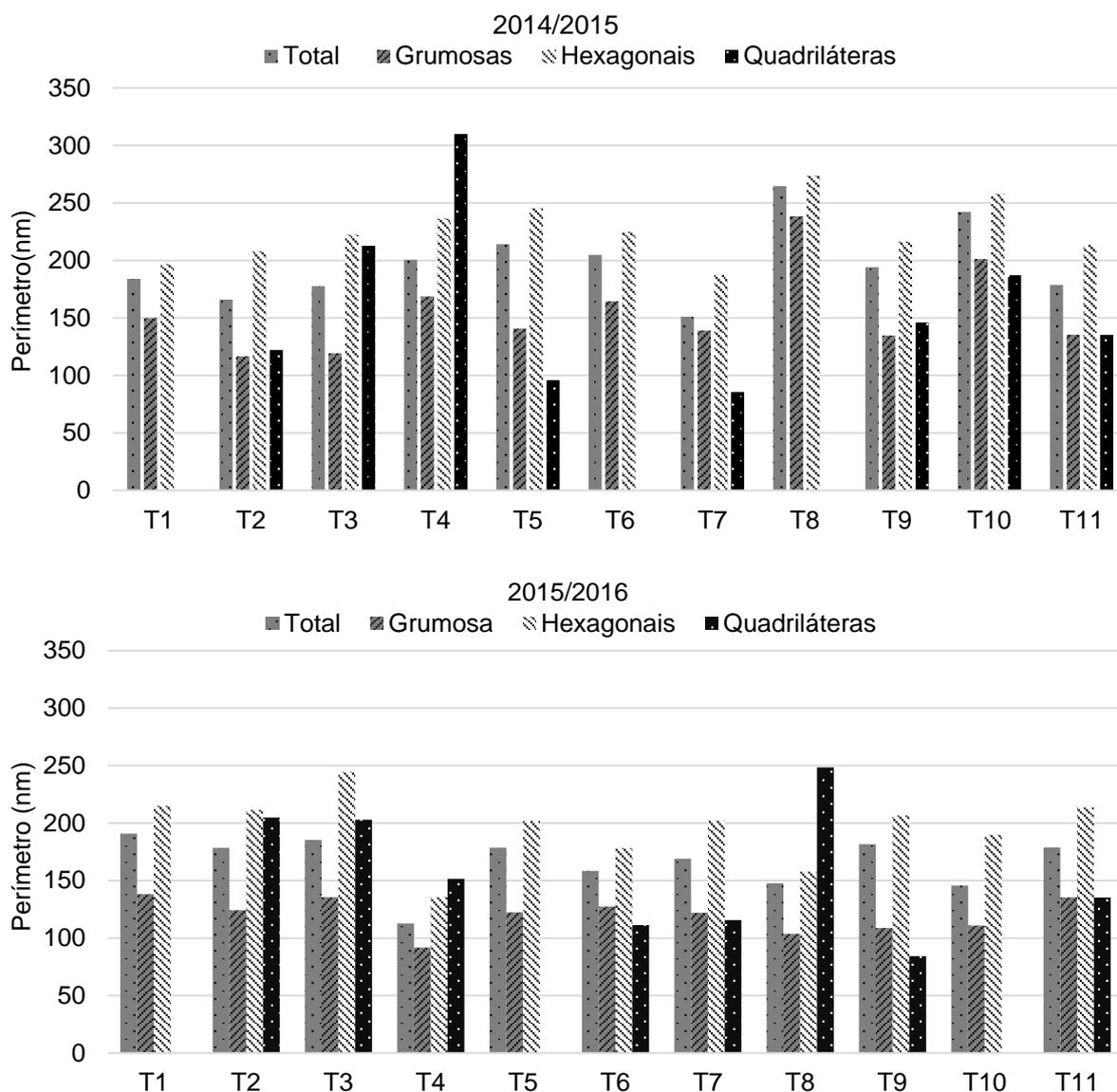
Fonte: Elaboração do autor.

As nanopartículas de formato hexagonal apresentaram os maiores tamanhos e conseqüentemente as maiores áreas das projeções bidimensional em ambos os anos (Figura 24). A área (nm²) apresentada pela MET é diferente da área superficial específica (m²g⁻¹), termo que é frequentemente empregado na caracterização de nanopartículas, onde é obtida por meio de outra técnica, tendo uma relação inversa com o tamanho da partícula (CESSA et al., 2009; FERREIRA; RANGEL, 2009; GROHMANN, 1971).

No entanto, a área apresentada pela micrografia de MET, não consegue descrever a área total da superfície da nanopartícula, pois se trata de uma

representação em um plano bidimensional. Porém, esta limitação vem sendo solucionada com o avanço de novas tecnologias no campo da microscopia (MET), por meio de técnicas e equipamentos que permitem a reconstrução e caracterização tridimensional de nanopartículas (JOHNSON et al., 2017; ZHANG; SHI; ZHANG, 2017; ZHENG; ZHU, 2017). A área juntamente com o perímetro permite definir circularidade das nanopartículas (OLSON, 2011; PABST; GREGOROVA, 2007; PIRES et al., 2013). Assim como a área, o perímetro é uma projeção bidimensional e seus valores médios estão apresentados na Figura 25.

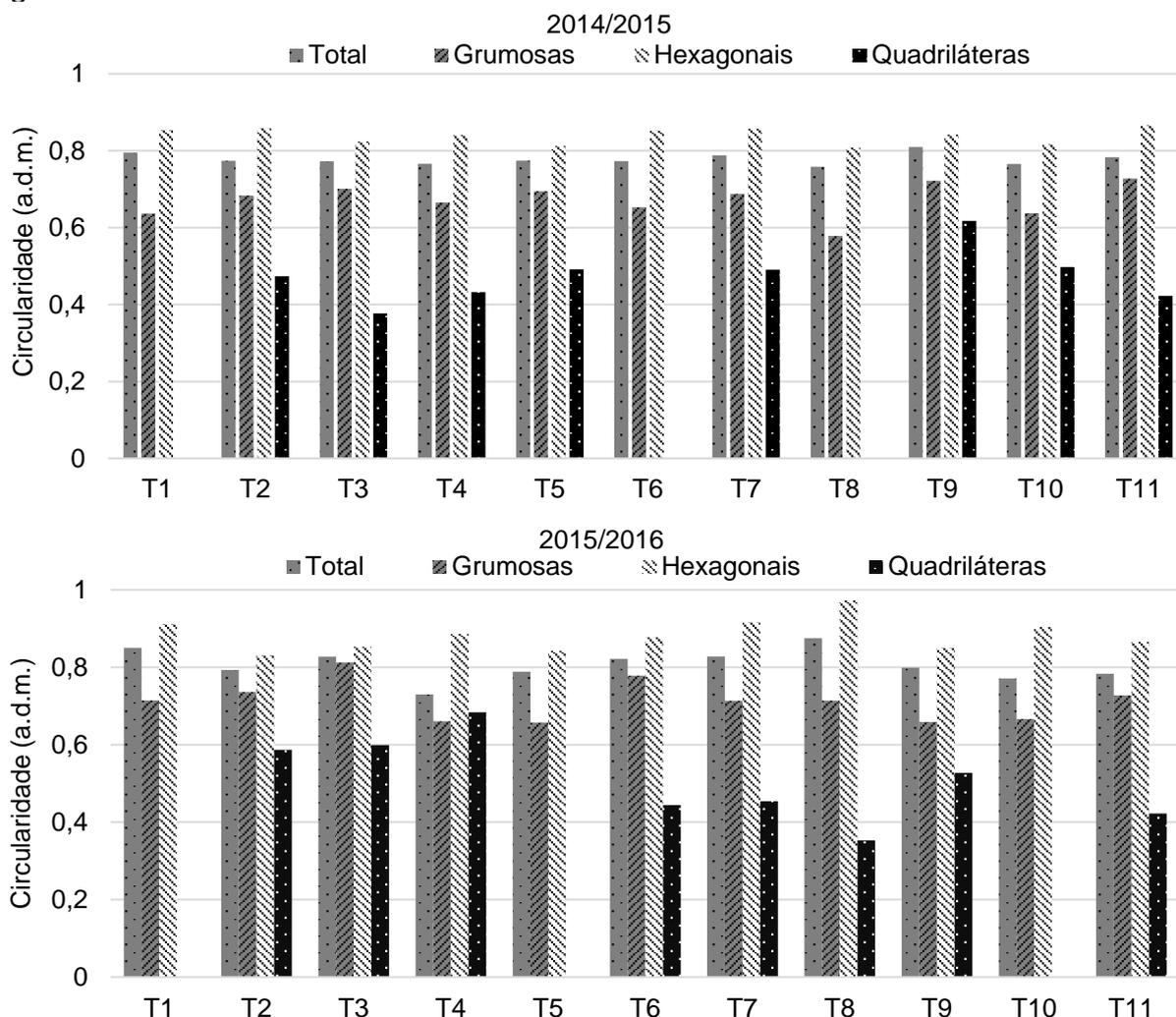
Figura 25 – Médias do perímetro de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.



Fonte: Elaboração do autor.

O perímetro apresentou um comportamento diferente da área, pois não houve a predominância de nenhuma forma de nanopartículas sobre esta característica geométrica. Porém, no segundo ano apresentaram uma maior regularidade do perímetro projetados pelas nanopartículas. Segundo Martins (2013), o perímetro está relacionado não só com o tamanho de uma partícula (quanto maior for o seu tamanho obviamente maior será o seu perímetro) mas também com a forma desta, ou seja, áreas com tamanho similares podem apresentar perímetros muito diferentes. Assim, a variação da regularidade entre a área e o perímetro tem efeito direto sobre circularidade das nanopartículas (Figura 26).

Figura 26 – Médias da circularidade de diferentes nanopartículas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa na camada de 0,00 a 0,05 m, sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, cultivado com arroz e feijão nos anos agrícolas de 2014/15 e 2015/16.



Fonte: Elaboração do autor.

A circularidade média das nanopartículas totais apresentou índice variando entre 0,73 a 0,80 e 0,72 a 0,87, para o primeiro e segundo ano, respectivamente. Esta característica morfológica é usada na nanociência para descrever a forma da nanopartícula e quanto esta se assemelha a uma esfera perfeita que apresenta o índice igual a um (MUSCAS et al., 2015). Esperava-se encontrar um efeito mais pronunciado da circularidade das nanopartículas em função dos tratamentos estudados. Em algumas áreas da nanotecnologia o efeito da circularidade modifica algumas propriedades do material (AHMED et al., 2016).

Assim como a superfície reativa das nanopartículas às formas das partículas pode afetar as propriedades dos agregados formados. Dependendo da forma da partícula seu arranjo pode influenciar na porosidade do agregado formado (TEIXEIRA; COUTINHO; GOMES, 2001). Talvez esta característica morfológica possa apresentar maior variabilidade e influência no comportamento das nanopartículas do solo, quando forem comparadas em diferentes classes de solos, profundidades, mineralogia, entre outras condições.

6.7 Nanopartículas, nanoestruturas e atributos físicos e químicos do solo como indicadores da sua qualidade

Com os resultados da caracterização geométrica das nanopartículas (área, perímetro, circularidade e tamanho), dos atributos químicos (P, K, Ca, Mg, CTC, pH, H + Al, MOS, SB e V) e físicos (Mac, Mic, PT, DS, RP e U), em dois anos agrícolas, foi realizada a análise de componentes principais (ACP), com o objetivo de identificar componentes principais e variáveis correlacionáveis capazes de explicar a origem das maiores variabilidades dos dados e indicar o estado da qualidade do solo.

Com a análise dos componentes principais (ACP) do ano agrícola 2014/2015, identificou-se os componentes responsáveis por explicarem a maior parte da variância total, onde o primeiro reteve 51,81% da variância total, o segundo 18,93 %, o terceiro 14,00 % e o quarto 6,60 %, conforme demonstrado na Tabela 47.

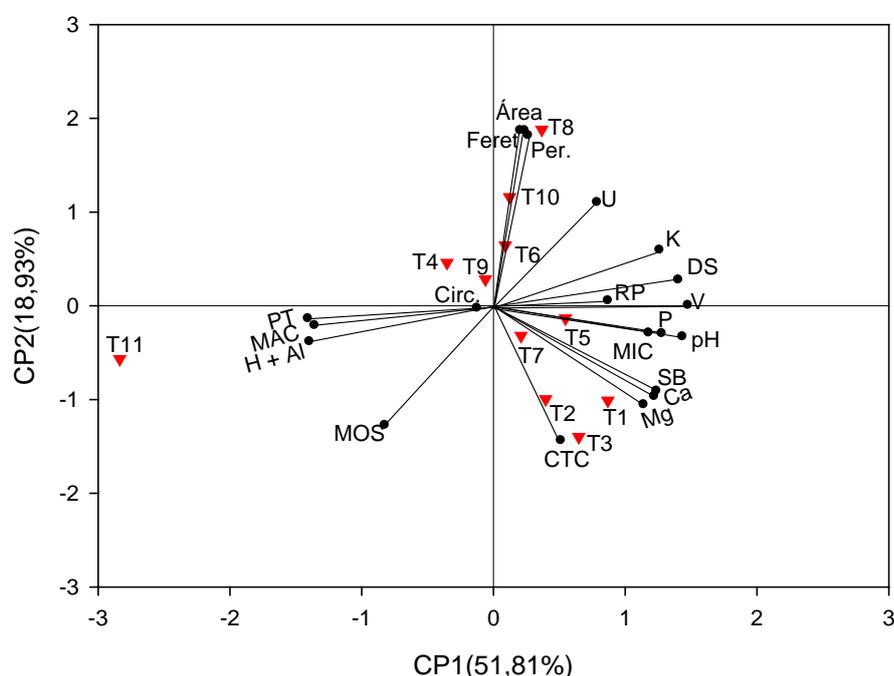
Tabela 47 - Autovalores e porcentagem de variação explicada pelos quatros primeiros componentes principais (CP) e classificação dos coeficientes de correlação entre os indicadores e os componentes principais, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2014/15 e o Cerrado remanescente.

	CP1		CP2		CP3		CP4	
Autovalores (%) explicada	10,36	51,81	3,79	18,93	2,80	14,00	1,32	6,60
Indicadores	Correlação	Posição	Correlação	Posição	Correlação	Posição	Correlação	Posição
Área	0,157	18	0,835	1	0,465	5	0,239	8
Perímetro	0,175	17	0,812	3	0,454	6	0,319	3
Feret	0,135	19	0,835	2	0,441	7	0,289	4
Circ.	-0,083	20	-0,010	19	0,594	2	-0,710	1
P	0,850	7	-0,132	13	0,152	16	-0,005	20
K	0,839	8	0,266	10	0,288	13	-0,175	10
Ca	0,812	10	-0,431	8	0,363	12	0,084	15
Mg	0,759	12	-0,470	7	0,381	9	0,166	11
CTC	0,341	16	-0,641	4	0,653	1	0,163	12
pH	0,955	2	-0,147	12	-0,028	19	-0,108	13
H+Al	-0,929	5	-0,170	11	0,234	14	0,054	16
MOS	-0,549	14	-0,568	5	0,406	8	0,264	7
SB	0,823	9	-0,405	9	0,377	10	0,097	14
V	0,982	1	0,003	20	0,056	18	-0,046	17
MAC	-0,903	6	-0,093	16	0,371	11	-0,023	19
MIC	0,784	11	-0,128	14	-0,472	4	0,276	6
PT	-0,937	3	-0,060	17	0,099	17	0,180	9
DS	0,934	4	0,124	15	-0,175	15	-0,025	18
RP	0,579	13	0,025	18	-0,503	3	0,280	5
U	0,523	15	0,493	6	0,022	20	-0,445	2

Feret: Diâmetro de Feret; Circ.: circularidade P: teor de fósforo; K: teor de potássio; Ca: teor de cálcio; Mg: teor de magnésio; CTC: Capacidade de troca catiônica; pH: Potencial hidrogeniônico; H + Al: Acidez potencial; MOS: Matéria orgânica; SB: Soma de Bases; V: Saturação por bases; Mac: Macroporosidade; Mic: Microporosidade; PT: Porosidade total; DS: Densidade do solo; RP: resistência a penetração; U: umidade do solo a base de massa
Fonte: Elaboração do autor

Apesar dos quatro componentes apresentarem autovalores maiores que um (1), apenas os dois primeiros, conforme ilustrado na Figura 27, foram utilizados para explicar a variação total original, pois apresentaram uma variância acumulada maior que 70 % (HAIR Jr et al., 2005).

Figura 27 - Biplot construído com os dois primeiros componentes principais (CP), apresentando a distribuição dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2014/15 e o Cerrado remanescente.



Fonte: Elaboração do autor

No primeiro componente principal (CP1) os atributos que indicaram a qualidade do solo e que apresentaram os maiores coeficientes de correlação absolutos ($r > 0,5$), foram todos os atributos físicos (Figura 27). A CTC foi o único atributo químico que não atingiu o coeficiente de correlação ($r > 0,5$) e neste componente principal a área de Cerrado remanescente (T11) foi o tratamento que apresentou maior correlação. Para as características geométricas das nanopartículas, nenhuma delas apresentou índices de correlações satisfatórios. Neste CP o destaque entre os atributos químicos foi o V % e entre os físicos o destaque foi a PT, pois estes foram os atributos com maior correlação com o CP.

No CP1, localizado no eixo “y”, foi possível observar efeitos antagônicos entre alguns indicadores de qualidade, tanto físico como químico (Figura 27). Diferente do

que ocorrem com os atributos químicos, os atributos físicos dos solos dos Cerrados, apresentam de modo geral, boas condições naturais para a exploração agrícola (LOURENTE et al., 2011). Pereira et al. (2010a), utilizando a ACP, observaram um efeito similar para atributos físicos do solo em pastagem e mata nativa (Cerrado).

Com esta relação antagônica nos atributos físicos e da disposição espacial dos tratamentos, foi possível analisar a atual condição física do solo, onde fica evidente que o posicionamento oposto do T11 com os demais tratamentos foi provocado pelas interferências das práticas agrícolas (CARNEIRO et al., 2013; SOUZA; ALVES, 2003).

Para os atributos químicos, o efeito antagônico das variáveis indicadoras de qualidade química foi mais evidente entre (H + Al) e com os atributos pH, V, P, Ca, Mg, SB e K. Esta relação antagônica formada foi impulsionada principalmente pela área de Cerrado remanescente (T11), onde a maioria dos indicadores químicos de qualidade do solo apresentou valores inferiores as demais áreas. Este efeito descreve bem as características naturais de solo situados no bioma Cerrado, os quais apresentam baixa fertilidade (LOPES; GUILHERME, 2016).

No segundo componente principal (CP 2) localizado no eixo "x", apenas a CTC, MOS e as características geométricas das nanopartículas, área, perímetro e tamanho (Feret), apresentaram um coeficiente de correlação satisfatório ($r > 0,5$) (Figura 27). A área manejada com a cobertura vegetal de milho sobre escarificação (T8) apresentou maior correlação com as características geométricas.

Neste CP2 é possível verificar um comportamento antagônico entre características geométricas das nanopartículas e os atributos químicos MOS e CTC, indicando que a medida que reduz estes atributos químicos ocorre aumento das dimensões das nanopartículas (Figura 27). Segundo Pédro et al. (2011), a MOS, em especial os ácidos húmicos, interfere no tamanho de nanopartículas de óxidos de ferro. Deste modo, dependendo da composição mineralógica das nanopartículas o seu tamanho poder ser uma ferramenta secundária para avaliação da qualidade solo, especialmente sobre o ponto de vista dos mecanismos relacionados na formação de carga.

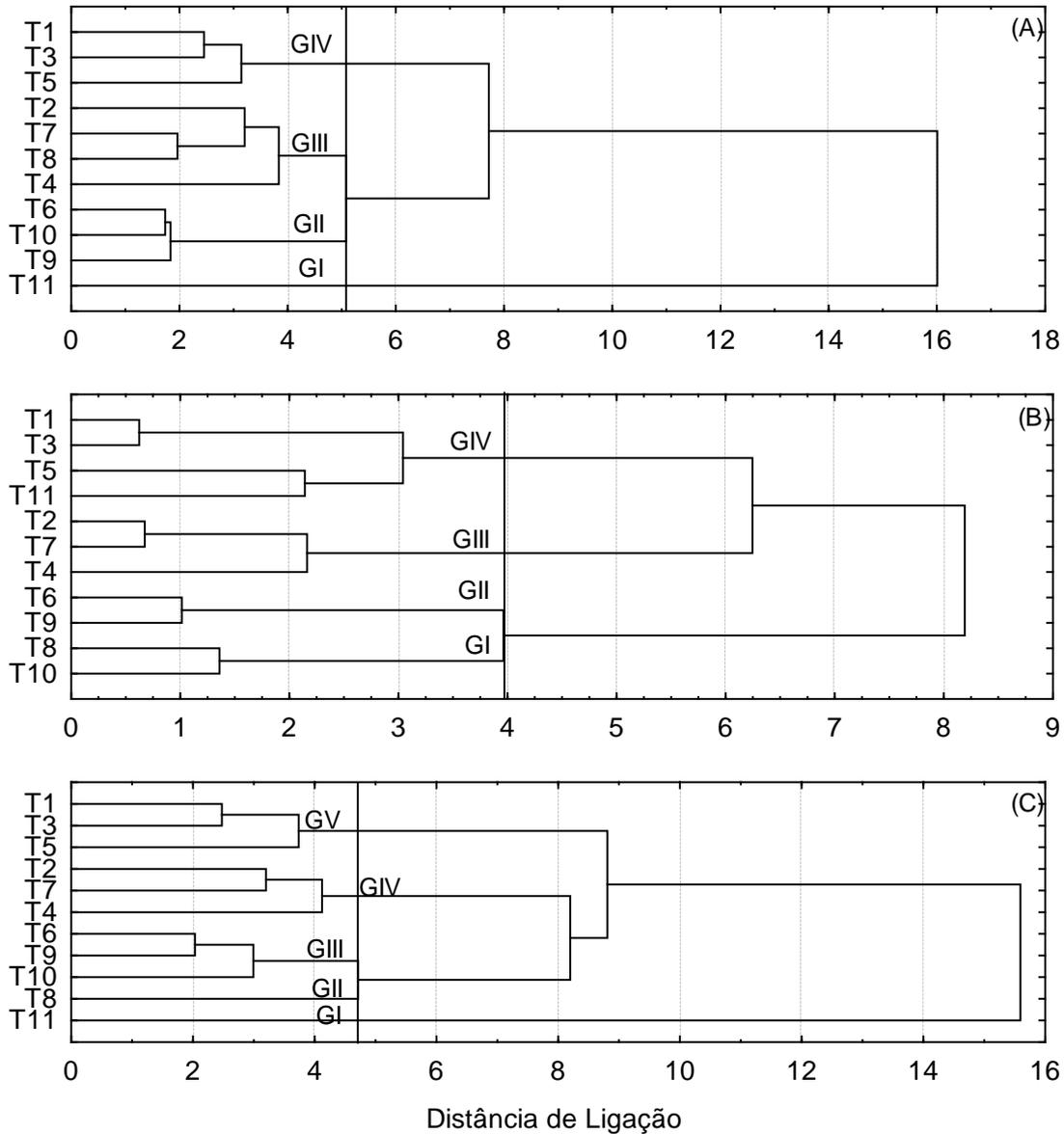
No entanto, apesar de não ser representado graficamente pelo Biplot (Figura 27) o CP3 é possível verificar que apenas a CTC, Circ e RP apresentaram um coeficiente de correlação maior que 0,5 (Tabela 47). As cargas positivas dos coeficientes foram exibidas na CTC e na Circ e a negativa para RP, o que indica que

com o aumento da CTC as nanopartículas apresentaram uma menor RP. Como exposto pelo CP2, que a MOS e a CTC são atributos químicos correlacionados, é possível que o efeito da CTC sobre a RP na verdade seja devido ao aumento da MOS, tendo em vista que a influência deste atributo sobre a RP é algo conhecido (ANDRADE; STONE; GODOY, 2013; RIBON; TAVARES FILHO, 2008; SOUZA; ALVES, 2003).

Juntamente com o aumento da CTC as nanopartículas apresentam geometria mais circular, o que implica no menor contato entre as nanopartículas, assim aumentando os espaços vazios entre as partículas ao serem agregadas, conseqüentemente implicará em estruturas de maior escala com menor resistência do material. Deste modo é possível que a circularidade seja uma ferramenta suplementar com sensibilidade para monitorar os mecanismos que pode influenciar a dinâmica deste atributo físico do solo.

Após análise dos resultados da ACP, aplicou-se a análise de agrupamento hierárquico(AAH) com as variáveis que apresentaram coeficientes de correlação ($r > 0,5$) para o CP1 (Figura 28- A), o CP2 (Figura 28- B), e os dois simultaneamente (Figura 28- C).

Figura 28 - Dendrograma de similaridade entre os tratamentos em função dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, discriminantes ($r > 0,5$) do CP1 (A); CP2 (B); CP1 CP2 (C), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2014/15 e o Cerrado remanescente.



Fonte: Elaboração do autor

No CP1 as variáveis discriminantes ($r > 0,5$), apresentaram a formação de quatro grupos (Figura 28 -A), evidenciando que a área de Cerrado não apresentou nenhuma similaridade com qualquer outro tratamento. Esta situação foi influenciada pelos indicadores de qualidade química e física, os quais apresentaram grande variação em relação ao T11 com os demais tratamentos. Com a análise de agrupamento, verificou-se que, os tratamentos T6, T9 e T10 que formam o grupo *GII* são os que apresentam maiores similaridades entre si e os que mais foram influenciados positivamente pelos

indicadores físicos. O T6 apresentou melhores resultados para os atributos físicos, dando destaque para a redução da densidade do solo o que evidencia o efeito da escarificação com uso da *Crotalaria juncea*. Estes resultados corroboram com os de Pacheco et al. (2015) ao destacar a ação da *Crotalaria juncea* em condição de compactação e com Seki et al. (2015), os quais observaram o efeito benéfico da escarificação sobre a densidade do solo.

O grupo *G/V* composto por T1, T3 e T5 apresentou valores relevantes em relação aos atributos químicos especialmente em relação a CTC e MOS. Rosa et al. (2017), sugerem que o aumento da fertilidade do solo com o uso de plantas de cobertura está relacionado com o teor de ácidos fúlvicos na MOS.

Na AAH com as variáveis discriminantes ($r > 0,5$) presentes no CP2, foi identificada a formação de quatro grupos (Figura 28-B), destacando-se o *G/V*, o qual possui como membros o Cerrado remanescente e os tratamentos T1, T3 e T5. Até então os atributos indicadores de qualidades físicas e químicas não tinham conseguido identificar características que estiverem ocorrido em virtude das práticas de manejo adotadas pelos tratamentos e que fossem similares com o Cerrado remanescente. A formação deste grupo foi possível em função da análise das características geométricas das nanopartículas. Como já mencionado a MOS influencia no tamanho das nanopartículas, além disso as substâncias orgânicas apresentam interação com nanopartículas inorgânicas, o que é fundamental para o processo de estabilização do carbono orgânico (ADHIKARI; YANG, 2015; PÉDROT et al., 2011; SCHNEIDER et al., 2010).

Outro ponto de destaque é a relação entre a CTC, MOS e das características geométricas das nanopartículas, pois quando há um acréscimo de MOS ocorre redução do tamanho da nanopartícula e concomitantemente um aumento da CTC. Este comportamento leva a crer, que com a redução do tamanho, ocorre um aumento da área superficial da nanopartícula, fazendo com que a MOS presente se associe com maior facilidade à superfície da nanopartícula como proposto por Calabi-Floody et al. (2011). Vale ressaltar que nos tratamentos onde ocorreu a escarificação do SPD a MOS pode ter apresentado uma maior oxidação em relação aos demais tratamentos.

Ao agrupar as variáveis discriminantes dos dois componentes principais ocorreu a formação de cinco grupos (Figura 28-C), evidenciando novamente que o Cerrado remanescente não apresenta similaridade com nenhum outro tratamento em virtude

dos atributos químicos e físicos. Neste mesmo sentido o tratamento T8, apresentou um desempenho isolado muito em função da geometria das nanopartículas e os menores teores MOS e SB. Deste modo, neste ano agrícola os tratamentos sem sucessão de *Crotalaria juncea*, *Pennisetum glaucum* e *Urochloa ruziziensis* (*Syn. Brachiaria ruziziensis*) sem escarificação, foram as que apresentaram desempenhos mais regulares sobre os atributos físicos e químicos e, mostrando ainda que apresentaram similaridade em função das características geométricas de suas nanopartículas com o cerrado remanescente.

Com a ACP do ano agrícola 2015/2016, foi possível identificar os componentes responsáveis por explicarem a maior parte da variância total, onde o primeiro reteve 50,31% da variância total, o segundo 22,47 %, o terceiro 11,74% e o quarto 7,06 %, conforme demonstrado na Tabela 48.

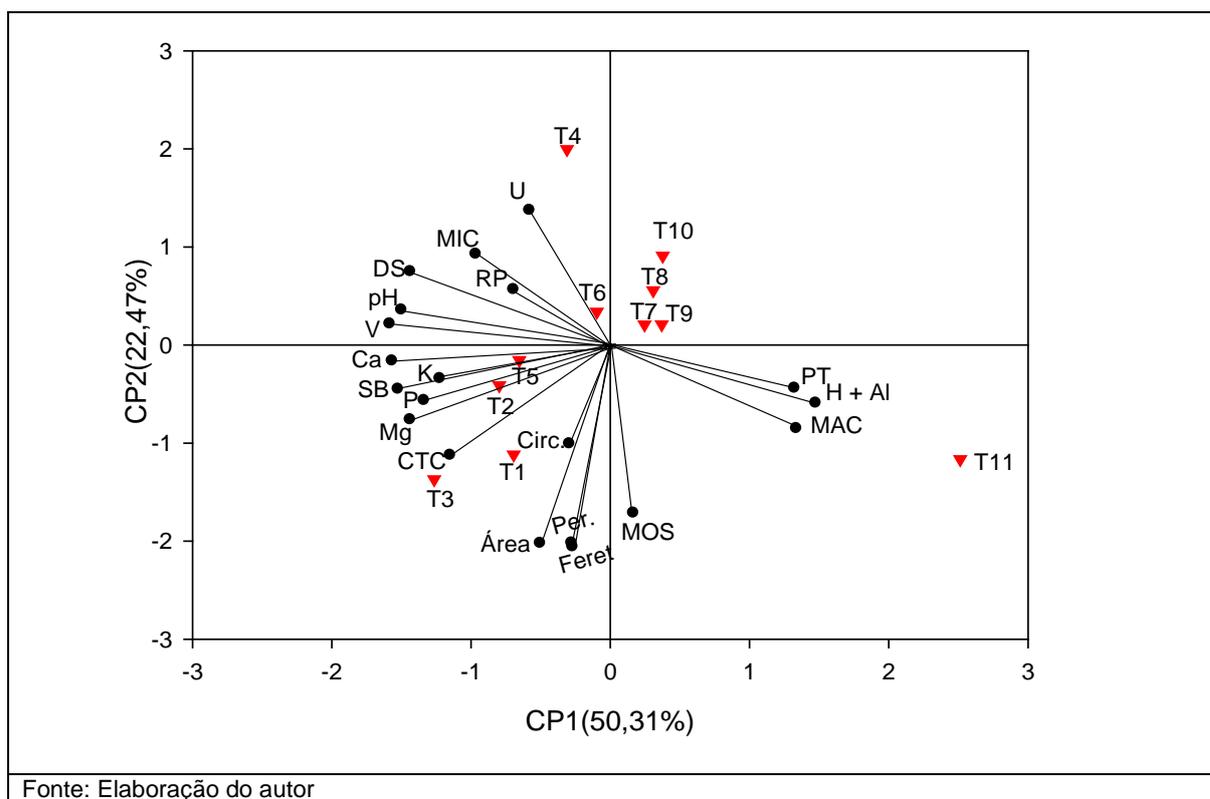
Tabela 48 - Autovalores e porcentagem de variação explicada pelos quatro primeiros componentes principais (CP) e classificação dos coeficientes de correlação entre os indicadores e os componentes principais, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2015/16 e o Cerrado remanescente.

	CP1		CP2		CP3		CP4	
Autovalores	10,06		4,49		2,35		1,41	
(%) explicada	50,31		22,47		11,74		7,06	
Indicadores	Correlação	Posição	Correlação	Posição	Correlação	Posição	Correlação	Posição
Área	-0,312	16	-0,876	2	-0,324	9	0,055	17
Perímetro	-0,172	18	-0,875	3	-0,340	6	0,011	20
Feret	-0,167	19	-0,892	1	-0,338	7	0,032	19
Circ,	-0,182	17	-0,436	7	-0,656	2	-0,143	12
P	-0,828	8	-0,244	14	-0,216	12	0,359	4
K	-0,758	11	-0,148	18	0,470	3	0,067	16
Ca	-0,970	2	-0,069	20	0,162	13	-0,085	15
Mg	-0,890	6	-0,329	10	0,218	11	-0,133	13
CTC	-0,712	12	-0,487	6	0,335	8	-0,348	5
pH	-0,928	4	0,155	17	0,025	19	0,223	10
H+Al	0,913	5	-0,256	12	-0,016	20	-0,280	8
MOS	0,103	20	-0,742	4	0,458	4	-0,360	3
SB	-0,944	3	-0,195	15	0,232	10	-0,089	14
V	-0,981	1	0,094	19	0,120	14	0,054	18
MAC	0,827	9	-0,369	9	0,088	16	0,293	6
MIC	-0,597	13	0,402	8	-0,063	18	-0,650	1
PT	0,819	10	-0,190	16	0,087	17	-0,274	9
DS	-0,889	7	0,325	11	-0,096	15	0,285	7
RP	-0,430	14	0,246	13	-0,818	1	-0,185	11
U	-0,359	15	0,596	5	-0,390	5	-0,374	2

Feret: Diâmetro de Feret; Circ.: circularidade P: teor de fósforo; K: teor de potássio; Ca: teor de cálcio; Mg: teor de magnésio; CTC: Capacidade de troca catiônica; pH: Potencial hidrogeniônico; H+Al: Acidez potencial; MOS: Matéria orgânica; SB: Soma de Bases; V: Saturação por bases; Mac: Macroporosidade; Mic: Microporosidade; PT: Porosidade total; DS: Densidade do solo. RP: resistência a penetração; U: umidade do solo a base de massa
Fonte: Elaboração do autor

Mesmo com quatro componentes de variação apresentando autovalores maiores que 1, apenas os dois primeiros, conforme ilustrado na Figura 29, foram utilizados para explicar a variação total original, pois apresentaram uma variância acumulada maior que 72,78 %, valor acima do recomendado (HAIR Jr et al., 2005).

Figura 29 - Biplot construído com os dois primeiros componentes principais (CP), apresentando a distribuição dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,00 a 0,05 m, no ano agrícola de 2015/16 e o Cerrado remanescente.



No CP1, dos atributos que indicaram a qualidade do solo e que apresentaram os maiores coeficientes de correlação absolutos ($r > 0,5$), apenas a RP e U que não atingiram este limite de classificação. Entre os atributos químicos a CTC foi o único que não atingiu o coeficiente de correlação ($r > 0,5$) e neste componente principal a área de Cerrado remanescente (T11) foi o tratamento que apresentou maior correlação, assim como no primeiro ano. Para as características geométricas das nanopartículas, nenhuma delas apresentaram índices de correlações satisfatórios.

Neste CP os atributos de maior importância os químicos foi V e entre os físicos o foi a DS, pois estes foram os atributos com maior correlação com o CP (Figura 29). No segundo ano agrícola o CP1, localizado no eixo “y”, apresentou um

comportamento antagônico entre alguns indicadores de qualidade, tanto físico como químico, similar ao que ocorreu no primeiro ano.

No CP2 localizado no eixo “x”, apenas a CTC, U e as características geométricas das nanopartículas, área, perímetro e tamanho (diâmetro de Feret), apresentaram um coeficiente de correlação satisfatório ($r > 0,5$). A área manejada com a cobertura vegetal de milho com escarificação (T8) apresentou maior correlação com as características geométricas.

Verificou-se no CP2 um comportamento antagônico entre características geométricas das nanopartículas e o atributo químico MOS e físico U, indicando que a medida que reduz este atributo químico ocorre aumento da U. Este efeito está associado ao fato de que com redução da MOS em alguns tratamentos, ocorreu o aumento da Mic, onde movimentos de água e ar são afetados, diminuindo, dessa forma, a drenagem interna do solo (SOUZA; ALVES, 2003), consequentemente interferindo na U.

Os tratamentos T4, T7, T8, T9 e T10 apresentaram uma dispersão antagônica entre a MOS e as características geométricas, este comportamento parece não estar associado apenas a redução da MOS, mas também a qualidade desta MOS, pois estes tratamentos destacaram-se na espectrometria de infravermelho (Figura 17), por não apresentar bandas típicas de grupos alifáticos e ácidos carboxílicos. Segundo Adhikari e Yang (2015), nas hematitas o mecanismo envolvido na interação com MOS, ocorre por meio da formação de aglomerados esféricos complexos, onde a parte alifática da MOS fica localizada internamente no aglomerado, envolvida por hematitas e a parte aromática fica adsorvida externamente a superfície destes óxidos de Fe, deste modo as proporções deste grupos orgânicos podem influenciar o tamanho das nanopartículas não apenas em hematitas assim como nos demais minerais presentes.

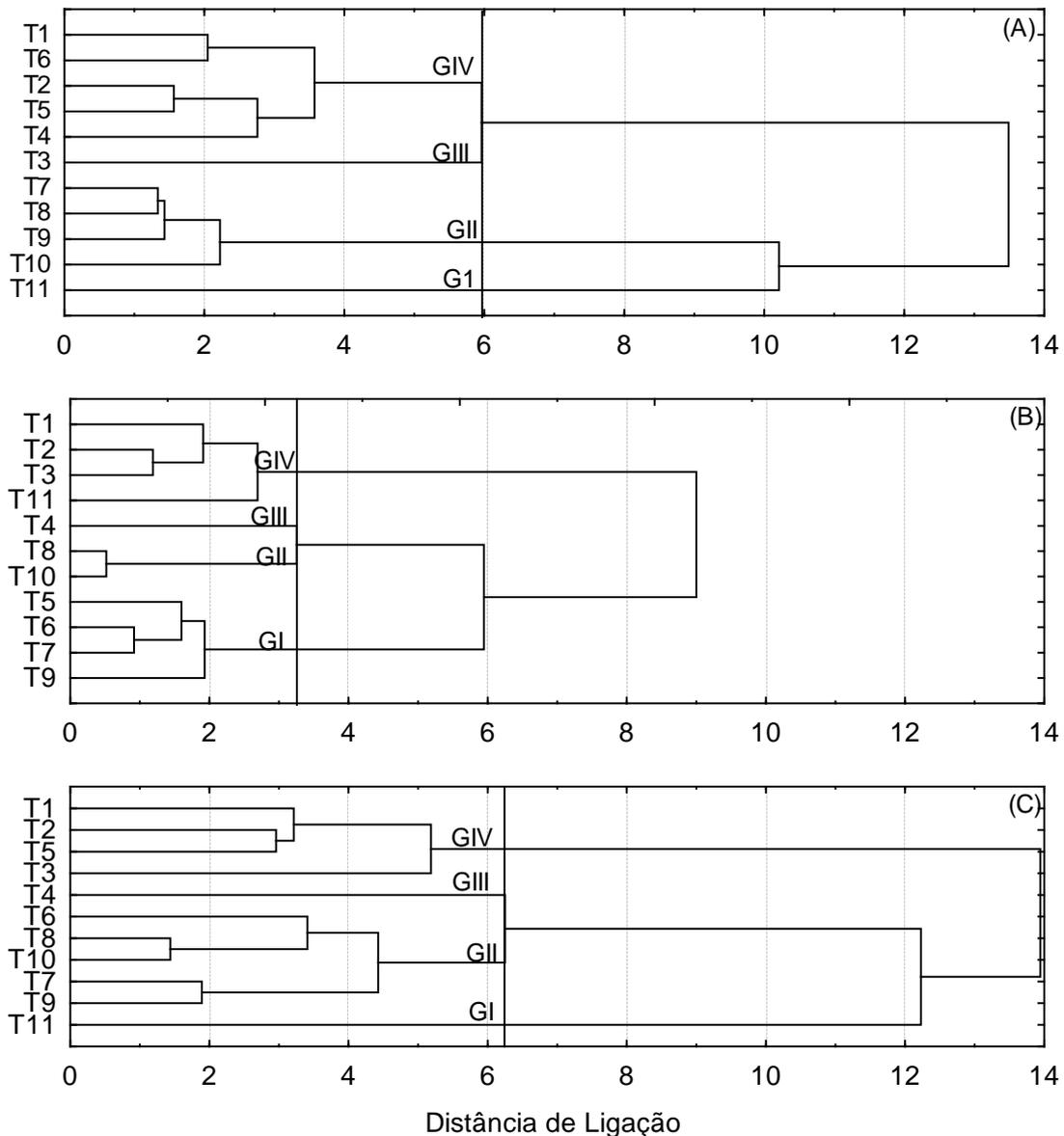
Além dos efeitos supracitados na interação organomineral, a composição da MOS pode oferecer informações capazes de descrever o comportamento entre a MOS e a U. Segundo Matějková e Šimon, (2012), os grupos alifáticos (C-H) presentes na MOS são de caráter hidrofóbico, enquanto os grupos carboxílicos (C-O) possuem caráter hidrofílico, assim acredita-se que a ausência destes hidrofóbicos, contribuíram na retenção de água no solo aumentando a U.

Apesar de não ser representado graficamente pelo Biplot (Figura 29) o CP3 é possível verificar que apenas a Circ e a RP apresentaram um coeficiente de correlação maior que 0,5 (Tabela 48). A ausência destes grupos de alifáticos pode ter afetado a

Circ, e a RP apresentou redução em função do aumento da U em consequência dos efeitos dos grupos alifáticos.

Após análise dos resultados dos componentes principais, aplicou-se a análise de agrupamento hierárquico com as variáveis que apresentaram coeficientes de correlação significativos ($r > 0,5$) para o primeiro componente (Figura 30- A), o segundo componente (Figura 30- B), e os dois simultaneamente (Figura 30- C).

Figura 30 - Dendrograma de similaridade entre os tratamentos em função dos atributos físicos, químicos e das características geométricas das nanopartículas, discriminantes ($r > 0,5$) do CP1 (A); CP2 (B); CP1 CP2 (C), após a sucessão de arroz e feijão sobre o efeito da escarificação e de plantas de cobertura, na camada de 0,0 a 0,05 m, no ano agrícolas de 2015/16 e o Cerrado remanescente.



Fonte: Elaboração do autor

No primeiro componente principal as variáveis discriminantes ($r > 0,5$), apresentaram a formação de quatro grupos (Figura 30 -A), evidenciando que a área de Cerrado não apresentou nenhuma similaridade com qualquer outro tratamento. Com a análise de agrupamento, verificou-se que, os tratamentos T7, T8, T9 e T10 que formam o grupo *GII* são os que apresentam maiores similaridades entre si e foram os que mais influenciaram positivamente os indicadores físicos e químicos. Neste grupo o destaque foi T10 que apresentou melhores desempenhos para os atributos físicos, dando destaque para a redução da densidade do solo, o que evidencia o efeito da escarificação com uso da *Urochloa ruziziensis* (*Syn. Brachiaria ruziziensis*). Estes resultados corroboram com os de Calonego et al. (2011) ao destacar ação da *Urochloa ruziziensis* (*Syn. Brachiaria ruziziensis*) em condição de compactação.

No grupo *GIV* os tratamentos T1, T2 e T5 apresentaram destaques devido os valores relevantes em relação aos atributos químicos, especialmente em relação a CTC e MOS. Rosa et al. (2017), sugerem que o aumento da fertilidade do solo com o uso de plantas de cobertura está relacionado com o teor de ácidos fúlvicos na MOS.

No CP2 teve a formação de quatro grupos (Figura 30 - B), destacando-se o *GIV*, o qual apresentava como membros o Cerrado remanescente e os tratamentos T1, T3 e T5. A formação deste grupo possibilita verificar que os tratamentos T1, T3 e T5 apresentam similaridade com a área do Cerrado remanescente (T11). Outro ponto de destaque é a relação entre a MOS e as características morfológicas das nanopartículas, pois quando há um acréscimo de MOS ocorre redução do tamanho da nanopartícula e concomitantemente um aumento da CTC. Este comportamento leva a crer, que com a redução do tamanho, ocorre um aumento da área superficial da nanopartícula, fazendo com que a MOS presente se associe com maior facilidade à superfície da mesma como proposto por Calabi-Floody et al. (2011). Vale ressaltar que nos tratamentos onde ocorreu a escarificação do SPD a MOS pode ter apresentado uma maior oxidação em relação aos demais tratamentos.

Ao agrupar as variáveis discriminantes dos dois componentes principais ocorreu a formação de cinco grupos (Figura 30 -C), evidenciando novamente que o Cerrado remanescente não apresenta similaridade com nenhum outro tratamento. Efeito similar de isolamento ocorreu com T4, devido à diferença de suas características geométricas com os demais tratamentos.

Deste modo, neste ano agrícola o solo com o tratamento em sucessão de *Pennisetum glaucum* sem escarificação (T3), foi o que apresentou um melhor

desempenho referente aos atributos físicos e químicos mais estável em relação aos demais tratamentos e, mostrando ainda similaridade entre a geometria de sua nanopartículas com o cerrado remanescente, o qual se apresenta como uma potencial ferramenta complementar na avaliação da qualidade do solo. Vale ressaltar que este mesmo tratamento tinha apresentado comportamento idêntico no primeiro ano de cultivo, o que demonstra que este tratamento possui um desempenho constante e estável para a recuperação da qualidade do solo.

Ao empregar-se as técnicas de análises multivariadas como ferramenta na interpretação dos resultados foi possível notar que apenas os indicadores físicos e químicos de qualidade do solo não possuem sensibilidade necessária para verificar pequenas mudanças ocasionadas pelos sistemas de cultivos.

7 CONSIDERAÇÕES GERAIS

- i) A sustentabilidade do sistema de produção do arroz de “terras altas” e “feijão de inverno”, pode ter sido comprometida em função da sucessão destas culturas durante quatro anos. O que pode ter possibilitado a ocorrência de distúrbios nutricionais e/ou de alelopáticos e fitopatogênicos afetando diretamente a produção. Desta forma a rotação de culturas com outras espécies poderá desempenhar um papel fundamental na manutenção da sustentabilidade do sistema de produção.
- ii) As técnicas de FTIR e EDS foram essenciais na caracterização química das nanopartículas e nanoestruturas naturais do solo, porém, a aplicação de outras técnicas de caracterização empregadas na nanociência poderá contribuir para o avanço das pesquisas envolvendo a ciência do solo.
- iii) O uso de técnicas de análises multivariadas, possibilita avaliar a sustentabilidade do sistema, pois consegue analisar diversos indicadores de qualidade do solo de forma conjunta.

8 CONCLUSÕES

- 1) As plantas de cobertura e a escarificação não influenciaram a produtividade do arroz de “terras altas” e do feijão de “inverno” após dois anos de cultivo.
- 2) O estudo das nanopartículas e nanoestruturas mostrou-se sensível as alterações promovidas pelo uso da escarificação e das plantas de cobertura, apresentando assim potencial para ser uma ferramenta suplementar indicadora de qualidade do solo.
- 3) O fósforo (P) foi o atributo químico mais influenciado pelas práticas de manejo pela sucessão com *Pennisetum glaucum* sem escarificação nas duas camadas superficiais e nas demais camadas pela sucessão *Urochloa ruziziensis* (Syn. *Brachiaria ruziziensis*).
- 4) Os atributos físicos e químicos do solo combinados com a caracterização de nanopartículas permitiram identificar que o milheto (*Pennisetum glaucum*) sem escarificação como mudanças estáveis para a manutenção do SPD.
- 5) As características geométricas e químicas das nanopartículas auxiliam na identificação de mudanças causadas pelas práticas de manejos sobre os indicadores físicos e químicos da qualidade do solo.
- 6) As plantas de cobertura contribuíram para a manutenção do SPD, pois atua diretamente na produção e preservação de MOS. Assim a MOS contribuiu para a melhoria dos atributos químicos, físicos e influenciaram o comportamento das nanopartículas e nanoestrutura do solo.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J. A. A. et al. Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 5, p. 801–809, 2014.
- ADELEKE, R.; NWANGBURUKA, C.; OBOIRIEN, B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: a review. **South African Journal of Botany**, Pretoria, v. 108, p. 393–406, 2017.
- ADHIKARI, D.; YANG, Y. Selective stabilization of aliphatic organic carbon by iron oxide. **Scientific Reports**, London, v. 5, p. 11214, 2015.
- AHMAD, T.; ALI, Z.; MAHMOOD, H. S. Factors Causing Low Head Rice Recovery in Combine-Harvested Paddy Tanveer. **Science, Technology and Development**, Islambad, v. 36, n. 2, p. 84–90, 2017.
- AHMED, B. et al. Shape induced (spherical, sheets and rods) optical and magnetic properties of CdS nanostructures with enhanced photocatalytic activity for photodegradation of methylene blue dye under ultra-violet irradiation. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 679, p. 324–334, 2016.
- ALVES, C. J. et al. Thidiazuron aumenta a produtividade em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 3, p. 333–339, 2015.
- ALVES, M. C.; CARVALHO, M. P.; SOUZA, E. J. Manejo do solo. In: ARF, O. et al. (Ed.). **Aspectos gerais da cultura do feijão Phaseolus vulgaris L.** 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2015. p. 39–63.
- ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. de. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2505–2516, 2009.
- AMB, M. K.; AHLUWALIA, A. S. Allelopathy : potential role to achieve new milestones in rice cultivation. **Rice Science**, Hangzhou, v. 23, n. 4, p. 165–183, 2016.
- ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F.; GODOY, S. G. de. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 9, p. 932–937, 2013.
- ARAUJO, M. A. et al. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 495–504, 2004.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.
- ARAÚJO, E. A. de. et al. Qualidade do solo : conceitos , indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 187–196, 2012.
- ARCHANJO, B. S. et al. Nanoscale analyses of the surface structure and

composition of biochars extracted from field trials or after co-composting using advanced analytical electron microscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 294, p. 70–79, 2017.

ARF, O. et al. Manejo do solo, água e nitrogênio no cultivo de feijão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 2, p. 131–138, 2004.

ARF, O. et al. Espaçamento e adubação nitrogenada afetando o desenvolvimento do arroz de terras altas sob plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 5, p. 475–482, 2015.

ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de latossolo vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 425–435, 2005.

ASSIS, R. L. de. et al. Avaliação Da Resistência Do Solo À Penetração Em Diferentes Solos Com a Variação Do Teor De Água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558–568, 2009.

AXE, L.; TRIVEDI, P. Intraparticle Surface Diffusion of Metal Contaminants and their Attenuation in Microporous Amorphous Al, Fe, and Mn Oxides. **Journal of Colloid and Interface Science**, New York, v. 247, n. 2, p. 259–265, 2002.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. **Solos e ambiente**: uma introdução. Santa Maria: Pallotti, 2006.

BLUMENTHAL, J. D. M. et al. Importance and effect of nitrogen on crop quality and health. **Nitrogen in the environment**: source, problems and management. 2.ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 51–70.

BONNIN, J. J.; LANÇAS, K. P.; AVALOS, J. M. M. Índice de cone, capacidade de suporte de carga e teor de água de um latossolo vermelho: correlações e mapas de isocompactação. **Energia na Agricultura**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 60, 2012.

BORGES, W. L. B. et al. Supressão de plantas daninhas utilizando plantas de cobertura do solo. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 755–763, 2014.

BORGES, W. L. B. et al. Alterações físicas em Latossolos cultivados com plantas de cobertura em rotação com soja e milho. **Revista Brasileira de Ciencias Agrarias**, Recife, v. 11, n. 3, p. 149–155, 2016.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, London, v. 26, n. 2, p. 211–252, 1964.

BRANDÃO, S. L. pH E condutividade elétrica em solução do solo , em áreas de pinus e cerrado na chapada , em Uberlândia (MG). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 3, n. 6, p. 46–56, 2002.

BRASIL. Instrução normativa nº 12, de 29 de março de 2010. Brasil. **Diário oficial da União**, Brasília, DF, 2010. p. 4.

BRAVARD, S.; RIGHI, D. Characteristics of clays in an Oxisol-Spodosol toposequence in Amazonia (Brazil). **Clay Minerals**, London, v. 23, p. 279–289, 1988.

CADIOLI, L. P.; SALLA, L. D. Nanotecnologia : um estudo sobre seu histórico , definição e principais aplicações desta inovadora tecnologia. **Revista Ciências Exatas e Tecnologia**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 98–105, 2006.

CALABI-FLOODY, M. et al. Nanoclays from an Andisol: Extraction, properties and carbon stabilization. **Geoderma**, Amsterdam, v. 161, n. 3–4, p. 159–167, 2011.

CALABI-FLOODY, M. et al. Role of nanoclays in carbon stabilization in andisols and cambisols. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 15, n. 3, p. 587–604, 2015.

CALONEGO, J. C. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura em solo compactados. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 289–296, 2011.

CALONEGO, J. C. et al. Persistence and nutrient release from maize, brachiaria and lablab straw. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 5, p. 770–781, 2012.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 789–796, 2005.

CAMARGO, L. A. et al. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. I - mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 2269–2277, 2008.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos indicadores de qualidade em solos de cerrado no entorno do parque nacional das emas, Goiás. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 6, p. 1857–1868, 2013

CARVALHO, A. M. de et al. Characterization of cover crops by NMR spectroscopy : impacts on soil carbon , nitrogen and phosphorus under tillage regimes. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 5, p. 968–975, 2014.

CARVALHO, V. S. de et al. Caracterização de espodosolos dos estados da paraíba e do pernambuco, nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1454–1463, 2013.

CASAGRANDE, J. C. et al. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 51–59, 2003.

CASTRO, A. P. de et al. **BRS esmeralda**: cultivar de arroz de terras altas com elevada produtividade e maior tolerância à seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2014.

CAVALCANTE, V. S. et al. Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 521–528, 2012.

CAZETTA, D. A.; FORNASIERI FILHO, D.; GIROTTO, F. Composição , produção de matéria seca e cobertura do solo em cultivo exclusivo e consorciado de milho e crotalária. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 4, p. 575–580, 2005.

CEMPEL, M.; NIKEL, G. Nickel: A review of its sources and environmental toxicology. **Polish Journal of Environmental Studies**, Philadelphia, v. 15, n. 3, p. 375–382, 2006.

CESSA, R. M. A. et al. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1153–1162, 2009.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 331, n. 1, p. 31–43, 2010.

CLAUDIO, C. et al. Iron oxide nanoparticles in soils: environmental and agronomic importance. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Steven Ranch, v. 17, n. 7, p. 4449–4460, 2017.

CLOYD, R. A.; BETHKE, J. A. Impact of neonicotinoid insecticides on natural enemies in greenhouse and interiorscape environments. **Pest Management Science**, West Sussex, v. 67, n. 1, p. 3–9, 2011.

COELHO, S. P. et al. Coberturas vegetais na supressão de plantas daninhas em sistema de plantio direto orgânico de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoa, v. 15, n. 1, p. 65–72, 2016.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11, p. 1663–1674, 2006.

CORRÊA, M. M. et al. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1017–1031, 2008. a.

CORRÊA, M. M. et al. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular e ácidos húmicos e alterações em algumas propriedades físicas e químicas de Latossolos, Plintossolo e Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 121–131, 2008b.

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

COSTA, N. R. et al. Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1223–1233, 2014.

COSTA, W. A. J. M.; SANGAKKARA, U. R. Agronomic regeneration of soil fertility in tropical Asian smallholder uplands for sustainable food production. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 144, n. 2, p. 111–133, 2006.

CUNHA, E. de Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. i - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 589–602, 2011.

DADALTO, J. P. et al. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 4430, n. 31, p. 506–513, 2015.

DALMAGO, G. a. et al. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 54, p. 855–864, 2009.

DALMORA, A. C. et al. Chemical characterization, nano-particle mineralogy and particle size distribution of basalt dust wastes. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 539, p. 560–565, 2016.

DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**. Piracicaba: Esalq, 1980. 44 p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201–214, 2004.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994. p. 3–21.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1713–1722, 2011.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 2, p. 159–168, 2016.

DUHAN, J. S. et al. Nanotechnology : the new perspective in precision agriculture. **Biotechnology Reports journal**, v. 15, n. 6, p. 11–23, 2017.

DUTTA, J. **Soil quality indexing of an acid alfisol under maize-wheat cropping system as influenced by continuous use of chemical fertilizers and soil amendments**. 2013.189 f. Tese (Doutorado) - CSK Himachal Pradesh Krishi Vishavavidyalaya, Palampur, 2013.

EBERHARDT, D. N. et al. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1009–1016, 2008.

EDWARDS, A. P.; BREMMER, J. M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 47–63, 1967.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; BAILEY, B. A. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, p. 2733–2757, 2005.

- FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Influence of pH on productivity, nutrient use efficiency by dry bean, and soil phosphorus availability in a no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 7–8, p. 1016–1025, 2008.
- FENG, W.; KLAMINDER, J.; BOILY, J.-F. Thermal stability of goethite-bound natural organic matter is impacted by carbon loading. **The Journal of Physical Chemistry A**, Washington, v. 119, n. 51, p. 12790–12796, 2015.
- FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. do C. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1860–1870, 2009.
- FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: QUIRIJN DE JONG, V. L. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, 2010. V. 1, p. 1–27.
- FLYNN, E. D.; CATALANO, J. G. Competitive and cooperative effects during nickel adsorption to iron oxides in the presence of oxalate. **Environmental Science and Technology**, Easton, v. 51, n. 17, p. 9792–9799, 2017.
- FOLONI, J. S. S. et al. Availability of phosphorus in soil and straw in successive tropical grasses crop fertilized with different phosphates. **Journal of Agronomy**, Madison, v. 15, n. 3, p. 104–113, 2016.
- FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L. De; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 49–57, 2006.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. de; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 627–646, 2001.
- FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 2006.
- FRANCHINI, J. C.; PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M. Redistribution of Phosphorus in Soil Through Cover Crop Roots. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 3, p. 381–386, 2004.
- FRANCISCO, A. C. A.; TEIXEIRA, A. M. R. de F. Estudo de alguns polimorfos de carbonato de cálcio : obtenção e caracterização. In: Reunião anual da sociedade brasileira de química, 31., 2008, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia. 2008.
- FREDDI, O. D. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 627–636, 2007.
- FREITAS, L. de et al. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências**, Marília, v. 26, n. 1, p. 1–18, 2017.

GARCIA, N. F. S. **Culturas antecessoras e inoculação de Azospirillum brasilense em arroz de terras altas e feijão de inverno em sucessão inoculado com Rhizobium tropici**. 2017.64 f. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

GEELHOED, J. S.; HIEMSTRA, T.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Phosphate and sulfate adsorption on goethite: Single anion and competitive adsorption. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 61, n. 12, p. 2389–2396, 1997.

GHEZZI, J. L. et al. Characterization of environmental nano- and macrocolloid particles extracted from selected soils and biosolids. **Applied and Environmental Soil Science**, New York, v. 2014, 2014.

GHIDIN, A. A. et al. Toposseqüências de latossolos originados de rochas basálticas no paraNÁ . I - MINERALOGIA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 293–306, 2006.

GLIŃSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant growth**. Boca Raton: CRC Press Inc., 1990.

GOES, R. J. et al. Manejo do nitrogênio em cobertura no arroz de terras altas em sistema plantio direto. **Agrarian**, Dourados, v. 9, n. 2012, p. 11–18, 2016.

GOTIC, M.; MUSIC, S. Mossbauer , FT-IR and FE SEM investigation of iron oxides precipitated from FeSO 4 solutions. **Journal of Molecular Structure**, Amsterdam, v. 836, p. 445–453, 2007.

GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 31, n. 13, p. 145–165, 1971.

GUEDES FILHO, O. et al. Permeabilidade ao ar da cama de semeadura do solo em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 841–851, 2015.

GUIMARÃES, C. V. et al. Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1188–1194, 2013.

GUSTAFSSON, J. P.; AKRAM, M.; TIBERG, C. Predicting sulphate adsorption/desorption in forest soils: evaluation of an extended Freundlich equation. **Chemosphere**, Oxford, v. 119, p. 83–89, 2015.

HAIR Jr, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAKAMY, A.; SHAIKH, F. U. A.; LOW, I. M. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites. **Composites Part B: Engineering**, Kidlington, v. 78, p. 174–184, 2015.

HANKE, D. et al. Influência da matéria orgânica no diâmetro médio de minerais da fração argila de solos desenvolvidos de basalto no sul do Brasil. **Revista Brasileira**

de Ciencia do Solo, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1611–1622, 2015.

HOCHELLA, M. F. et al. Nanominerals, mineral nanoparticles, and earth systems. **Science**, Washington, v. 319, n. 5870, p. 1631–1635, 2008.

HOFFMANN JÚNIOR, L. et al. Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1543–1548, 2007.

INSKEEP, W. P. Adsorption of sulfate by kaolinite and amorphous iron oxide in the presence of organic ligands. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 18, p. 379–385, 1989. Disponível em:
<<https://www.soils.org/publications/jeq/abstracts/18/3/379>>

JABRAN, K. et al. Water-saving technologies affect the grain characteristics and recovery of fine-grain rice cultivars in semi-arid environment. **Environmental Science and Pollution Research**, New York, v. 24, n. 14, p. 12971–12981, 2017.

JANG, M.; LIM, M.; HWANG, Y. S. Potential environmental implications of nanoscale zero-valent iron particles for environmental remediation. **Environmental Health and Toxicology**, Berlin, v. 29, p. 1–9, 2014.

JAUER, A. et al. Comportamento de cultivar pérola de feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) em quatro densidades de semeadura na safrinha em Santa Maria-RS. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaina, v. 13, n. 1, p. 12–23, 2006.

JIMENEZ, R. L. et al. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho 1 Growth of cover crops under different levels of soil compaction of a Typic Red Latosol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116–121, 2008.

JOHNSON, J. M. et al. Three-dimensional imaging of individual point defects using selective detection angles in annular dark field scanning transmission electron microscopy. **Ultramicroscopy**, Amsterdam, v. 172, n., p. 17–29, 2017.

JOHNSON, S. E.; LOEPPERT, R. H. Role of Organic Acids in Phosphate Mobilization from Iron Oxide. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 1, p. 222, 2006.

JONER, E.; HARTNIK, T.; AMUNDSEN, C. **Norwegian pollution control authority (2008) environmental fate and ecotoxicity of engineered nanoparticles. Report no. TA 2304/2007**. As: Bioforsk, 2008.

KAMIMURA, K. M. et al. Propriedades físicas de um latossolo vermelho sob cultivo do arroz de terras altas em diferentes manejos do solo e água. **Bragantia**, Campinas, v. 68, p. 723–731, 2009.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000-2015. p. 107–138.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4–10, 1997.

KEILUWEIT, M. et al. Nano-scale investigation of the association of microbial nitrogen residues with iron (hydr)oxides in a forest soil O-horizon. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 95, p. 213–226, 2012.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1998.

KHAN, S. et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. **Environmental Pollution**, Barking, v. 152, n. 3, p. 686–692, 2008.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365–371, 2008.

KUMAR, R. S.; RAJKUMAR, P. Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu , India through ftir spectroscopy. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, Gottingen, v. 13, p. 22221–22248, 2013.

LEHMANN, J.; KINYANGI, J.; SOLOMON, D. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms. **Biogeochemistry**, Dordrevht, v. 85, n. 1, p. 45–57, 2007.

LEITE, D. M. et al. Desempenho da cultura do feijão em função de diferentes sistemas de cultivo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, p. 539–546, 2013.

LIRA, R. B. de et al. Efeitos dos sistemas de cultivo e manejo da caatinga através da análise dos indicadores químicos de qualidade do solo na produção agrícola em Apodi, RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 3, p. 18–24, 2012.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 137, p. 1–72, 2016.

LOURENTE, E. R. P. et al. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia , v. 41, n. 1, p. 20–28, 2011.

LU, S. G.; SUN, F. F.; ZONG, Y. T. Occurrence, structure and mineral phases of nanoparticles in an anthrosol. **Pedosphere**, Beijing, v. 23, n. 3, p. 273–280, 2013.

MANSUR, H. S. Técnicas de caracterização de Materiais. In: ORÉFICE, R. L.; PEREIRA, M. de M.; MANSUR, H. S. (Ed.). **Biomateriais: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Cultura Médica, 2007. p. 552.

MARQUES, P. et al. Efeito da sucessão de cultura e do preparo do solo sobre o rendimento do arroz de sequeiro . **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, p. 885–890, 1998.

MARTINELLI, A. C. et al. Avaliação da lixiviação do cádmio e níquel provenientes da degradação de baterias níquel-cádmio em uma coluna de solo. **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 465–472, 2014.

MARTINS, S. P. **Preparação e caracterização de micro / nanopartículas de quitosano para liberação de cisplatina**. 2013. 84 f. Dissertação(Mestrado em Processos Químicos e Biológicos) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2013.

MATĚJKOVÁ, Š.; ŠIMON, T. Application of FTIR spectroscopy for evaluation of hydrophobic / hydrophilic organic components in arable soil. **Plant Soil and Environment**, Slezská, v. 58, n. 4, p. 192–195, 2012.

MATEUS, G. P.; FELTRAN, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do arroz inundado. **Científica**, Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 144–149, 2006.

MATEUS, G. P.; SANTOS, N. C. B. dos. Sistema plantio direto e a conservação dos recursos naturais. **Pesquisa & Tecnologia**, Campinas, v. 9, n. 2, p. 5, 2012.

MEDVEDEV, V. V. Soil penetration resistance and penetrometers in studies of tillage technologies. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 42, n. 3, p. 299–309, 2009.

MELLIS, E. V.; CRUZ, M. C. P. da; CASAGRANDE, J. C. Nickel adsorption by soils in relation to pH, organic matter, and iron oxides. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 2, p. 190–195, 2004.

MENEZES, L. A. S.; LEANDRO, W. M. Avaliação de espécies de coberturas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, n. 3, p. 173–180, 2004.

MENEZES, V. G. et al. Semeadura direta de genótipos de arroz irrigado em sucessão a espécies de cobertura de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 9, p. 1107–1115, 2001.

MERLIN, N.; LIMA, V. A.; SANTOS-TONIAL, L. M. Instrumental and experimental conditions for the application of fourier transform infrared analysis on soil and humic acid samples, combined with chemometrics tools and scanning electron microscopy. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 26, p. 1920–1927, 2015.

MIORANZA, D. et al. Alterações estruturais de um Latossolo argiloso sob plantio direto induzidas pela intensidade de tráfego de um trator. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 36, p. 203–211, 2015.

MIRANDA, M. N.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. Soma térmica para o subperíodo semeadura-maturação de feijão cv. Carioca em Colorado do Oeste, Rondônia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia v. 40, n. 2, p. 180–185, 2010.

MOEBIUS-CLUNE, B. N. et al. **Comprehensive assessment of soil health: the cornell framework**. Geneva: Cornell University, 2016.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 90–101, 2011.

MONREAL, C. M.; SULTAN, Y.; SCHNITZER, M. Soil organic matter in nano-scale structures of a cultivated Black Chernozem. **Geoderma**, Amsterdam, v. 159, n. 1–2, p. 237–242, 2010.

MURAISHI, C. T. et al. Manejo de espécies vegetais de cobertura de solo e produtividade do milho e da soja em semeadura direta. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 27, p. 199–206, 2005.

MUSCAS, G. et al. Tuning the size and shape of oxide nanoparticles by controlling oxygen content in the reaction environment: Morphological analysis by aspect maps. **Chemistry of Materials**, Washington, v. 27, n. 6, p. 1982–1990, 2015.

MUZILLI, O. de. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 95–102, 1983.

NAPOLEÃO, R. et al. Intensidade do mofo-branco do feijoeiro em plantio convencional e direto sob diferentes lâminas d' água . **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 4, p. 374–379, 2005.

NASCIMENTO, V. **Impactos do manejo de um sistema plantio direto no crescimento e produtividade do arroz de terras altas e feijão “de inverno” em sucessão e nos atributos do solo**. 2015. 196 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

NASCIMENTO, V. do et al. Uso do regulador de crescimento etil-trinexapac em arroz de terras altas TT - Use of trinexapac-ethyl growth regulator in upland rice. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 921–929, 2009.

NAZIR, M. S. et al. Characteristic properties of nanoclays and characterization of nanoparticulates and nanocomposites. In: JAWAID, M.; QAISS, A. el K.; BOUHIFID, R. (Ed.). **Nanoclay reinforced polymer composites**. Singapore: Springer Singapore, 2016. p. 29–49.

NEPOMUCENO, M. P. et al. Burn-down Timing of urochloa ruziziensis and its effect on rr soybean yield. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 557–565, 2012.

NICOLOSO, R. da S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1723–1734, 2008.

NUNES, M. R. et al. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 49, n. 7, p. 531–539, 2014.

NUNES, U. R. et al. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 6, p. 943–948, 2006.

OLIVEIRA, D. M. de et al. Considerações acerca da produção e qualidade de grãos

de feijão. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, n. 3, p. 16–22, 2014.

OLSON, E. Particle shape factors and their use in image analysis-Part 1: Theory. **Journal of GXP Compliance**, Royal Palm Beach, v. 15, n. 3, p. 85–96, 2011.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440 p

PABST, W.; GREGOROVA, E. **Characterization of particles and particle systems**. Prague: ICT, 2007. 122 p.

PACHECO, L. P. et al. Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, p. 464–472, 2015.

PADILHA, F. J. et al. Uso da espectroscopia raman e FT-IR na caracterização do biocarvão em latossolo amarelo da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 9, n. 5, 2017.

PÁDUA, E. J.; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da Densidade do Solo em Profundidade sob Vegetação Nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 725–736, 2015.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, n. C, p. 1–50, 1979.

PATIL, S. S. et al. Nanoparticles for environmental clean-up : a review of potential risks and emerging solutions. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 5, p. 10–21, 2016.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 911–920, 2008.

PEAK, D.; FORD, R. G.; SPARKS, D. L. An in situ ATR-FTIR Investigation of sulfate bonding mechanisms on goethite. **Journal of Colloid and Interface Science**, New York, v. 218, p. 289–299, 1999.

PÉDROT, M. et al. How does organic matter constrain the nature, size and availability of Fe nanoparticles for biological reduction? **Journal of Colloid and Interface Science**, New York, v. 359, n. 1, p. 75–85, 2011.

PEDROTTI, A. et al. Causas e consequências do processo de salinização dos solos Causes and consequences of the process of soil salinization. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria , v. 19, n. 2, p. 1308–1324, 2015.

PEREIRA, S. A. et al. Análise de componentes principais dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico sob pastagem e mata. **Global science and technology**, Rio Verde, v. 3, n. 1984–3801, p. 87–97, 2010a.

PEREIRA, T. T. C. et al. Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de

rochas pelíticas do grupo bambuí - minas gerais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1283–1295, 2010b.

PIANA, C. F. D. B.; SILVA, J. G. C.; ANTUNES, I. F. Ajuste do rendimento para a variação do estande em experimentos de melhoramento genético do feijão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 12, p. 1687–1696, 2007.

PINHEIRO, A. et al. Perda de solo em diferentes sistemas de plantio por meio de chuvas simuladas em lisímetros volumétricos. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 10, n. 2, p. 89–109, 2016.

PIRES, L. F. et al. Soil pore characterization using free software and a portable optical microscope. **Pedosphere**, Beijing, v. 23, n. 4, p. 503–510, 2013. D

PORTUGAL, J. R.; PERES, A. R.; RODRIGUES, R. A. F. Aspectos climáticos no feijoeiro. In: ARF, O. et al. (Ed.). **Aspectos gerais da cultura do feijão Phaseolus vulgaris L.** 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2016. p. 64–75.

RAIJ, B. van et al. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1997. 285 p.

RAIJ, B. van et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p

RALISCH, R. et al. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo-DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017.

RANA, S.; KALAICHELVAN, P. T. Ecotoxicity of nanoparticles. **Internantional Scholarly Research Network Toxicology**, Cairo, v. 2013, n. 1, p.1 -11, 2013.

RAO, S. M.; SRIDHARAN, A. Mechanism of sulfate adsorption by kaolinite. **Clays & Clay Minerals**, Washington, v. 32, n. 5, p. 414–418, 1984.

RAPHAEL, L. Application of FTIR spectroscopy to agricultural soils analysis. In: NIKOLIC, G. (Ed.). **Fourier transforms - new analytical approaches and FTIR strategies**. Rijeka: InTech, 2011. p. 385–404.

REGELINK, I. C. **Natural nanoparticles in soils and their role in organic-mineral interactions and colloid-facilitated transport**. 2014. 222 f. Thesis (Doctor in Soil Quality) - Wageningen University, Wageningen, 2014.

REHAL, J.; KAUR, G. J.; SINGH, A. K. Influence of milling parameters on head rice recovery: a review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Tamilnadu, v. 6, n. 10, p. 1278–1295, 2017.

REICHARDT, R.; TIMM, L. C. **Solo planta atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole, 2012. 524 p.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009a.

- REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 3, p. 310–319, 2009b.
- REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de coberuta em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1805–1816, 2008.
- RIBEIRO, B. T.; JUNQUEIRA, B. R.; RODRIGUES, G. I. Extração de fósforo disponível em um Latossolo assistida por irradiação ultrassônica Ultrasound-assisted extraction of available P from a. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, v. 57, p. 382–387, 2014.
- RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do paraná. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1817–1825, 2008.
- RICE, S. B. et al. Particle size distributions by transmission electron microscopy: an interlaboratory comparison case study. **Metrologia**, Bristol, v. 50, n. 6, p. 663–678, 2013.
- RICHARDSON, A. E. et al. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. **Crop and Pasture Science**, Victoria, v. 60, n. 2, p. 124–143, 2009.
- ROSA, D. M. et al. Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e soja. **Revista Ciencia Agronomica**, Fortaleza, v. 48, n. 2, p. 221–230, 2017.
- ROSA, P. L. et al. Recuperação De Um Solo De Cerrado Após 19 Anos: Ocorrência Espontânea De Espécies Arbóreas. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 1, p. 44–57, 2014.
- RUIZ-AGUDO, E. et al. A non-classical view on calcium oxalate precipitation and the role of citrate. **Nature Communications**, New York, v. 8, n. 1, p. 768, 2017.
- SÁ, M. A. C. D.; LIMA, J. M. D. **Energia ultra-sônica**: uma ferramenta em ciência do solo. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005.
- SANDRIN, T. R.; MAIER, R. M. Impact of metals on the biodegradation of organic pollutants. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, v. 111, n. 8, p. 1093–1101, 2003.
- SANTIAGO, C. M.; BRESEGHELLO, H. C. de P.; FERREIRA, C. M. **Arroz**: o produtor pergunta, a embrapa responde. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 245 p
- SANTOS, F. S. et al. A utilização de plantas de cobertura na recuperação de solos compactados. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 3, n. 3, p. 82–91, 2014. a.
- SANTOS, H. S. et al. Estudo por microscopia eletrônica das transformações durante a queima de argilas altamente aluminosas brasileiras. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 322, p. 125–137, 2006.

SANTOS, H. G. dos. et al. **Sistema brasileiro de classificação de Solos**. 4. ed. Brasília: Embrapa, 2014. b. 353p

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, London, v. 43, n. 1, p. 137–154, 2008.

SCHERER, H. W. Sulfur in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 172, n. 3, p. 326–335, 2009.

SCHINDELBECK, R. R. et al. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 88, p. 73–80, 2008.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nat Meth**, New York, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012.

SCHNEIDER, M. P. W. et al. Sorptive stabilization of organic matter by amorphous Al hydroxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 74, n. 5, p. 1606–1619, 2010.

SEAL, A. N. et al. Identification and quantitation of compounds in a series of allelopathic and non-allelopathic rice root exudates. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 30, n. 8, p. 1647–1662, 2004.

SEKI, A. S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 460–468, 2015.

SHEN, Y. H. Sorption of humic acid to soil: The role of mineralogical composition. **Chemosphere**, Oxford, v. 38, n. 11, p. 2489–2499, 1999.

SHIFERAW, B.; FREEMAN, H. A.; SWINTON, S. M. **Natural resources management in agriculture**: methods for assessing economic and environmental impacts. Wallingford: CABI Publishing, 2005. 384 p

SHIMADA, M. M.; ARF, O.; SÁ, M. E. de. Componentes do rendimento e desenvolvimento do feijoeiro de porte ereto sob diferentes densidades populacionais. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 181–187, 2000.

SILVA, A. P. et al. Indicadores da qualidade Física do solo. In: LIER, Q. de J. Van (Ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, 2010. p. 241–281.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 451–456, 2004.

SILVA, É. A. da; BENEVENUTE, P. A. N.; MELO, L. B. B. de. Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos das curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e “Índice S” Physical quality of an Oxisol estimated by studies of water retention curves, indicators of easy determination and “I. **Tecnologia e**

ciencia agropecuaria, João Pessoa, v. 11, n. 4, p. 49–54, 2017.

SILVA, L. B. Da; DICK, D. P.; INDA JUNIOR, A. V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1167–1171, 2008.

SILVEIRA, D. de C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 659–667, 2010.

SOARES, A. A. Desvendando o segredo do insucesso do plantio direto do arroz de terras altas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 25, n. 222, p. 61–69, 2004.

SOLGI, A. et al. Soil compaction and porosity changes caused during the operation of timberjack 450c skidder in Northern Iran. **Croatian Journal of Forest Engineering**, Zabreg, v. 36, n. 2, p. 217–225, 2015.

SOUSA, D. M. G. De; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Cerrado correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa informações tecnológicas, 2004. p. 416.

SOUTO, A. G. de L. et al. Biometria em plantas de noni sob irrigação com águas salinas e lixiviação dos sais do solo. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 47, n. 2, p. 316–324, 2016.

SOUTO FILHO, S. N. et al. Nanoparticles and nanostructure morphology of a red latosol in rehabilitation nanopartículas e morfologia da nanoestrutura de um Latossolo Vermelho em recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, p. 530–536, 2017.

SOUZA, A. De et al. Melhores épocas d plantio para os cultivares de arroz IAC-47, IAC-165, IAC-164 e IAC-25 em função dos graus-dia acumulados (GDA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, Maceio, 1989, **Anais...** Maceio: [S.n.], 1989.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 133–139, 2003.

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

TANG, Z. et al. Size fractionation and characterization of nanocolloidal particles in soils. **Environmental Geochemistry and Health**, Dordrecht, v. 31, n. 1, p. 1–10, 2009.

TARIQ, S. R.; SHAFIQ, M.; CHOTANA, G. A. Distribution of heavy metals in the soils associated with the commonly used pesticides in cotton fields. **Scientifica**, Cairo, v. 2016, 2016.

TEAM, R. R Development core team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**, Viena, v. 55, p. 275–286, 2013.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, A. S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 6, p. 808, 2001.

THENG, B. K. G.; YUAN, G. Nanoparticles in the soil environment. **Elements**, Quebec, v. 4, n. 6, p. 395–399, 2008.

TIECHER, T. et al. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p. 518–527, 2012.

TSAO, T. M. et al. Red soil chemistry and mineralogy reflect uniform weathering environments in fluvial sediments, Taiwan. **Journal of Soils and Sediments**, Berlim, v. 12, n. 7, p. 1054–1065, 2012.

TSAO, T. M. et al. Automated ultrafiltration device for environmental nanoparticle research and implications: A review. **Micromachines**, Basel, v. 4, n. 2, p. 215–231, 2013.

VANDEVOORT, A. R.; LIVI, K. J.; ARAI, Y. Reaction conditions control soil colloid facilitated phosphorus release in agricultural Ultisols. **Geoderma**, Amsterdam, v. 206, p. 101–111, 2013.

VENDRAME, P. R. S. et al. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e Carbono Orgânico em latossolos do cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 1657–1666, 2011.

VILAR, C. C. et al. Capacidade máxima de absorção de fósforo relacionada a Formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 34, p. 1059–1068, 2010.

VITORINO, A. C. T. et al. Uso de energia ultra-sônica e turbidimetria na análise textural de pequenas amostras de solo **Revista Ciências Técnicas Agropecuarias**, Cuba, v. 16, p. 43–48, 2007.

WALTER, L. C. et al. Mudança climática e seus efeitos na cultura do arroz. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 11, p. 2411–2418, 2010.

WANG, K.; SIPES, B. S.; SCHMITT, D. P. Crotalaria as a cover crop for nematode management : a review. **Nematropica**, Bradenton, v. 32, n. 1, p. 35–58, 2002.

WEI, S. et al. Microstructure, Interaction mechanisms, and stability of binary systems containing goethite and kaolinite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 2, p. 389, 2012.

WILSON, M. A. et al. Nanomaterials in soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, p. 291–

302, 2008.

WOLSCHICK, N. H. et al. Cobertura do solo , produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lajes, v. 15, n. 2, p. 134–143, 2016.

YADAV, M. R. et al. Conservation agriculture and soil quality-an overview. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Tamilnadu, v. 6, n. 2, p. 707–734, 2017.

YOKOYAMA, L. P. et al. **Nível de aceitabilidade da cultivar de feijão “pérola”: avaliação preliminar**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999.

ZAGONEL, J.; FERNANDES, E. C. Doses e épocas de aplicação de redutor de crescimento afetando cultivares de trigo em duas doses de nitrogênio. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 331–339, 2007.

ZANNAH, T. I. et al. FTIR and XRD analyses of highly weathered ultisols and oxisols in peninsular malaysia. **Asisn Journal of Agricultural and Food Sciences**. v. 4. n. 4, p191-201, 2016.

ZATORRE, N. P. Atributos biológicos do solo como indicadores de qualidade do solo. **Gaia Scientia**, João Pessoa, v. 2, n. 1, p. 9–13, 2008.

ZHANG, L.; SHI, W.; ZHANG, B. A review of electrocatalyst characterization by transmission electron microscopy. **Journal of Energy Chemistry**, Dalian, v. 26, n. 6, p. 1117–1135, 2017.

ZHANG, M. K.; LIU, Z. Y.; WANG, H. Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, n. 7, p. 820–831, 2010.

ZHANG, X. et al. Predicting soluble nickel in soils using soil properties and total nickel. **Plos One**, San Francisco, v. 10, n. 7, p. 1–13, 2015.

ZHENG, H.; ZHU, Y. Perspectives on in situ electron microscopy. **Ultramicroscopy**, Amsterdam, v. 180, n. 1, p. 188–196, 2017.