

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO**

RELATORIO DE ESTÁGIO DE PÓS-DOCTORADO

USO DE PARTÍCULAS SINTÉTICA EM SOLOS TROPICAIS

Autora: Dr^a. Kathleen Fernandes Braz

Supervisor: Prof. Dr. José Marques Júnior

JABOTICABAL - SP

**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL – SP
Ano de conclusão: 2025**

USO DE PARTÍCULAS SINTÉTICA EM SOLOS TROPICAIS

Resumo: A geoquímica do solo nem sempre recebe a devida atenção entre as tecnologias de desenvolvimento e baseadas nos processos naturais. O solo é um corpo que se encontra em um processo constante de evolução e atua como reservatório de água, sistema de adsorção de gases, armazenamento de nutrientes, depósito de microorganismos e também fornece suporte para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Dentre os diversos processos dinâmicos que ocorrem no solo, há a formação de minerais nanoestruturados, como argilas, constituídos principalmente por óxidos e oxi-hidróxidos metálicos. O presente estudo tem como objetivo apontar quais alterações a adição de partículas sintéticas pode provocar em solos tropicais, utilizando técnicas magnéticas e espectrais. O experimento foi realizado estufa da unidade experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária (FCAV-UNESP). Foi realizado um delineamento em blocos ao acaso, com 4 repetições e 3 blocos, sendo: 2 solos de geologia arenítica e basáltica; 4 doses da partícula sintética e 3 avaliações no tempo. Foram realizadas análises magnéticas e espectrais. Após o período de avaliação foi possível observar que a adição da partícula sintética diminui o magnetismo em solos originados de arenito e basalto. Quando consideradas as curvas espectrais também foi observada diminuição da reflectância, após a adição da partícula sintética. Provavelmente a adição da partícula sintética promove o revestimento dos óxidos do solo, causando uma diminuição na sua expressão. A adição das nanopartículas sintéticas e pó de rocha também altera a mineralogia dos óxidos presentes e os teores de K, Ca e Mg e as funções ecossistêmicas do solo. Novos projetos e experimentos são necessários para maiores esclarecimentos.

Palavras-chave: óxidos de ferro, magnetismo, espectroscopia, remineralizadores.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços científicos e tecnológicos são hoje os grandes diferenciais para otimização de processos industriais. Estes agregam melhores resultados de produção e economia, sem prejudicar a qualidade dos produtos (Anderson et al., 2015). Isto é visto com frequência no ramo industrial, principalmente na fase de planejamentos para novos produtos e processos. Mas e no meio agro? Na agropecuária a tecnologia já vem ganhando destaque com o avanço de maquinários, uso de drones, melhoramento genético, mapeamentos, entre outros. A era marcada pelo uso da agricultura 4.0, vem ganhando cada vez mais espaço e tornando o campo cada dia mais tecnológico.

Na ciência do solo não é diferente. Existem atualmente mais 64 mil artigos científicos cadastrados na base de pesquisa SCOPUS (Scopus, 2021) e mais de 600 auxílios na base da biblioteca virtual da FAPESP (FAPESP, 2021). A ONU recentemente definiu 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável, o solo está envolvido em pelo menos 40 % destes (ONU, 2021). Steffen et al. (2015) apontam 9 fronteiras planetárias, para estabilidade terrestre, duas apresentam relação direta com solo. Logo, como um sistema dinâmico, o solo vem sendo considerado com um importante recurso natural, que carece de estudos e investimentos tecnológicos.

O solo é dado em função de clima, tempo, relevo, microrganismos e material de origem (Lepsh, 2011). O material de origem ou a geologia do solo é um importante fator pois dele derivam grande parte dos minerais solo (Resende et al., 2014). Cerca de 70% dos minerais do solo impactam diretamente no seu balanço de cargas e em suas características físicas e por muito tempo acreditava-se que a mineralogia dos solos brasileiros não era sequer quantificada. As partículas que antes era consideradas inexistentes, foram quantificadas e mapeadas. Apontou-se que elas não só existem como também apresentam variabilidade espacial, que impactam diretamente nas práticas de manejo do solo (Fernandes et al., 2020).

É sabido que para formar de 1 cm de solo demora-se em média de 500 anos (Tavares et al., 2008). Os processos e reações de intemperismos levam tempo para agir em partículas maiores das rochas, até quebrá-las em tamanhos menores e passíveis de transformação. Uma alternativa recentemente incitada tem sido a adição de partículas no solo, que tem o potencial de alterar a mineralogia do solo. Sejam essas partículas

sintéticas ou naturais (rochas moídas), seu tamanho manométrico permite alteração rápida nas propriedades do solo (Antoetz et al., 2017).

Essas "nanopartículas naturais", podem variar de acordo com as regiões dos países, clima ambiental e geologia. Diferentes nanoestruturas podem expressar ao solo diferentes funções como absorção de água, regulação da acidez e fixação de gases. Estudos recentes mostram que o aumento da temperatura global pode diminuir de Hematita (Fe_2O_3), mineral que contribuiu para o armazenamento de carbono, no valor de 10%. A remineralização do solo, com atenção aos minerais deficientes e à digestão biológica desses minerais para torná-los disponíveis para a vida vegetal, é a chave para aumentar o carbono do solo.

Numerosos estudos têm mostrado a capacidade de aumentar os níveis de carbono do solo usando pós de rocha em métodos de remineralização. Essa prática pode aumentar a formação de novas "nanopartículas naturais" em um período de tempo menor em relação ao processo natural e contribui para melhorar as funções do ecossistema do solo, como aumentar a viabilidade de nutrientes, permitir a infiltração de água e maior armazenamento de gás. Considerando os benefícios da adição de minerais em pó ao solo, como pós de rocha com tamanho de partícula de muitos micrômetros, podemos antecipar que a utilização de "minerais sintéticos", como materiais micro/nanoestruturados porosos e de alta área superficial, para a remineralização processo nos solos, liberarão seus minerais mais rapidamente para reabastecer as funções do ecossistema do solo. Além disso, o processamento bacteriano, conhecido como mineralização assistida, pode ser usado para retardar a liberação de elementos nutritivos durante o crescimento populacional.

A utilização de remineralizantes de solo como fonte de nutrientes para as lavouras está prevista na Lei Federal Brasileira (Brasil 2013) e as especificações são claramente definidas pela Instrução Normativa nº 5 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2016). Esses insumos não apenas melhoram a fertilidade do solo, mas também reduzem os problemas ambientais. Os resíduos das atividades de mineração alteram a paisagem e afetam negativamente os solos e corpos d'água quando descartados de forma incorreta (Markoski, 2006; Hartmann et al., 2015). Estudos foram realizados com alguns remineralizadores, como pó de rocha de basalto, granito, fonolito e flogopita (mica de magnésio) para determinar seu potencial como fertilizantes do solo (Van Straatem, 2007).

Além do uso das nanopartículas naturais, a nanobiotecnologia tem trazido inúmeros benefícios e aplicações para diversas áreas, inclusive aquelas com aplicações biológicas, como a agricultura. Algumas nanopartículas sintéticas são usadas como transportadores para liberar lentamente nanofertilizantes ou micronutrientes para as plantas. Além disso, estas partículas podem interagir com as plantas tanto por meio das superfícies externas quanto internas devido à estrutura porosa (Chauhan et al., 2022). E também podem contribuir para (i) composições híbridas versáteis, que permitem uma ampla variedade de combinações, (ii) grandes áreas superficiais específicas e volumes de poros, relacionados a excepcionais capacidades de sorção, (iii) simplesmente funcionalizáveis cavidades, nas quais podem ocorrer interações específicas hospedeiro-hóspede, (iv) síntese em larga escala, permitindo a comercialização; e (v) perfil de estabilidade adequado, sendo suficientemente estável para cumprir a sua função e, uma vez degradado, evitando a toxicidade associada em animais/plantas devido à sua acumulação (Rojas, Rodríguez-Diéguez, Horcajada, 2022).

Com base no exposto e na importância do solo para desenvolvimento econômico e ambiental planetário é necessário apostar em novas tecnologias que podem favorecer as práticas agrícolas e aumentar a produtividade dos solos. Assim sendo o presente estudo tem como objetivo apontar quais alterações a adição de partículas sintéticas e naturais (pó de rocha) pode provocar em solos tropicais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária (FCAV-UNESP), Campus de Jaboticabal-SP, no Centro-Norte do estado de São Paulo. As coordenadas geográficas são (21°15'22''S e 48°18'58''W). O clima da região é classificado segundo Koppen, como tropical com inverno seco (CWA), precipitação média anual de aproximadamente 1600 mm, distribuição concentrada no período de outubro a março e relativa seca no período de abril a setembro.

A área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próxima à fronteira das cuestas basálticas, divisor litoestratigráfico basaltoarenito com a depressão periférica da bacia do Paraná. A altitude do local varia entre 450-650 m e os solos foram classificados, segundo Cunha et al. (2005) como Latossolo Vermelho ácrico

típico (LVw), Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), Latossolo Vermelho eutrófico típico (LVe) e Latossolo Vermelho eutroférico típico (LVef).

Nas porções mais elevadas, e planas encontram-se os Latossolos Vermelhos (LV) de textura média. Estes transacionam, encosta abaixo (próximo ao fundo dos vales) para Latossolos eutroféricos textura argilosa, originados principalmente dos produtos da alteração dos basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos. De predomínio dos Latossolos, o material geológico é constituído por arenitos do Grupo Bauru, Formação Adamantina, e por basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral.

Para realização do experimento com cana-de-açúcar, adotou-se um delineamento em blocos ao acaso, com 4 repetições e 3 blocos, sendo: 2 solos de geologia arenítica e basáltica; 4 doses da partícula sintética e 4 avaliações no tempo. O experimento foi conduzido em vasos e casa de vegetação, durante dois meses e as avaliações foram realizadas após 10 dias, 20 dias e 60 dias. A partícula foi diluída em água e depois adicionada ao solo (Figura 1).



Figura 1. Vasos na casa de vegetação na Unidade Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária (FCAV-UNESP), Campus de Jaboticabal-SP.

Para condução do experimento com cana-de-açúcar optou-se por um delineamento inteiramente casualizado, com 4 repetições e 2 tipos de solo (Solos mais magnético, originados de basalto – SB; solos menos magnéticos, originados de arenito -

SA); 4 doses da nanopartícula sintética rica em ferro (NSF) e 3 avaliações no tempo. O experimento foi conduzido em vasos e casa de vegetação (Figura 2), durante três meses e as avaliações foram realizadas após 28 dias, 62 dias e 90 dias.



Figura 2. Instalação e condução do experimento com cana-de-açúcar.

Houve uma tentativa de experimento com a cultura da soja, todavia em casa de vegetação a cultura sofre muitos dados e o mesmo não foi finalizado. Portanto foi realizado um segundo experimento com a cultura do milho na casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV) em Jaboticabal, Estado de São Paulo, Brasil. As unidades experimentais foram constituídas por 48 vasos que foram preenchidos com 9 kg de terra seca (Figura 3). O solo adicionado a cada vaso foi isolado com um saco plástico grosso para evitar perdas de material. Os solos do experimento são de origem basáltica (mais magnético - SB) e arenítica (menos magnético - SA). Caracterização química do solo de arenito: pH CaCl_2 (5,0); matéria orgânica (13 g dm^{-3}); P (5 mg dm^{-3}); S (5 mg dm^{-3}); Ca ($14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Mg ($5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); K ($1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); H+Al ($24 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); CTC ($44,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e V% (46), e solos de basalto: pH CaCl_2 (6,8); matéria orgânica (22 g dm^{-3}); P (13 mg dm^{-3}); S (3 mg dm^{-3}); Ca ($37 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Mg ($21 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); K ($1,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); H+Al ($11 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); CTC ($71,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e V% (85). A partir dos resultados das análises de fertilidade, verificou-se a necessidade de correção do solo de origem arenítica.



Figura 3. Vasos prontos para receber solos e tratamentos, e avaliação da emissão de CO₂ no solo de Arenito após a correção.

Para este estudo foram avaliados 6 tratamentos: NSF02 (0,2 t ha⁻¹ de NSF), NSF04 (0,4 t ha⁻¹ de NSF), NSF1 (1 t ha⁻¹ de NSF), NSF04P3 (0,4 t ha⁻¹ de NSF + 3 t ha⁻¹ de pó de rocha), P3 (3 t ha⁻¹ de pó de rocha) e controle (sem adubação) e dois solos (originados de basalto – SB e arenito - SA) em 4 repetições, totalizando 48 vasos. A quantidade de 3 t ha⁻¹ é um valor médio, oriundo de experimentos conduzidos à campo, nos quais as doses de destaque variaram entre 3 e 6 t ha⁻¹.

A aquisição da nanopartícula sintética rica em ferro (NSF) foi realizada em parceria com o Laboratório de Nano materiais e Catálise do Instituto de Química da Universidade de São Paulo. A síntese da partícula é dada a partir da mistura de cloreto férrico, ácido ortofosfórico, ácido oxálico, ureia e água na razão molar 1:6:1:3:100, em reação hidrotérmica.

Foi realizada análise de suscetibilidade magnética do solo (SM) em baixa frequência ($\chi_{BF} = 0,47$ kHz) em 10 g de terra fina seca ao ar (TFSA), seguido de leituras no equipamento Bartington MS2, acoplado a um sensor Bartington MS2B (Bartington Instruments Ltd, Oxford, Reino Unido).

Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, foi moído aproximadamente 5 g de solo (TFSA) em alNSFariz de ágata até obtenção de coloração constante e o conteúdo foi colocado em porta-amostras com espaço cilíndrico de 16 mm de diâmetro. Os valores de reflectância foram determinados em espectrofotômetro Lambda 950 UV/Vis/NIR acoplado com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro. Os espectros foram registrados em intervalos de 0,5 nm, com tempo de integração de 2,43

nm s⁻¹ ao longo do intervalo de 350 a 2.500 nm (350 – 800 nm – visível – VIS e 801 – 2500 nm – infravermelho próximo-NIR).

Os teores de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (FeD) seguiu a metodologia de Mehra e Jackson (1960) e os teores de ferro referentes aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade foram extraídos por solução de oxalato de amônio (FeO) seguindo a metodologia de Camargo et al. (1986).

A argila para a análise de difratometria de raios-X (DRX) foi separada da amostra de solo pelo método de centrifugação (Jackson, 1985). A caracterização da Gt e Hm foi feita após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L⁻¹ (1g argila/100 ml solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de Norrish e Taylor (1961) modificado por Kämpf e Schwertmann (1982). A difração de raios X foi realizada com as amostras preparadas pelo método do pó, em aparelho HGZ equipado com cátodo de cobalto e filtro de ferro e radiação K (20 mA, 30 kV) para a difração da Hm e Gt e cátodo de cobre com filtro de níquel para a difração da Ct e Gb. A velocidade de varredura empregada foi de 1°2θ/minuto e amplitude de 23 a 49°. Foram utilizados para avaliação mineralógica os reflexos da caulinita (001), gibbsita (002), hematita (012 e 110) e da goethita (110 e 111).

Para análise de fluorescência de raios X, 2 g de amostra é macerada em alNSFariz de ágata para pulverização e homogeneização do material. Posteriormente a amostra é acondicionada no porta-amostra e prensada e escaneados no equipamento, modelo NexQc da marca Rigaku. O equipamento é operado de 0 a 50 KeV. As amostras são irradiadas na atmosfera do ar, utilizando um tubo de raios X Rh operado a 15 kV (Na - Sc) e 50 kV (Ti - U) por 200 se 250 s, respectivamente, detector de desvio de silício (SDD) com uma resolução < 145. Para obter uma excitação adequada para uma ampla gama de elementos, o tubo de raios X Rh é operado a 15 kV e 50 kV. A voltagem de 15 kV favorece a fluorescência de elementos na faixa de Na-Sc e 50 kV e é mais apropriado para elementos mais pesados na faixa Ti-Fe.

Para determinação dos atributos químicos as amostras de solo foram coletadas, seca e passadas em peneiras de 2 mm para a quantificação dos nutrientes do solo, realizando as análises químicas de rotina proposta por Raij et al. (2001). Sendo analisados potencial hidrogeniônico (pH), a matéria orgânica do solo (MO), acidez potencial (H+Al),

Cálcio (Ca^{2+}), Potássio (K^{+}), Magnésio (Mg^{2+}) fósforo (P^{-}). Os atributos capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%) foram calculados.

Simultaneamente às análises estatísticas, as pressuposições básicas da análise de variância e regressão, normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias serão testadas para todas as variáveis avaliadas. A análise da variância foi realizada em delineamento inteiramente casualizado no esquema de medidas repetidas no tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Experimento com cana-de-açúcar

O estudo de algumas dessas partículas já vem sendo realizado em várias áreas da ciência, como na medicina (Lima et al., 2017), farmácia (Dimer et al., 2013), química (Ferraz et al., 2020), engenharia de materiais (Zarbin, 2007), entre outras. Na ciência do solo seu uso já é estudado na fertilidade do solo (Anstoetz et al., 2015). Todavia ainda não sabe quais as alterações que poderão ser observadas na mineralogia do solo.

O grupo de pesquisa CSME (Caracterização do Solo Para fins de Manejo Específico) tem anos em experiência em estudos de tipologia de argilas em solos tropicais). Entre os vários estudos podemos citar alguns que são pioneiros no Brasil que mostram a variabilidade espacial da mineralogia do solo (Camargo et al., 2008); a definição de áreas de manejo específico em culturas de cana-de-açúcar (Campos et al., 2009), citrus (Siqueira et al. 2010) e café (Sanchez et al., 2005) a partir da mineralogia do solo; estudos de magnetismo (Bahia et al., 20107) e cor dos solos (Aquino et al., 2016; Carmo et al., 2016; Ramos et al., 2020), atributos derivados da mineralogia. E mais recentemente o grupo tem inovado ainda mais com metodologias inéditas na quantificação indireta de minerais do solo como óxidos de ferro (Silv et al., 2020;) e caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) (Fernandes et al., 2020) para grandes extensões territoriais, bem como a estimativa de C, N e emissão de CO_2 do solo, com base em minerais (Bahia et al., 2017).

Todas estas pesquisas têm estruturado o grupo de pesquisa CSME (www.csme.com.br) como pioneiro em inovação tecnológica quando se trata de mineralogia do solo. Estes servem como base para inúmeras outras pesquisas (citações de teses e dissertações mais recentes), e já tem norteado empresas e produtores nas suas

decisões de práticas de manejo, para melhorar a produtividade de suas culturas e aumentar seu ganho econômico (Zaparolli, 2021).

A adição de qualquer material no solo causa alterações em suas propriedades físico-químicas e mineralógicas (Antoetz et al., 2017). As partículas sejam elas sintéticas ou naturais (como pó de rocha, adubos organominerais, entre outros) possuem suas próprias propriedades físico-químicas, e ao serem adicionadas ao solo, podem causar alterações em suas condições naturais, ainda desconhecidas.

Para o SB do experimento com cana-de-açúcar, com um padrão de tipologia de argila específico identificado e mapeado por magnetismo, de forma geral houve um incremento na fertilidade do solo com o aumento das doses de NPS, principalmente para fósforo (P), capacidade de troca de cátions (CTC) e soma de bases (SB). Em relação ao K e a SB houve efeito significativo da interação do tempo com as doses; para a SB houve aumento ao longo do tempo, motivado principalmente pelo teor de Ca, e diferença entre doses no tempo 1, para K incremento do tempo 1 para o tempo 2 com depleção para o tempo 3, destaque para as menores doses que apresentaram maiores teores (Tabela 1).

Tabela 1. Análise da variância para os atributos do solo do experimento com cana-de-açúcar e teste de médias.

Solos mais magnéticos – originados de basalto					Solos mais magnéticos – originados de arenito			
pH								
Doses (T ha-1)	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	6.07	6.43	6.5	6.33 A	5.5	5.66	5.62	5.60 BC
0.4	5.67	5.94	5.98	5.86 B	5.61	5.81	5.86	5.76 A
0.5	5.73	5.93	5.96	5.87 B	5.59	5.8	5.88	5.75 A
1	5.77	5.96	5.96	5.90 B	5.58	5.75	5.8	5.71 AB
2	5.85	5.92	5.93	5.90 B	5.45	5.57	5.65	5.56 C
4	5.86	6.04	6.02	5.97 B	5.46	5.62	5.61	5.56 C
Média	5.83 b	6.04 a	6.06 a		5.53 b	5.70 a	5.73 a	
Doses	33.920 **				10.3386**			
Tempo	34.113 **				26.9701**			
Doses*Tempo	1.525 NS				0.4256 NS			
CV%	2				2			
CO								
Doses (T ha-1)	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	16.49 A a	13.07 B b	14.46 AB ab	14.67	14.15	14.84	14.29	14.42 AB
0.4	18.21 A a	14.96 AB b	14.69 AB b	15.95	15.2	16.58	15.14	15.64 AB
0.5	15.41 A a	14.19 B a	14.19 AB a	14.6	16.2	17.16	15.24	16.20 A
1	16.55 A a	17.31 A a	12.62 B b	15.49	14.3	16.46	16.83	15.87 AB
2	17.47 A a	16.91 A a	15.46 A a	16.61	13.59	16.08	12.52	14.06 B
4	16.84 A a	17.38 A a	16.48 A a	16.9	14.75	16.31	14.41	15.16 AB
Média	16.83	15.64	14.65		14.70 b	16.24 a	14.74 b	
Doses	7.1321**				3.5144**			
Tempo	18.2288**				7.6823**			
Doses*Tempo	3.9792**				1.112 NS			
CV%	8				10			
P								
Doses (T ha-1)	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	23.04	17.89	20.46	20.46 D	23.76	17.56	20.37	20.56 D
0.4	33.58	24.56	30.3	29.48 C	31.14	20.7	22.89	24.91 CD
0.5	34.95	25.51	28.14	29.53 C	31.78	27.18	25.1	28.02 BC
1	37.08	28.22	29.39	31.56 BC	37.83	26.14	28.85	30.94 AB
2	42.84	32.1	35.74	36.89 AB	33.8	22.23	28.9	28.31 BC
4	45.07	34.75	39.24	39.69 A	40.93	28.77	35.44	35.04 A
Média	36.09 a	27.17 c	30.54 b		33.21 a	23.76 c	26.93 b	
Doses	24.3773**				15.8134**			
Tempo	21.9197**				29.6565**			
Doses*Tempo	0.3314 NS				0.9096 NS			
CV%	15				15			
Ca								
Doses (T ha-1)	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	34.65	39.4	43	39.02 B	30.36	27.86	31.83	30.02 AB
0.4	42.19	39.64	42.56	41.46 AB	27.92	30.95	30.26	29.71 AB
0.5	37.34	38.56	42.68	39.53 B	31.91	33.78	33.62	33.10 A
1	42.8	40.37	40.96	41.38 AB	28.64	31.12	34.76	31.51 AB
2	38.82	39.34	43.93	40.69 AB	26.35	28.2	31.81	28.79 B
4	43.19	43.79	44.94	43.97 A	26.17	30.94	33.02	30.04 AB
Média	39.83 b	40.18 b	43.01 a		28.56 b	30.48 ab	32.55 a	
Doses	3.9588**				3.0246*			
Tempo	7.8265**				10.2353**			
Doses*Tempo	1.7170 NS				1.1333 NS			
CV%	7				10			
Mg								
Doses (T ha-1)	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	19.13	21.31	23.53	21.32 AB	13.75	15.43	17.48	15.55 C
0.4	18.22	20.01	21.09	19.77 C	15.36	17.67	17.29	16.77 ABC
0.5	18.44	19.6	21.64	19.89 BC	16.16	18.75	18.57	17.83 A
1	19.31	20.32	20.66	20.10 BC	15.94	17.96	18.99	17.63 AB
2	17.67	20.14	22.3	20.04 BC	14.99	16.14	17.14	16.09 BC
4	20.77	22.54	22.86	22.06 A	14.94	17.59	18.26	16.93 ABC
Média	18.93 c	20.65 b	22.01 a		15.19 b	17.26 a	17.96 a	
Doses	7.408**				5.0147**			
Tempo	40.493**				27.1980**			
Doses*Tempo	1.292 NS				0.5933 NS			
CV%	6				8			

Solos mais magnéticos – originados de basalto					Solos mais magnéticos – originados de arenito			
Doses (T ha-1)	K							
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	2.79 B a	3.11 A a	2.42 B a	2.77	3.83	3.33	2.55	3.23 AB
0.4	5.06 A a	3.97 A ab	3.85 A b	4.29	4.24	3.49	2.12	3.28 A
0.5	5.99 A a	4.17 A b	3.55 AB b	4.57	3.42	3.26	2.23	2.97 ABC
1	6.23 A a	3.71 A b	2.90 AB b	4.28	3.49	3.5	2.43	3.14 AB
2	4.97 A a	4.37 A a	2.88 AB b	4.07	3.11	2.87	2.26	2.75 BC
4	5.38 A a	3.98 A b	2.73 AB c	4.03	2.51	2.78	2.1	2.46 C
Média	5.07	3.88	3.06		3.43 a	3.21 a	2.28 b	
Doses	11.219**				6.444**			
Tempo	57.524**				47.858**			
Doses*Tempo	3.637**				1.928 NS			
CV%	16				15			
Doses (T ha-1)	H+Al							
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	18.17	18.02	17.77	17.99 B	24.68	27.06	27.97	26.57 AB
0.4	23.37	25.54	24.47	24.46 A	24.76	26.15	26.01	25.64 B
0.5	23.72	25.4	25.21	24.78 A	25.31	26.13	25.33	25.59 B
1	23.22	24.36	24.11	23.89 A	25.6	26.83	26.2	26.21 AB
2	22.16	25.53	25.35	24.35 A	26.28	27.08	28.99	27.45 A
4	22.75	24.67	24.31	23.91 A	25.82	27.7	29.19	27.57 A
Média	22.23 b	23.92 a	23.54 a		25.41 b	26.83 a	27.28 a	
Doses	37.324 **				4.2473**			
Tempo	8.691 **				10.9451 **			
Doses*Tempo	0.876 NS				1.2030 NS			
CV%	6				5			
Doses (T ha-1)	Soma de bases (SB)							
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	56.57 B b	63.82 A a	68.95 A a	63.11	47.93	46.62	51.86	48.80 AB
0.4	65.47 A a	63.61 A a	67.50 A a	65.53	47.52	52.11	49.67	49.77 AB
0.5	61.77 AB a	62.32 A a	67.87 A a	63.99	51.49	55.79	54.42	53.90 A
1	68.35 A a	64.40 A a	64.52 A a	65.76	48.08	52.57	56.18	52.28 AB
2	61.46 AB b	63.85 A ab	69.10 A a	64.8	44.44	47.22	51.2	47.62 B
4	69.34 A a	70.30 A a	70.54 A a	70.06	43.62	51.32	53.38	49.44 AB
Média	63.83	64.72	68.08		47.18 b	50.94 a	52.79 a	
Doses	4.5713**				3.6198**			
Tempo	7.8634**				10.8160 **			
Doses*Tempo	2.3097*				1.0195 NS			
CV%	6				8			
Doses (T ha-1)	CTC							
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	74.74	81.84	86.72	81.10 C	72.61	73.68	79.83	75.38 A
0.4	88.84	89.16	91.98	89.99 AB	72.29	78.26	75.68	75.41 A
0.5	85.5	87.72	93.08	88.77 B	76.8	81.92	79.75	79.49 A
1	91.57	88.76	88.62	89.65 AB	73.67	79.4	82.38	78.48 A
2	83.62	89.38	94.46	89.15 AB	70.72	74.3	80.19	75.07 A
4	92.09	94.98	94.85	93.97 A	69.44	79.02	82.57	77.01 A
Média	86.06 b	88.64 b	91.62 a		72.59 b	77.76 a	80.07 a	
Doses	11.7998**				2.1630 NS			
Tempo	10.3416**				18.5865**			
Doses*Tempo	1.9086 NS				1.3229 NS			
CV%	5				6			
Doses (T ha-1)	V%							
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	75.59	77.99	79.52	77.70 A	65.87	63.12	64.88	64.62 BC
0.4	73.67	71.36	73.39	72.81 AB	65.41	66.55	65.56	65.84 ABC
0.5	72.03	71.03	72.9	71.99 C	66.85	68.11	68.22	67.73 A
1	74.64	72.56	72.81	73.34 AB	65.27	66.21	68.19	66.56 AB
2	73.44	71.44	73.14	72.67 AB	62.84	63.54	63.79	63.39 C
4	75.27	74.02	74.36	74.55 B	62.75	64.91	64.62	64.09 BC
Média	74.11 ab	73.07 b	74.35 a		64.83	65.41	65.88	
Doses	18.2670**				5.3996**			
Tempo	3.9517*				1.1178 NS			
Doses*Tempo	1.8320 NS				0.6891 NS			
CV%	2				4			

Solos mais magnéticos – originados de basalto					Solos mais magnéticos – originados de arenito			
Doses (T ha-1)	SMf				SMhf			
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	12.63	13.83	13.58	13.35 B	27.09	27.47	25.36	26.64 A
0.4	16.8	17.43	17.15	17.13 A	27.35	28.33	25.38	27.02 A
0.5	17.3	17.44	17.36	17.37 A	27.78	28.12	25.1	27.00 A
1	17.11	17.96	17.47	17.51 A	27.4	27.41	25.3	26.71 A
2	16.89	17.64	17.61	17.38 A	27.79	27.58	25.51	26.96 A
4	16.64	17.83	17.15	17.21 A	27.51	27.75	24.97	26.74 A
Média	16.23 b	17.02 a	16.72 a		27.49 a	27.78 a	25.27 b	
Doses	84.788**				0.426 NS			
Tempo	10.299**				57.990**			
Doses*Tempo	0.559 NS				0.423 NS			
CV%	4				3			
Doses (T ha-1)	SMhf				Média de SM (%)			
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	10.8	11.75	11.57	11.38 B	24	24.24	22.08	23.44 A
0.4	14.31	15.1	14.74	14.72 A	24.44	24.93	22.8	24.06 A
0.5	14.94	15.03	15.02	15.00 A	24.6	24.91	22.3	23.93 A
1	14.49	15.5	15.02	15.00 A	24.18	24.1	22.8	23.69 A
2	14.48	15.2	15.35	15.01 A	24.59	24.62	22.94	24.05 A
4	14.32	15.22	14.71	14.75 A	24.24	24.63	22.11	23.66 A
Média	13.89 b	14.63 a	14.40 a		24.34 a	24.57 a	22.51 b	
Doses	87.077**				1.149 NS			
Tempo	12.156**				47.583**			
Doses*Tempo	0.607 NS				0.429 NS			
CV%	4				3			
Doses (T ha-1)	FeO				FeD			
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	11.3	11.3	11.07	11.22 B	17.26 A b	17.62 A ab	19.57 C a	18.15
0.4	12.94	12.34	15.33	13.54 A	18.41 A a	19.22 A a	20.01 C a	19.21
0.5	13.82	14.07	13.34	13.75 A	17.41 A b	18.59 A b	20.88 BC a	18.96
1	12.15	13.98	15.04	13.72 A	17.81 A b	18.57 A b	21.55 BC a	19.31
2	12.65	13.13	13.5	13.09 AB	18.33 A b	19.36 A b	23.11 AB a	20.27
4	12.92	13.23	13.67	13.27 A	17.24 A b	18.14 A b	24.29 A a	19.89
Média	12.63 a	13.01 a	13.66 a		17.74	18.58	21.57	
Doses	4.3638**				4.950**			
Tempo	2.5762 NS				73.268**			
Doses*Tempo	1.1143 NS				3.635**			
CV%	12				6			
Doses (T ha-1)	FeO/Fed				FeD			
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	35.21 C a	36.66 B a	36.14 B a	36	41.72	41.4	42	41.71 A
0.4	42.48 AB a	42.32 A a	42.72 AB a	42.51	41.48	41.24	41.17	41.30 A
0.5	43.12 A a	43.12 A a	42.37 C a	42.87	41.47	40.89	41.92	41.42 A
1	42.90 AB a	42.57 A a	43.23 AB a	42.9	41.35	41.55	41.37	41.42 A
2	40.55 B b	42.07 A b	44.97 A a	42.53	40.5	41.67	41	41.06 A
4	41.86 AB b	41.77 A b	44.82 AB a	42.82	40.97	41.73	41.23	41.31 A
Média	41.02	41.42	42.38		41.25 a	41.42 a	41.45 a	
Doses	64.634**				0.67290 NS			
Tempo	8.317**				0.33910 NS			
Doses*Tempo	3.440**				0.80981 NS			
CV%	3				2			
Doses (T ha-1)	FeO/Fed				FeO/Fed			
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Média
0	0.32	0.31	0.31	0.31 A	0.41 A a	0.43 A a	0.47 C a	0.44
0.4	0.3	0.29	0.36	0.32 A	0.44 A a	0.47 A a	0.49 C a	0.47
0.5	0.32	0.33	0.32	0.32 A	0.42 A b	0.46 A ab	0.50 BC a	0.46
1	0.28	0.33	0.35	0.32 A	0.43 A b	0.45 A b	0.52 ABC a	0.47
2	0.31	0.31	0.3	0.31 A	0.45 A b	0.46 A b	0.56 AB a	0.49
4	0.31	0.32	0.3	0.31 A	0.42 A b	0.43 A b	0.59 A a	0.48
Média	0.31 a	0.31 a	0.32 a		0.43	0.45	0.52	
Doses	0.27206 NS				4.72**			
Tempo	0.75304 NS				56.54**			
Doses*Tempo	1.17050 NS				2.96**			
CV%	13				7			

A capacidade de troca de cátions (CTC) é uma característica físico-química fundamental ao manejo adequado da fertilidade do solo, e de forma simples, é considerado o tamanho do reservatório de cátions no solo. Sua importância refere-se diretamente à estruturação e consistência do solo e retenção de água, e seu incremento tende a melhorar as funções ecossistêmicas do solo. Observa-se que no NSF existem várias regiões com influências de C orgânico, material orgânico, e vibrações moleculares referentes a moléculas de água e agrupamentos OH (Sherman; Waite, 1985; Stenberg et al., 2010; Viscarra Rossel et al., 2006), estas características favoreceram o aumento de CTC nos solos mesmo nas menores doses e implicam em aumento da qualidade do solo. Ao longo do período de avaliação, o índice de saturação por bases (V%) permaneceu acima de 70%, o que proporciona condições favoráveis para o desenvolvimento da maioria das culturas, indicando que mesmo com aumento do teor de acidez potencial (H^+Al) com a aplicação da nanopartícula, nutrientes como Ca, Mg e K continuarão disponíveis em proporções ótimas para as plantas.

Em SB houve um aumento de P com as maiores doses de NSF. Em relação ao período de ação, houve aumento do tempo 1 para o tempo 2 com depleção no tempo 3. Tal fato pode estar associado à presença de ácidos orgânicos estáveis relacionados ao carbono orgânico do solo que teve comportamento similar ao P. Os ácidos orgânicos estáveis competem pelos sítios de adsorção e fazem com que o P seja liberado para a solução, por meio da quelatização de oxihidróxidos de Fe e Al (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Para o Ca houve incremento ao longo do tempo. Para Mg, K, soma de bases e V% as maiores concentrações foram observadas nas menores doses. A acidez potencial representada por H^+Al aumentou com a adição de maior quantidade de NSF e a CTC do SB teve um aumento gradual ao longo do tempo, porém sem efeito significativo de doses (Tabela 1).

A redução do pH observada em SA com a adição do NSF é explicada com a tendência do aumento da atividade microbiana (Tabela 1). Microrganismos desempenham um papel importante nos processos de acidificação do solo através da decomposição de resíduos orgânicos (Waldrop et al., 2017), processo que libera íons H^+ e ácidos orgânicos, e durante o processo de absorção de nutrientes pelas plantas, que é seguido da liberação pelas raízes de íons H^+ ao meio. Essa tese é reforçada pois ocorreu um aumento da biomassa de plantas com a aplicação da nanopartícula (Tabela 1).

Em SB com um índice de tipo de argila distinto do outro solo e com padrão magnético específico, a adição das menores doses da nanopartícula provocou menores condições de acidez ativa (Tabela 1). A fertilização orgânica tem sido amplamente considerada como uma medida potencial para mitigar a rápida acidificação do solo, e o NSF pode ser classificado como tal, devido à sua estrutura metal orgânica.

Uma análise global de estudos, realizada por Wang et al. (2018), destacou que o pH do solo é o fator determinante para explicar as variações regionais nas emissões de gases do efeito estufa, uma vez que os índices de emissão tendem a aumentar com a redução do pH do solo. Nossos resultados relativos ao pH do solo corroboram os achados de Wu et al. (2024), indicando que a aplicação de NSF em menores doses contribuiu para aumentar o pH do solo em SB.

É amplamente difundido que a acidez do solo é um importante fator limitante para a produção agrícola em muitos sistemas agrícolas em todo o mundo (Kalkhoran et al., 2019). Elevar o pH do solo a partir da aplicação de nanopartículas com ligações orgânicas como o NSF representa uma estratégia para o manejo de áreas agrícolas em ambientes tropicais, que majoritariamente possuem o solo ácido.

Assim, os ferros oxalato, não cristalino (FeO) e ferro cristalino (FeD) foram analisados juntamente com a susceptibilidade magnética (SM) e demais minerais para compor e elucidar alguns de nossos resultados. A matéria orgânica do solo (MOS) pode aumentar a estabilidade dos agregados por meio de dois principais mecanismos: a formação de ligações de materiais orgânicos com as partículas minerais (argila e Fe) ou pela ação física de raízes ou hifas de fungos, e a ação da matéria orgânica na cimentação dos agregados (Figura 4).

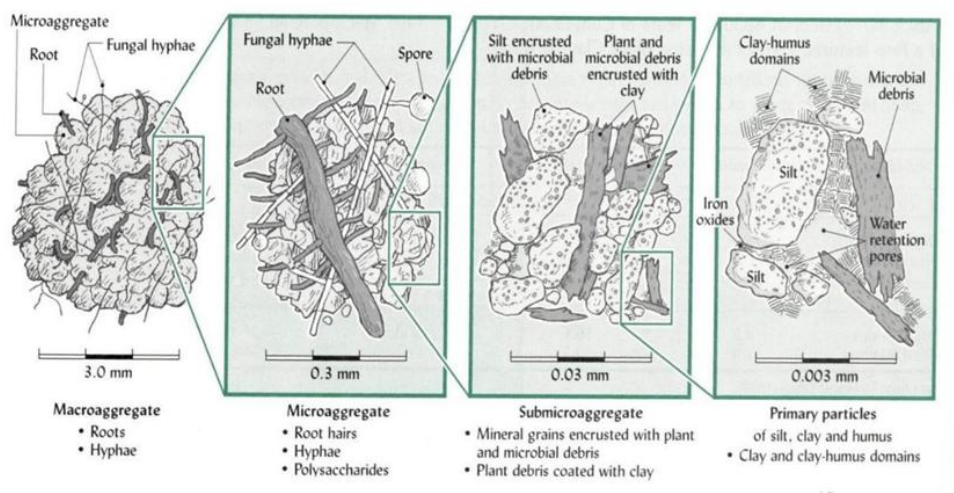


Figura 4. Tamanho e composição dos agregados do solo. Adaptado de Weil e Brady (2017).

Assim como na regulação da dinâmica da MOS, os minerais desempenham um papel fundamental no comportamento de diversos atributos do solo e na disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas (Six et al., 2002; Weil; Brady, 2017). Entendendo que o solo é um dos recursos naturais essenciais à vida no planeta e ao equilíbrio do ecossistema e que sua funcionalidade está diretamente ligada à capacidade que este tem em conseguir manter suas atividades (Araújo; Monteiro, 2007), com o estudo da mineralogia do solo podemos ter conhecimento sobre a gênese desse solo, e entender seu comportamento físico e químico, bem como sua reserva potencial mineral de nutrientes para as plantas (Lepsh, 2011).

Em adição, a nanobiotecnologia trouxe inúmeros benefícios e aplicações para diversas áreas, inclusive aquelas com aplicações biológicas, como a agricultura. Esses nanomateriais com estruturas porosas são usados como transportadores para liberar lentamente nanofertilizantes ou micronutrientes para as plantas. Além disso, essas nanopartículas podem interagir com as plantas tanto através das superfícies externas quanto internas (Chauhan et al., 2022), sendo materiais promissores na agricultura devido às suas propriedades: (i) composições híbridas versáteis, que permitem uma ampla variedade de combinações, (ii) grandes áreas superficiais específicas e volumes de poros, relacionados a excepcionais capacidades de sorção, (iii) simplesmente e funcionalizáveis cavidades, nas quais podem ocorrer interações específicas hospedeiro-hóspede, (iv) síntese em larga escala, permitindo a comercialização; e (v) perfil de estabilidade adequado, sendo suficientemente estáveis para cumprir sua função e, uma vez degradados, evitando a toxicidade associada em animais/plantas devido ao seu acúmulo (Rojas et al., 2022).

A suscetibilidade magnética (SM), os conteúdos de ferro cristalino (FeD) e ferro oxalato, não cristalino (FeO), e a relação FeO/FeD apresentam variação para o tratamento controle. Contudo as aplicações do NSF intensificam estas alterações, principalmente em SA (Tabela 1). Para o SA a adição do NSF resultou no aumento da SM conforme o aumento das doses, sem diferença entre as coletas. Para o SB a SM se manteve praticamente constante entre tratamentos controle e com adição de NSF. Aos 90 dias a SM teve uma redução de duas unidades, mas permaneceu quase inalterável entre o tratamento controle e aqueles que tinham a adição de NSF.

Para os conteúdos de FeD a diferença entre as médias para os tratamentos controle de ambos os solos foi pequena. Contudo para o SA os conteúdos de FeD tendem a aumentar com o aumento da dose do NSF, apresentando diferenças significativas estatisticamente. Enquanto para o SB o FeD tende a diminuir, porém sem diferenças significativas. O contrário acontece para o FeO. O aumento das doses para o SA diminui suas médias e para o SB aumenta.

A relação FeO/FeD é um índice considerado como indicador do grau de evolução do solo (Kampf et al., 2015). Quando a relação é igual ou maior que 1, os óxidos de ferro são mal cristalizados ou amorfos (solo jovem) e o inverso para solos mais desenvolvidos ou mais intemperizados (Prado e Prado, 2022). Ou seja, quanto maior o conteúdo de FeO mais ferro amorfo é encontrado no sistema, indicando que os minerais também apresentam menor cristalinidade. Por outro lado, quanto maior os conteúdos de FeD, maior cristalinidade e estabilidade dos minerais presentes. Indicando que este último solo é considerado mais intemperizados, mais estável em relação ao primeiro.

Para nossas condições de estudo estamos sugerindo a relação FeO/FeD como um indicativo da degradação do NSF. Quanto maior a relação maior o conteúdo de FeO no sistema, maior a quantidade de minerais amorfos. Imagina-se que o NSF ao se degradar, por conter ferro em sua estrutura favorece a maior concentração de ferro cristalino no início, por se tratar de uma nanopartícula sintética e altamente cristalina. Mas ao final do processo passa por uma fase mais amorfa, até se reorganizar com o solo e permanecer estável.

Observa-se pelas médias da relação FeO/FeD para o SA que na primeira coleta ela é significativamente menor quando aplicamos a dose de 1 t ha^{-1} de NSF. Para a segunda coleta a relação aumentou para a dose 0,4 e 1 t ha^{-1} de NSF e diminuiu para os demais. Já para o SB a relação tem um aumento crescente em relação ao aumento da dose de NSF. Estudos para Latossolos originados de basalto apontam que quanto menor a relação FeO/FeD maior o predomínio de fases cristalinas no sistema (Ghidin et al., 2006). Logo, quanto maior o conteúdo de ferro amorfo no sistema maior a degradação do NSF.

Embora os conteúdos de carbono orgânico tenham potencial para favorecer formas de ferro amorfo no sistema, o NSF demonstra que também pode influenciar nessa relação. Silva (2023) estudando a adição de nanopartículas naturais no solo, aponta que a relação FeO/FeD aumentou em 34%.

Por ambos os solos apresentarem diferentes conteúdos de Fe total, temos levantado a hipótese de que para o SA o menor conteúdo de Fe proporciona desequilíbrio suficiente entre as fases levando a quebra mais acelerada do NSF. Então logo nas primeiras doses de NSF já temos a variação de alguns atributos. É conhecido pelos conceitos básicos de intemperismo que o mesmo acontece para que qualquer fase do sistema entre em equilíbrio (Fontes, 2012). Enquanto para o SB, que já apresenta alto conteúdo de Fe, a adição do NSF, também rico em Fe em menores doses, não provocou desequilíbrio suficiente. Portanto, a diferença entre alguns atributos é observada em maiores doses do NSF.

Não há literatura que mostre como o NSF pode interagir com minerais do solo. Mas há literatura que apresenta a interação entre nanopartículas naturais (uso de rocha moída para remineralização do solo) e a mineralogia. De acordo com Swoboda et al., (2022) quando a mineralogia do solo é próxima da mineralogia da rocha utilizada como nanopartícula natural, não existe instabilidade suficiente no sistema para que os minerais da rocha se quebrem e alterem as propriedades do solo. Como prova Silva (2023) estudando o uso de nanopartículas naturais em solos de diferentes geologias (arenito e basalto) aponta que a adição destas tem efeito diferente para as geologias.

Outra hipótese é que aos 90 dias o NSF está no ápice do seu processo de degradação. Foi observado para alguns atributos que estes começaram a apresentar comportamento regular com o aumento das doses em 90 dias. Para esta hipótese iremos conduzir as análises por mais que 90 dias para verificarmos o efeito do NSF por tempo mais prolongado. É sabido na literatura que o pico de degradação do NSF e liberação de seus constituintes é a partir de 60 dias (Wu et al., 2019). Todavia este estudo foi realizado observando sua degradação em água, e no solo a dinâmica será mais acelerada. No solo temos liberação de soluções ácidas pelas raízes, atividade de microrganismos, presença de água e gases, que podem mudar o processo de degradação do NSF.

A análise da assinatura espectral para a NSF (A), está apresentada na Figura 5. Observa-se que no NSF existem várias regiões com influências de C orgânico, material orgânico, e vibrações moleculares referentes a moléculas de água e agrupamentos OH (Sherman; Waite, 1985; Barón et al., 2000; Torrent, 1995; Stenberg et al., 2010; Viscarra Rossel et al., 2006), o que favorece aumento de CTC nos solos. Vale ressaltar que estamos comparando aqui as bandas de absorção destes itens no solo, à nanopartícula sintética NSF.

De modo geral, nota-se que por ser um material branco, o NSF absorve pouco e tem alta reflectância. Solos originados de basalto, naturalmente tem menor reflectância, devido a presença de minerais mais escuros, como os óxidos de ferro que absorvem mais luz e refletem menos (Demattê et al., 2019). Já solos originados de arenito, têm maior reflectância devido a presença de minerais mais claros, como o quartzo, que absorve menos e refletem mais (Demattê et al., 2019).

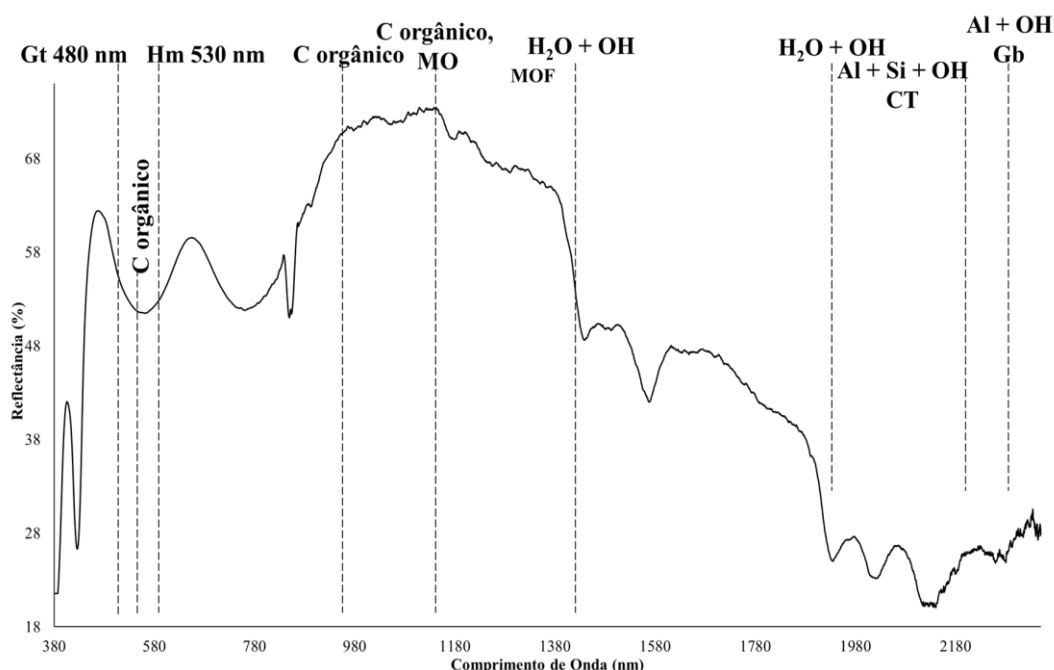


Figura 5. Assinatura espectral referente à nanopartícula sintética rica em ferro (NSF).

Nos primeiros testes apresentados anteriormente, considerando dois Latossolos de geologias de arenito e basalto, quando o NSF foi adicionado ao solo observamos uma diminuição das curvas espectrais para ambos. Enquanto o NSF sozinho possui alta reflectância, quando combinado com o solo, ele diminui a reflectância natural para solos de diferentes geologias.

Para o último experimento realizado com cana-de-açúcar, a primeira coleta de solos aos 28 dias apresentou ligeiro aumento da reflectância em ambos os solos. Quando a coleta foi realizada aos 90 dias, ao final do experimento observamos a diminuição da reflectância. Ambas as curvas estão apresentadas na Figura 6, foram selecionadas apenas as curvas de 0,5 t ha⁻¹ de NSF para o SA e 4 t ha⁻¹ de NSF para o SB. As doses de maior diferença para ambos os atributos avaliados.

A assinatura espectral pode inferir inúmeros atributos do solo, como disponibilidade de elementos, minerais, material orgânico, água e propriedades físicas (England; Viscarra Rossel, 2018; Fernandes et al., 2020; Ahmadi et al., 2021; Demattê et al., 2021; McBride, 2022; Rosin et al., 2023). A diminuição geral na curva espectral pode indicar aumento na proporção de materiais minerais e/ou orgânicos que são escuros e, portanto, absorvem mais luz. A alteração destes materiais pode influenciar diretamente nas diversas funções ecossistêmicas do solo. Estão sendo realizadas análises mais detalhadas e robustas com base nas assinaturas espectrais, para apontar quais atributos do solo estão se modificando e quais as implicações destas mudanças nas suas funções ecossistêmicas.

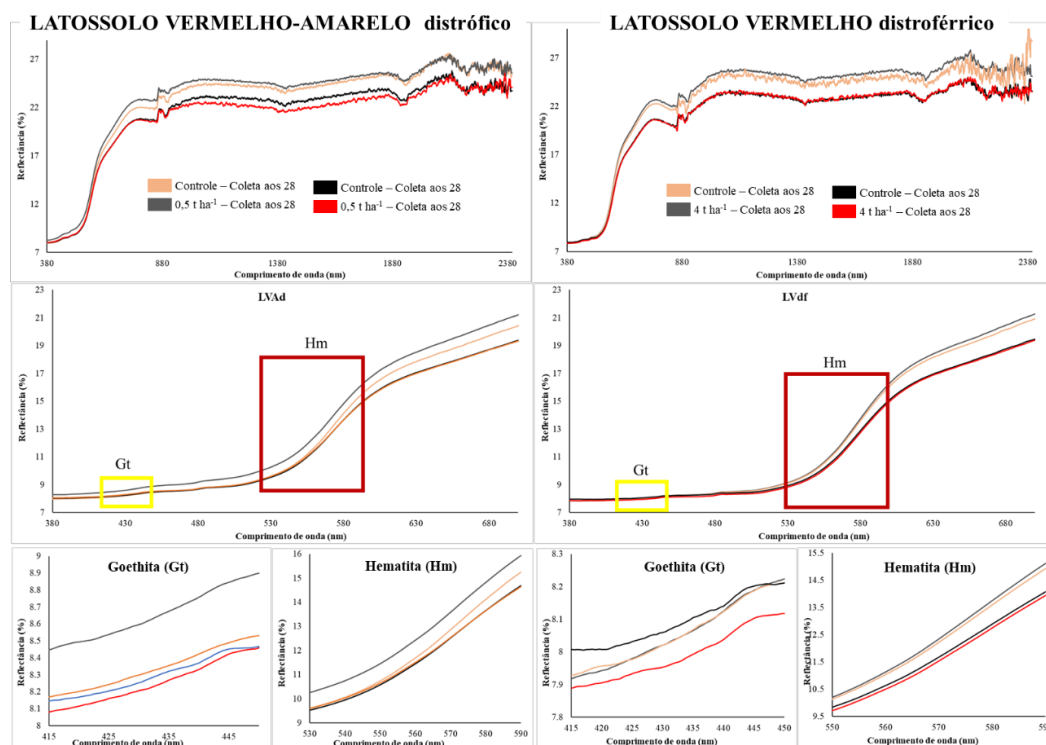


Figura 6. Curvas espectrais para os solos cultivados com cana-de-açúcar aos 28 e 90 dias após a adição da nanopartícula sintética rica em ferro (NSF).

Ao aproximarmos as curvas espectrais para as faixas referentes a Gt (415 a 450 nm) e Hm (550 a 590 nm), conforme apresentando por Bahia et al. (2015), observamos que a adição do NSF intensifica as concavidades e diminui as reflectâncias referentes a Gt e Hm após 90 dias de adição, em ambas as doses e solos. Ao considerar apenas o tratamento controle observamos que também há diminuição da reflectância entre as coletas de 28 e 90 dias. Contudo, quando adicionamos o NSF a diminuição é maior.

No último relatório foram apresentados os difratogramas do NSF e solos para o experimento com rabanete. Observamos que existem picos no NSF que acontecem em reflexos próximos dos minerais e óxidos importantes para o solo. Claro que as estruturas cristalinas nos NSF são diferentes daquelas encontradas no solo, mas as semelhanças entre os picos nos auxiliam a entender as variações nas propriedades cristalinas dos solos. É possível observar que conforme aumentamos a dose do NSF há mudanças nos picos dos minerais e óxidos do solo. Tanto o formato do pico, como a largura a meia altura, área do pico, e o diâmetro médio do cristal são alterados após a adição do NSF.

As análises ainda estão em processo de finalização. Quando trabalhamos com solo, ele recebe dois tratamentos na fração argila para quantificação dos minerais ali presentes. O primeiro é a remoção de óxidos, onde quantificamos caulinita (Ct) e gibbsita (Gb). E o segundo é a concentração de óxidos, para quantificação de Hm e Gt. A primeira análise já foi finalizada, enquanto a segunda está em processo de difração e interpretação.

Os difratogramas referentes a Ct e Gb, indicam que a cristalinidade destes para a coleta aos 28 e 90 dias muda tanto para o controle, como para os tratamentos com adição de NSF (Figura 7). Para o SA os atributos não apresentaram diferenças significativas considerando a dose dentro de cada coleta. Considerando o tratamento controle o diâmetro médio do cristal (DMC) e a largura a meia altura (LMA) apresentaram diferentes médias (Figura 8). Enquanto a área e a relação Ct/(Ct+Gb) permanecem semelhantes para o tratamento.

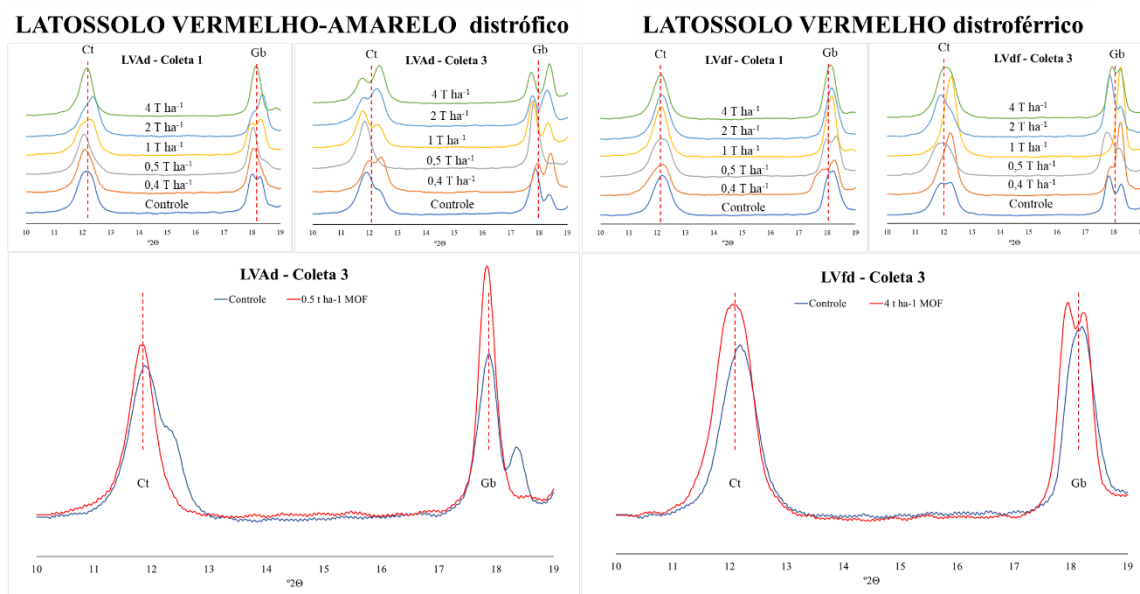


Figura 7. Difractogramas para amostras de argila com remoção de óxidos para os Latossolos Vermelho-Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho distroférico, para a coletas 1 (aos 28 dias após adição do NSF) e coleta 3 (aos 90 dias após adição do NSF).

Para a largura a meia altura (LMA) da Ct observa-se que para o tratamento controle o atributo aumenta aos 90 dias. Considerando a média de maior diferença para os demais atributos analisados, a dose de $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de NSF tende a diminuir a LMA, enquanto o DMC aumenta. A área do pico da Ct diminui para a dose de $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de NSF e a relação também foi menor para a relação $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$. Para a Gb a LMA diminuiu e o DMC e a área aumentaram para a dose de $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de NSF (Figura 8).

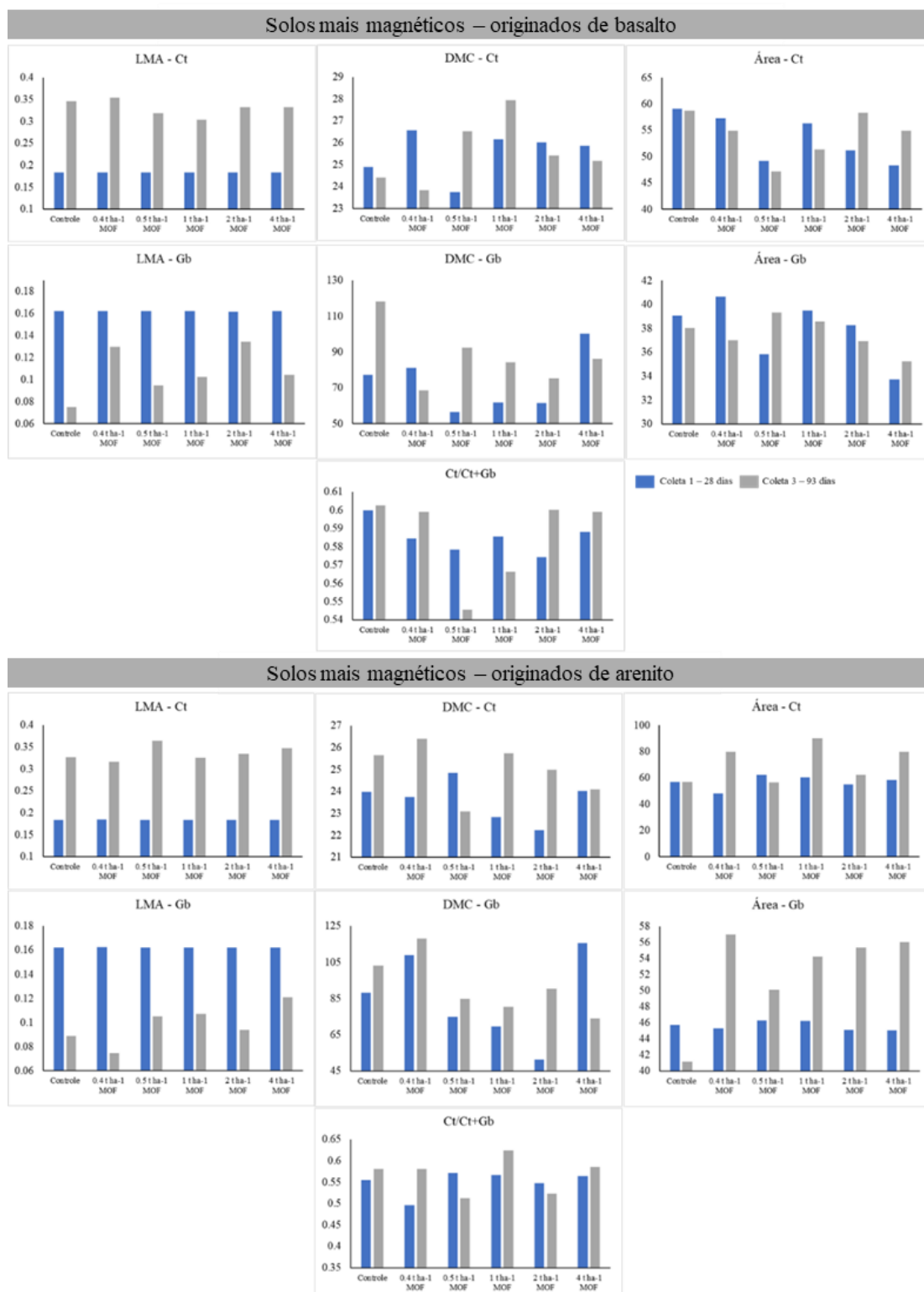


Figura 8. Dados cristalográficos para amostras de argila com remoção de óxidos (Caulinita-Ct e Gibbsite-Gb) para os solos menos magnéticos, originados de arenito – AS, e solos mais magnéticos, originados de basalto - SB, para a coletas 1 (aos 28 dias após adição do NSF) e coleta 3 (aos 90 dias após adição do NSF). DMC – Diâmetro médio do cristal. LMA – Largura a meia altura.

Para o SB, considerando a dose de 4 t ha⁻¹ de NSF, como a que apresentou maior diferença para os demais atributos. A LMA da Ct aumentou com o tempo de coleta, mas

apresentou pouca alteração em função das doses de NSF. O DMC para a dose de 4 t ha⁻¹ de NSF foi menor em relação ao tratamento. Para a Gb, a LMA para a primeira coleta não apresentou variações. Aos 90 dias aumentou para a dose de 4 t ha⁻¹ de NSF. Enquanto o DMC aumentou após 28 dias de aplicação do NSF e diminuiu aos 90 dias (Figura 8).

A área do pico de ambos os minerais, Ct e Gb, apresentaram diferenças significativas para a coleta aos 90 dias. A tendência foi o aumento da área do pico com o aumento da adição do NSF. A relação Ct/(Ct+Gb) apresentou pouca variação. Os resultados apontam que a atividade do solo pode influenciar a cristalografia dos minerais ao longo do tempo. Porém a adição do NSF pode influenciar na área do pico para Ct e Gb e na relação Ct/(Ct+Gb) (Figura 8).

De acordo com a literatura básica, a Ct é favorecida pela maior quantidade de carbono orgânico na solução do solo, percolação lenta de água e baixo teor de ferro, enquanto a Gb é favorecida por ambientes de intemperismo intenso e melhor drenagem (Resende, 1976; Hsu, 1977). Maiores valores de conteúdo de ferro em solos ácidos favorecem predomínio de cargas positivas, maior adsorção de silício e menor concentração deste na solução (Curi, 1983). Como resultado, há tendência à formação de maior quantidade de Gb.

A cristalinidade da Ct é prejudicada quando existe maior concentração de ferro no solo (Murray e Lyons, 1960). Os maiores conteúdos de ferro provocam a desordem estrutural da Ct. Pelo contrário, pesquisas apontam correlação positiva entre o teor e a cristalinidade da Gb em solos com maiores conteúdos de ferro. Para o SA, solo com menor conteúdo de ferro, a adição do NSF, na dose de 0,5 t ha⁻¹ favoreceu o predomínio da Gb no sistema, apresentando maior área do pico e menor relação Ct/(Ct+Gb).

A Ct é favorecida por maior quantidade de carbono orgânico na solução do solo, percolação lenta de água e baixo teor de ferro e titânio da rocha de origem, enquanto a Gb é favorecida em ambientes de intemperismo mais intenso e boa drenagem (Resende, 1976; HSU, 1977). Os maiores valores de óxidos em ambientes ácidos condicionam um balanço de cargas positivas, favorecendo uma maior adsorção de ácido silícico e menor concentração do mesmo na solução do solo (Curi, 1983). Em consequência há uma tendência à formação de maiores quantidades de Gb (McKeague e Cline, 1963).

Para o SB, solo com maior teor de ferro, a área da Gb também aumentou, mas a relação Ct/(Ct+Gb) não houve mudanças. A adição do NSF tem favorecido o aumento de carbono orgânico do solo e no desenvolvimento das plantas. O que aumenta a atividade

biológica do solo. Além de ser uma nanopartícula rica em ferro. Autores apontam que solos com maior conteúdo de ferro favorecem a formação de Gb porque não possuem conteúdo de Si suficiente para precipitar em Ct (Moniz, 1967; Resende, 1980; Moniz et al., 1982). Portanto o NSF tem alterado a dinâmica química e biológica do solo, que influencia diretamente na sua mineralogia.

Quanto à cristalinidade da Ct quanto maior o conteúdo de Fe maior sua desordem estrutural, aumentando sua superfície específica (Murray e Lyons, 1960). Quanto a Gb a sua cristalinidade pode ser definida por diversos fatores, impurezas, composição química e componentes cristalinos ou amorfo do solo (Schoen e Roberson, 1970). O NSF tem demonstrado o potencial para alterar toda a dinâmica do solo, e assim a cristalinidade dos minerais.

As análises de concentração de óxidos que identificam os conteúdos de hematita (Hm) e goethita (Gt) no solo também já foram finalizadas para o experimento e podem ser observadas na Figura 9. Os picos de Gt em 22 e 36° 2 theta e da Hm em 24 e 35° 2 theta são os reflexos comuns que utilizamos para quantificação e caracterização destes óxidos no solo. São referentes aos reflexos de maior expressão destes no solo. Ao compararmos a expressão dos picos nota-se diferenças quando há adições de NSF. Todavia o pico mais expressivo foi em 45° 2 theta para ambos os solos.

O reflexo da Gt em 45° theta é pouco expressivo no solo ou amostras sintéticas de Gt. Observa-se que ao adicionar o NSF em diferentes doses a expressão do reflexo desse óxido aumentou em ambos os solos. As explicações e base literária para este aumento ainda estão em fase de investigação. A Gt via gênese preferencial de formação é um dos primeiros óxidos a se formar após a liberação do Fe^{2+} dos minerais primários, este se oxida e na presença de água, dá origem a Gt. Para a fabricação do NSF o Fe é um dos íons utilizados, já sendo um possível precursor para a formação de Gt no solo.

No ambiente da casa de vegetação a temperatura e umidade é controlada, é preferível manter a umidade em alta e temperatura próxima de 30 a 35°C. Alta temperatura e umidade podem ter favorecido condições de gênese favorável a cristalização da Gt em 45° 2 theta. Será investigado em literaturas tradicionais e artigos atuais sobre as rotas de gênese da Gt, se há alguma evidência sobre a formação desta neste reflexo e quais os impactos desta nas funções ecossistêmicas do solo.

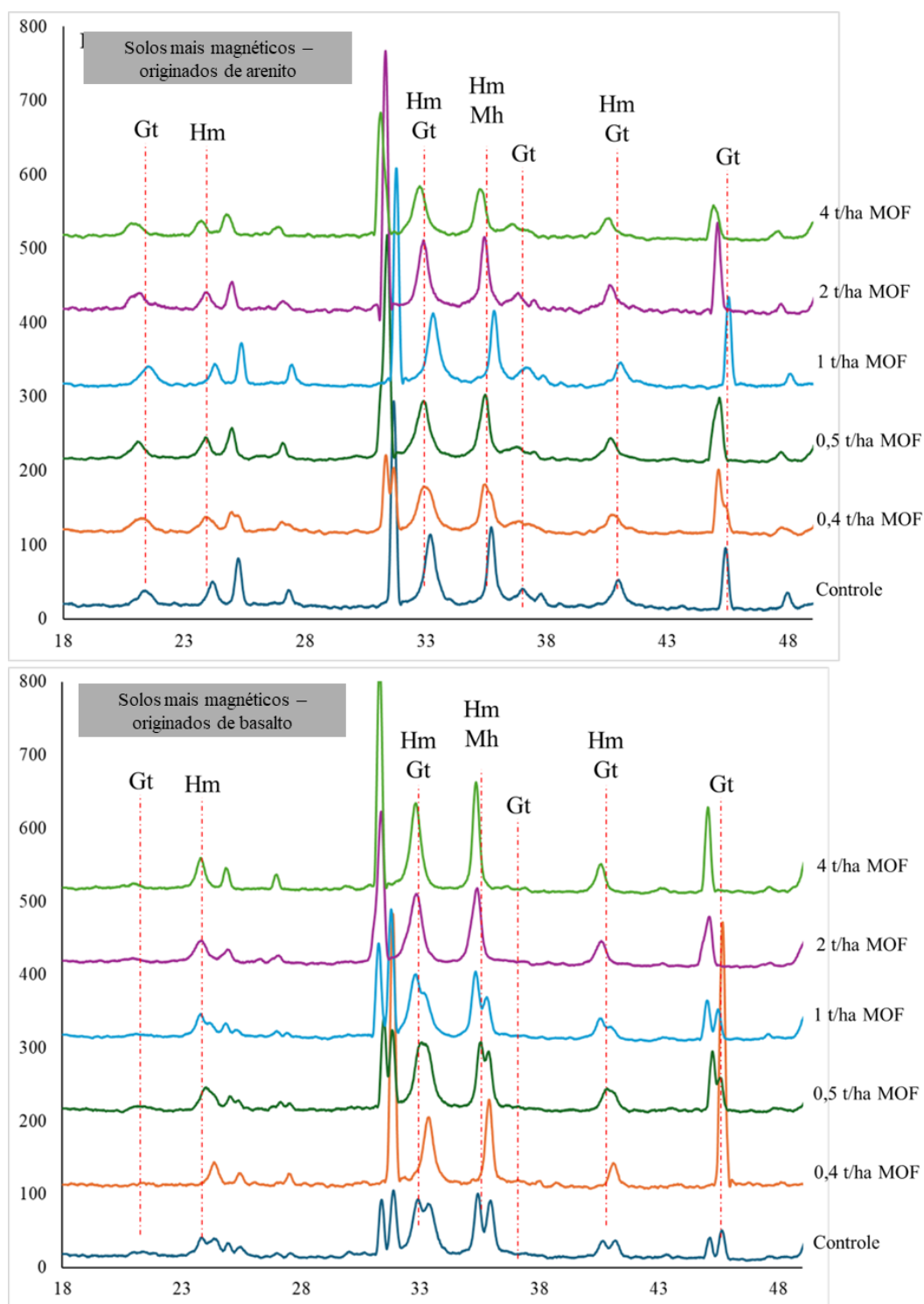


Figura 9. Difratomogramas para amostras de argila com concentração de óxidos para os solos menos magnéticos, originados de arenito – AS, e solos mais magnéticos, originados de basalto - SB, para a coleta 3 (aos 90 dias após adição do NSF).

Os macronutrientes N, P e K absorvidos pela parte aérea de cana-de-açúcar apresentaram diferenças significativas entre os tipos de solo, com os teores em SA geralmente superiores a SB. Tal achado está associado à mineralogia do solo, já que solos

com maiores teores de ferro tendem a absorver mais nutrientes e assim criar ambientes de competição pela absorção dos íons com as plantas (Novais; Smith, 1999).

O teor de N no tecido vegetal apresentou crescimento em cerca de 20% na dose 1 t ha⁻¹, em relação à dose 0,4 t ha⁻¹. Um efeito similar foi encontrado em plantas de trigo, cultivadas em solos alcalinos e tratados com NSF (Vasel et al., 2024).

Para P, não houve interações significativas entre os solos e as doses, contudo, a partir da dose de 1 t ha⁻¹ da nanopartícula ocorreu aumento da absorção do nutriente pela planta em ambos os solos estudados (Tabela 6).

O teor de K em plantas cultivadas em SA foram superiores aos das plantas cultivadas em SB, acompanhando a disponibilidade mostrada pelos resultados das análises de solo (Tabela 1 e 2). Para Ca, Mg e S dos tecidos vegetais, não foram encontradas diferenças significativas entre os solos, doses ou suas interações, apesar da adição do NSF ter proporcionado incremento dos teores de Ca e Mg nos solos ao longo do tempo (Tabela 1).

Os teores de boro (B) em plantas de cana-de-açúcar não apresentaram variações significativas em função do tipo de solo ou das doses aplicadas. Para cobre (Cu), os teores em plantas cultivadas em SB foram maiores que as de SA e o acúmulo do nutriente foi crescente em função das doses. Para o ferro (Fe), os teores em plantas cultivadas em SB foram menores do que os encontrados em SA, e a aplicação da nanopartícula mostrou apenas uma tendência de aumento do acúmulo nas doses mais altas.

Os teores de manganês (Mn) em cana-de-açúcar foram significativamente maiores no SB em comparação ao SA, sem efeito significativo de doses. A biodisponibilidade de Mn para as plantas é aumentada em solos com menores valores de pH (Brady; Weil, 2009), como foi observado nas maiores doses de NSF do solo mais magnético. As plantas cultivadas com maiores doses de NSF apresentaram maior acúmulo de zinco (Zn) nos tecidos vegetais, sem efeito significativo da interação entre solo e doses e solo.

Nossos achados indicam que o tipo de argila natural presentes nos solos é um fator determinante para a disponibilidade de nutrientes para as plantas cultivadas em solos tropicais e com adição de NSF; em SA os teores foram maiores para N, P, K, Fe, e em SB para Mn e Cu. Em solo ácido e rico em ferro tratado com uma NSF, Anstoetz et al (2015) verificaram que os teores de N, P, e Zn na parte aérea de plantas de trigo foram significativamente maiores do que nas plantas controle, concordando em parte com nossos achados.

Tabela 2. Análise de variância e teste de médias para os macronutrientes e micronutrientes acumulados na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar.

Doses	N			P			K		
	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média
0	12.98	11.41	12.19 AB	1.60	1.59	1.60 B	28.69	25.47	27.08
0.4	12.59	11.17	11.88 B	2.06	1.96	2.01 AB	29.84	21.58	25.71
0.5	13.08	12.72	12.90 AB	2.09	1.79	1.94 AB	31.81	22.48	27.15
1	15.54	12.96	14.25 A	2.41	1.94	2.17 A	29.28	21.54	25.41
2	14.56	12.18	13.37 AB	2.18	1.92	2.05 A	30.12	16.61	23.36
4	14.89	12.54	13.71 AB	2.25	2.14	2.19 A	29.10	25.27	27.19
Média		12.16						22.16	
	13.94 a	b		2.10 a	1.89 b		29.81 a	b	
F (solo)		17.65**			6.01*			25.30**	
F (dose)		3.03*			4.91**			0.65 ns	
F (solo*dose)		0.65 ns			0.80 ns			1.04 ns	
CV (%)		11			14			20	
Doses	Ca			Mg			S		
	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média
0	3.40	3.28	3.34	2.73	2.74	2.74	2.86	3.09	2.97
0.4	3.00	3.30	3.15	2.53	2.56	2.55	2.87	2.76	2.82
0.5	3.29	3.22	3.26	2.57	2.72	2.65	2.72	3.18	2.95
1	3.42	3.60	3.51	2.71	2.83	2.77	2.62	2.96	2.79
2	3.43	3.58	3.50	2.63	2.63	2.63	2.25	2.78	2.51
4	3.41	3.65	3.53	2.66	2.79	2.72	2.69	2.50	2.59
Média	3.33	3.44		2.64	2.71		2.67	2.88	
F (solo)		1.76 ns			1.94 ns			2.38 ns	
F (dose)		1.63 ns			1.67 ns			1.69 ns	
F (solo*dose)		0.90 ns			0.24 ns			0.98 ns	
CV (%)		8			7			15	
Doses	B			Cu			Fe		
	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média
0	16.65	17.98	17.31	4.83	4.81	4.82 C	70.01	63.16	66.59
0.4	16.04	19.06	17.55	5.41	5.81	5.61 BC	67.96	63.25	65.60
0.5	17.13	18.46	17.79	6.11	6.65	6.38 AB	77.44	64.63	71.03
1	17.73	18.34	18.04	6.29	7.06	6.67 AB	84.19	71.79	77.99
2	17.61	19.55	18.58	5.65	6.27	5.96 AB	81.68	68.67	75.17
4	17.99	16.52	17.26	6.25	7.50	6.88 A	82.12	73.03	77.58
Média							77.23		
	17.19	18.32		5.76 b	6.35 a		a	67.42 b	
F (solo)		2.12 ns			8.84**			5.53*	
F (dose)		0.27 ns			9.44**			1.13 ns	
F (solo*dose)		0.62 ns			0.71 ns			0.12 ns	
CV (%)		15			12			20	
Doses	Mn			Zn					
	LVAd	LVdf	Média	LVAd	LVdf	Média			
0	19.74	24.94	22.34	25.01	27.35	26.18 AB			
0.4	24.60	31.36	27.98	27.08	24.68	25.88 AB			
0.5	19.37	35.59	27.48	28.31	27.60	27.95 A			
1	14.60	28.17	21.38	27.09	24.86	25.98 AB			
2	17.54	39.60	28.57	24.92	21.68	23.30 B			
4	25.05	23.71	24.38	28.30	28.75	28.52 A			
Média	20.15	30.56							
	a	b		26.78	25.82				
F (solo)		19.19**			1.29 ns				
F (dose)		1.12 ns			3.12*				
F (solo*dose)		2.11 ns			1.01 ns				
CV (%)		32			11				

Média seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%; NS= não significativo; CV (%) = coeficiente de variação.

Experimento com milho

A maioria dos macronutrientes acumulados pelas plantas diferiram em função dos tratamentos nos solos de arenito e basalto (Figura 10).

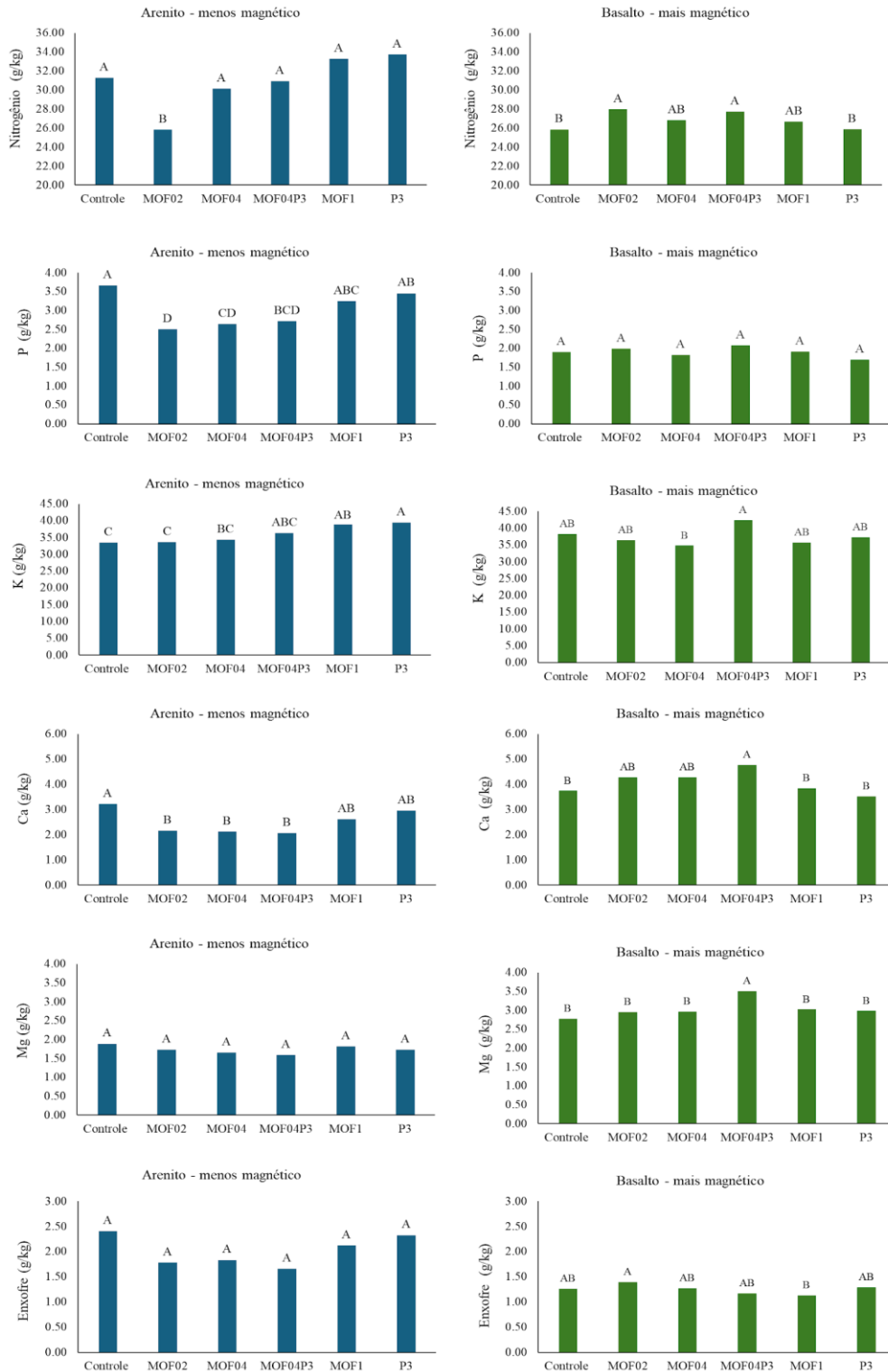


Figura 10. Médias dos macronutrientes acumulados na parte aérea das plantas milho em função das doses (NSF e pó de rocha) nos solos de basalto e arenito. NSF02 (0,2 t ha⁻¹ de NSF), NSF04 (0,4 t ha⁻¹ de NSF), NSF04PO3 (0,4 t ha⁻¹ de NSF + 3 t ha⁻¹ de pó de rocha), NSF1 (1 t ha⁻¹ de NSF), P3 (t ha⁻¹ de pó de rocha), controle.

Em relação ao N, nas plantas sob solo de arenito houve uma tendência de incremento com a maior dose de NSF1 (1 t ha^{-1}) e no tratamento com pó de rocha (3 t ha^{-1}) e decréscimo na menor dose de NSF ($0,2 \text{ t ha}^{-1}$). Nas plantas cultivadas sob solo de basalto houve efeito contrário ao observado no solo de arenito, no basalto houve incremento na assimilação de N pela planta na dose de $0,2 \text{ t ha}^{-1}$ e na combinação da dose de $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ NSF + 3 t ha^{-1} de pó de rocha.

Para o P houve redução na assimilação pelas plantas no solo de arenito quando comparados os tratamentos com o controle. Em adição, não houve diferença em relação as plantas cultivadas no solo de basalto. No solo de basalto, as plantas sob tratamento com a combinação de $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ de NSF + 3 t ha^{-1} de pó de rocha (NSF04P3) se destacaram por acumularem mais nutrientes, a exemplo do N, K, Ca e Mg.

O teor de K nas plantas sob solo de arenito aumentou gradualmente em função do aumento das doses de NSF e combinações com pó de rocha, porém com destaque para o tratamento somente com o pó de rocha. Para o Ca, observou-se menor acúmulo nas menores doses de NSF.

Em relação aos micronutrientes as plantas sob solo de arenito se destacaram por acumularem mais boro, ferro e manganês (Figura 11). O acúmulo de ferro foi expressivamente maior nessas plantas quando comparado as plantas sob solo de basalto. No solo de arenito o acúmulo pelas plantas de boro e cobre diminuiu ($p < 0,05$) quando aplicado os tratamentos. Em adição, no solo de basalto o acúmulo de boro aumentou nos tratamentos com NSF (NSF02, NSF04 e NSF04P3).

No solo de basalto, não houve diferença ($p > 0,05$) em relação em acúmulo de cobre e manganês pelas plantas. Em adição, em relação ao zinco, houve diferença ($p < 0,05$) entre os tratamentos, com destaque para maior acúmulo no tratamento NSF04 e redução nos tratamentos com adição de pó de rocha (NSF04P3 e P3).

Em suma, observou-se maior acúmulo de macro e micronutrientes nas plantas cultivadas sob solo de arenito (Figuras 10 e 11). Geralmente, plantas que acumulam mais nutrientes tendem a se desenvolver melhor, pois os nutrientes são essenciais para diversos processos de crescimento e produção. No entanto, há algumas exceções e considerações importantes, a exemplo do (i) excesso de certos nutrientes que pode causar toxicidade e, paradoxalmente, prejudicar o desenvolvimento da planta. Por exemplo, níveis excessivos de nitrogênio podem causar crescimento excessivo de folhas à custa do desenvolvimento

de flores e frutos; (ii), desequilíbrio de nutrientes, as plantas precisam de um equilíbrio adequado de diferentes nutrientes.

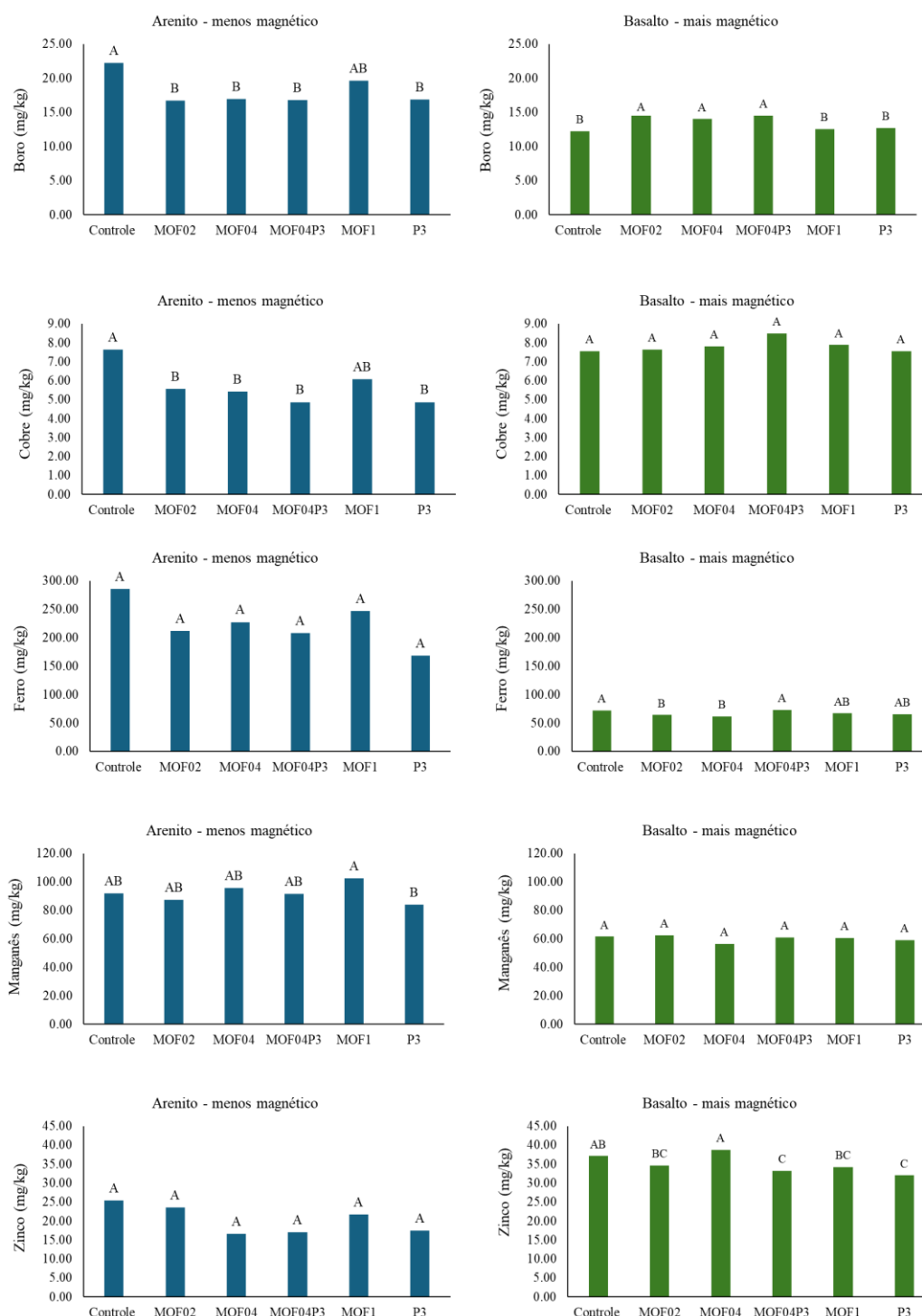


Figura 11. Médias dos micronutrientes acumulados na parte aérea das plantas milho em função das doses (NSF e pó de rocha) nos solos de basalto e arenito. NSF02 (0,2 t ha⁻¹ de NSF), NSF04 (0,4 t ha⁻¹ de NSF), NSF04PO3 (0,4 t ha⁻¹ de NSF + 3 t ha⁻¹ de pó de rocha), NSF1 (1 t ha⁻¹ de NSF), P3 (t ha⁻¹ de pó de rocha), controle (adubação mineral).

A falta de um nutriente pode limitar o crescimento, mesmo que outros nutrientes estejam em abundância; (iii) acúmulo de nutrientes em tecidos específicos, uma vez que algumas plantas podem acumular nutrientes em tecidos específicos como folhas ou raízes sem necessariamente aumentar a biomassa total (Ameen et al., 2023; Kiri et al., 2023). Isso pode ser parte de uma estratégia adaptativa em ambientes pobres em nutrientes. Possivelmente, a hipótese que pode se enquadrar no nosso estudo seria a terceira condição, uma vez que comparativamente, o solo de arenito possui menor fertilidade que o solo de basalto, conforme a caracterização química desses solos apresentada na metodologia.

A fertilidade do solo foi modificada em função da aplicação das nanopartículas sintéticas e naturais nos solos estudados, com diminuição do valor de pH no arenito e aumento no basalto. A principal diferença ocorreu no tratamento NSF04P3 no arenito, indicando aumento da acidez ativa (Figura 12a). Esse efeito era esperado pois a aplicação de nanopartícula rica em ferro provoca diminuição do pH do solo ao liberar íons de prótons (H^+) após sua oxidação (Ghassemi-Golezani; Abdoli, 2021). Tal efeito refletiu em menor absorção de nutrientes (P, Ca, B, Cu) pela planta de milho (Figuras 10 e 11). Já no basalto, ocorreu efeito distinto, com diminuição da acidez com a aplicação da nanopartícula sintética a partir da dose $0,4 \text{ t ha}^{-1}$. Esse efeito é positivo para o desenvolvimento vegetal (Figura 10), pois o pH do solo controla a solubilidade dos nutrientes influenciando diretamente sua disponibilidade às plantas.

Mesmo em um curto tempo de experimentação, a aplicação de NSF na dose de $0,2 \text{ t ha}^{-1}$ aumentou em 15% o teor de carbono orgânico do arenito em relação ao controle (Figura 12c). No basalto, o maior teor de carbono orgânico foi obtido no tratamento $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ de NSF ($24,3 \text{ g dm}^{-3}$) em comparação ao tratamento 1 t ha^{-1} de NSF, que apresentou uma pequena depleção de 2 g dm^{-3} . A redução do teor de carbono após esse tratamento pode ser explicada pela adsorção de ácidos húmicos e fúlvicos, (componentes essenciais da matéria orgânica) às superfícies de nanopartículas ricas em ferro, resultando em valores de carbono mais baixos do que o esperado (Forján et al., 2020). No caso deste solo, a lentidão na degradação das nanopartículas pode estar relacionada ao seu elevado teor natural de ferro, o que ajuda a justificar esse comportamento.

A análise dos teores de fósforo e enxofre nos solos após a aplicação das nanopartículas naturais e sintéticas não indicou diferenças em comparação ao tratamento controle, em ambos os tipos de solo. No entanto, no solo de arenito observou-se uma

tendência de redução de 64% no teor de fósforo com a aplicação da nanopartícula natural P3. Por outro lado, o teor de enxofre apresentou uma tendência de aumento de 9% na dose de 0,2 t ha⁻¹ do NSF (Figura 12). A ausência de variações mais expressivas nos demais tratamentos podem ser explicada pela liberação gradual dos nutrientes pelas nanopartículas, que se degradam ao longo do tempo, especialmente após 45 dias de contato com o solo, como evidenciado em estudos anteriores.

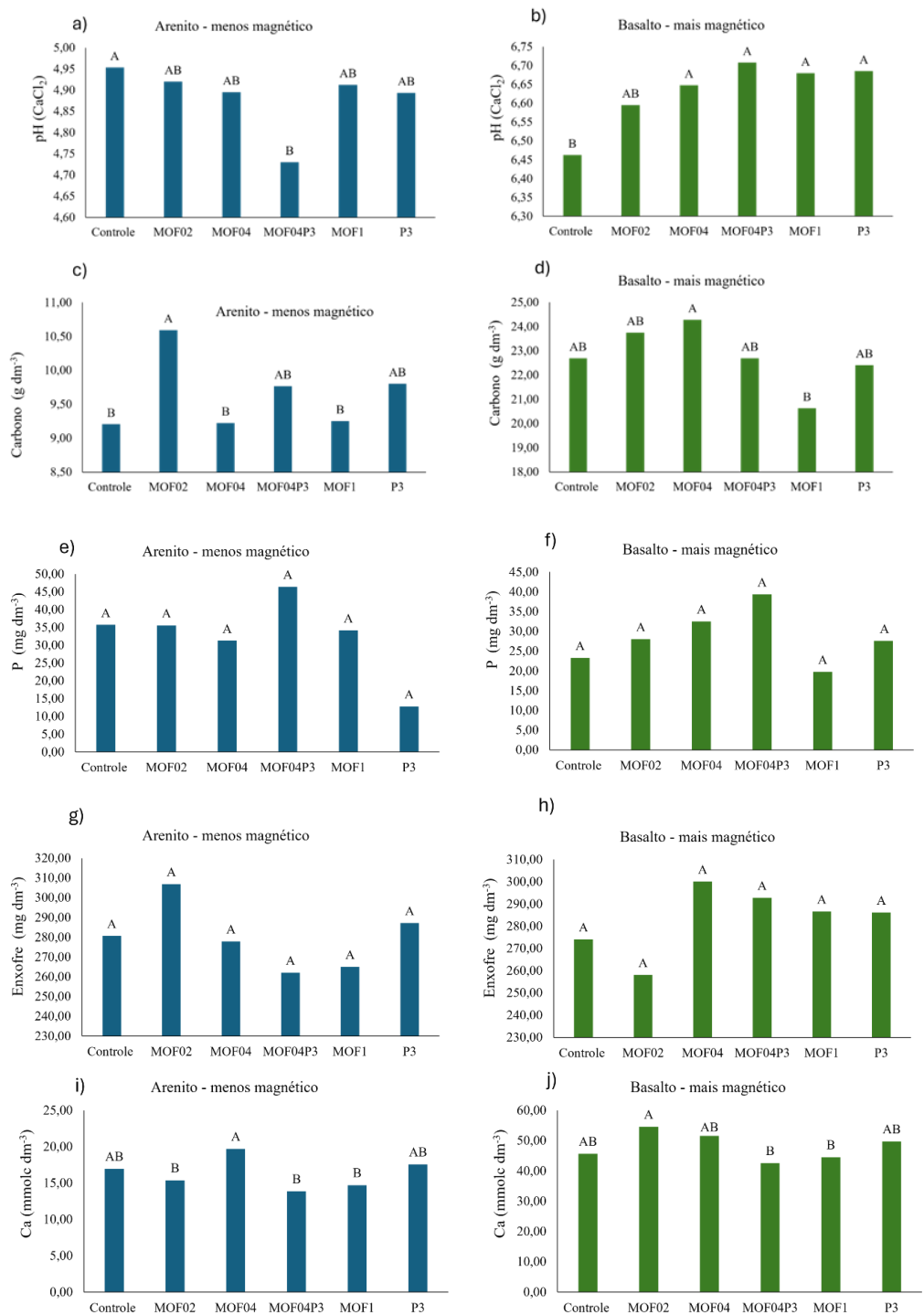


Figura 12. Atributos químicos do solo em função das doses (NSF e pó de rocha) nos solos de basalto e arenito. NSF02 (0,2 t ha⁻¹ de NSF), NSF04 (0,4 t ha⁻¹ de NSF), NSF04PO3 (0,4 t ha⁻¹ de NSF + 3 t ha⁻¹ de pó de rocha), NSF1 (1 t ha⁻¹ de NSF), P3 (t ha⁻¹ de pó de rocha), controle (adubação mineral).

Quanto as bases trocáveis (Ca, Mg e K), o comportamento foi distinto entre os solos (Figuras 12 e Figura 13). No arenito os teores de Mg e K não apresentaram diferenças com a aplicação das nanopartículas (Figura 13), porém o teor de Ca na dose NSF04 foi superior em 22, 30 e 42% em comparação as doses NSF02; NSF04P3; e NSF1, respectivamente. Já no basalto, as doses NSF04P3 e NSF1, apresentaram queda de 28 e 23%, respectivamente no teor do nutriente em comparação a dose NSF02 (Figura 12).

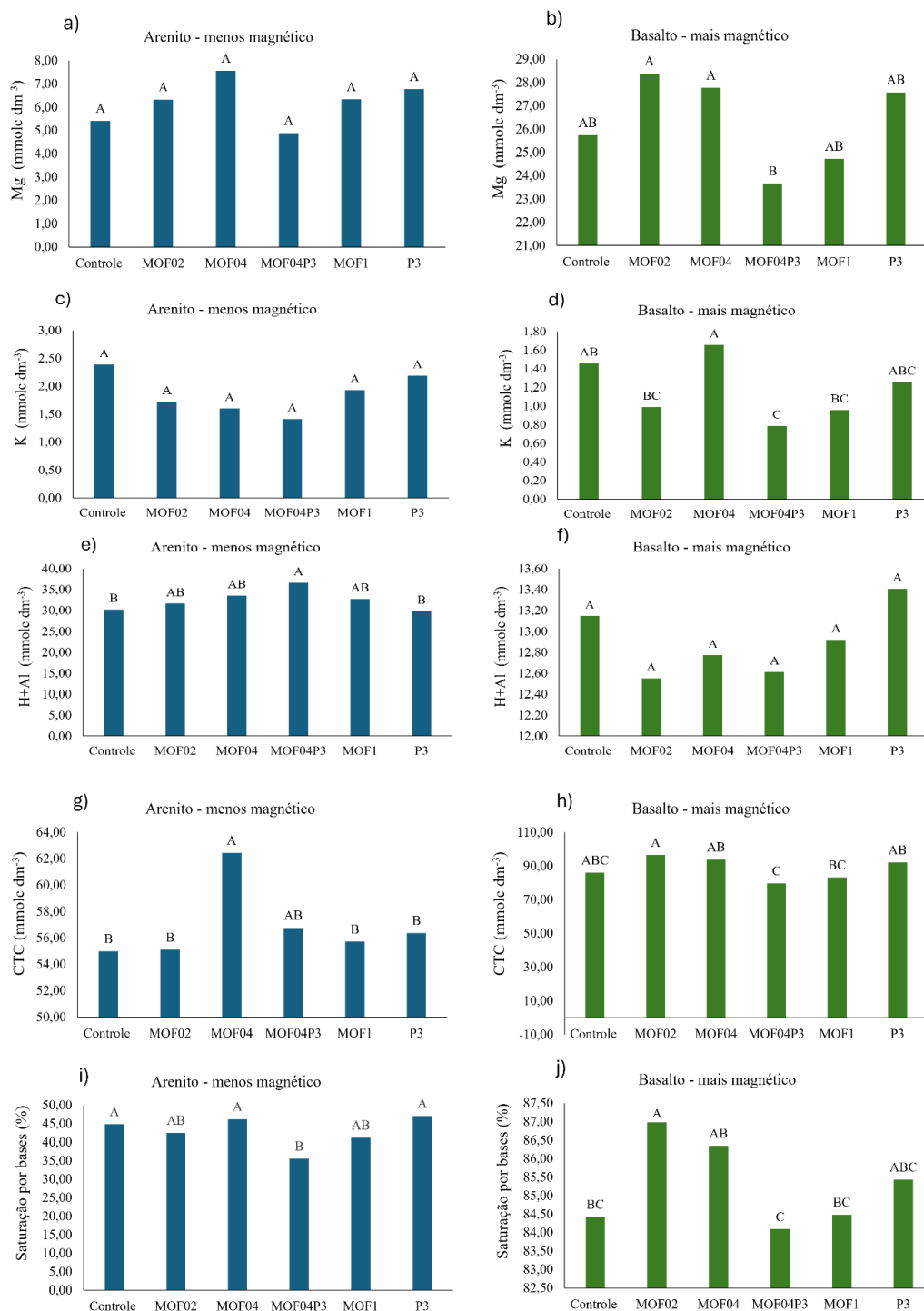


Figura 13. Atributos químicos do solo em função das doses (NSF e pó de rocha) nos solos de basalto e arenito. NSF02 (0,2 t ha⁻¹ de NSF), NSF04 (0,4 t ha⁻¹ de NSF), NSF04P3 (0,4 t ha⁻¹ de NSF + 3 t ha⁻¹ de pó de rocha), NSF1 (1 t ha⁻¹ de NSF), P3 (t ha⁻¹ de pó de rocha), controle (adubação mineral).

A acidez potencial representada por (H+Al) foi maior no tratamento NSF04P3 em comparação aos tratamentos controle e P3 no arenito (Figura 12), provavelmente em função dos menores teores das bases trocáveis (Ca, Mg, K) no tratamento que combinou as nanopartículas naturais e sintéticas. Forján et al (2020) relatam que a alta concentração de cátions ácidos (Al) no complexo trocável está associada ao baixo valor pH do solo e à

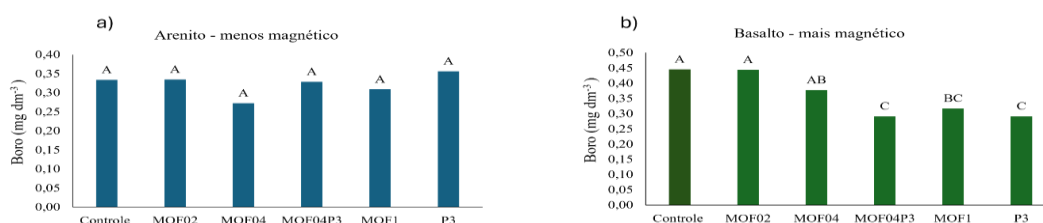
dominância de cátions ácidos. No basalto não ocorreram diferenças entre os tratamentos testados para este atributo, em função da alta fertilidade do solo.

A CTC (capacidade de troca catiônica) do solo teve aumento de 14% com a aplicação de 0,4 t ha⁻¹ de NSF em comparação aos demais tratamentos no arenito. No basalto, ocorreu aumento de 21 e 16%, no tratamento 0,2NSF em comparação aos tratamentos NSF04P3 e NSF1, respectivamente (Figura 13). Esses resultados promovem diversas vantagens para a agricultura e o meio ambiente, como maior retenção de nutrientes, uma melhora na estrutura do solo (Andreoli et al., 2014).

No arenito, o índice de saturação por bases (V%) se manteve estável com a aplicação de NSF, contudo, apresentou leve queda apenas no tratamento combinado entre as nanopartículas (NSF04P3). No basalto, as menores doses de NSF (02 e 04) proporcionaram incremento deste atributo (Figura 13), principalmente pelo efeito da disponibilização das bases trocáveis armazenadas nos coloides do solo, que tiveram efeito direto sobre o pH do solo (Figura 12) tornando-o menos ácido.

A aplicação de nanopartículas sintéticas e naturais resultaram em efeitos diferenciados nos teores de micronutrientes nos solos. No arenito os tratamentos testados não apresentaram diferenças em relação ao controle para boro (B), ferro (Fe) e zinco (Zn). No basalto ocorreu resultado semelhante na avaliação de cobre (Cu), Fe, manganês (Mn) e Zn (Figura 14).

A aplicação de nanopartículas naturais (P3) demonstrou efeito de redução nos teores de micronutrientes nos dois solos, Cu (56%) e Mn (17%) no solo arenítico e B (53%) no solo basáltico, quando comparado a menor dose de NSF (Figura 14). Esse efeito sugere uma forte interação entre as nanopartículas naturais e esses elementos devido a formação de complexos insolúveis entre o pó de rocha e os micronutrientes, diminuindo sua disponibilidade para as plantas. No entanto, a magnitude e a natureza dessas interações ainda necessitam de investigações mais aprofundadas.



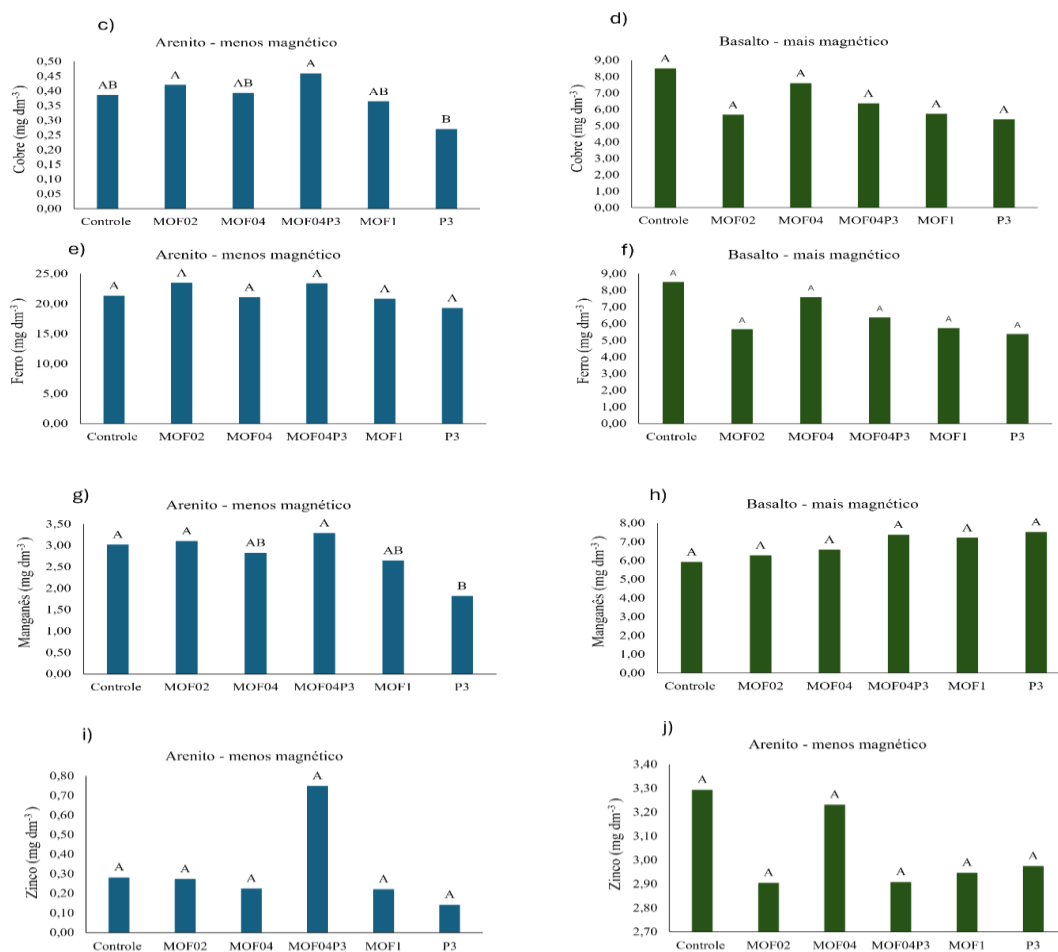


Figura 14. Atributos químicos do solo em função das doses (NSF e pó de rocha) nos solos de basalto e arenito. NSF02 (0,2 t ha⁻¹ de NSF), NSF04 (0,4 t ha⁻¹ de NSF), NSF04PO3 (0,4 t ha⁻¹ de NSF + 3 t ha⁻¹ de pó de rocha), NSF1 (1 t ha⁻¹ de NSF), P3 (t ha⁻¹ de pó de rocha), controle (adubação mineral).

Pode-se observar pelas Figuras 15 e 16 que a adição do NSF e do pó de rocha (PR) em diferentes doses, em 50 dias, diminui a reflectância dos solos. As diminuições acontecem tanto na curva como um todo, tanto para as faixas características dos minerais predominantes dos solos brasileiros: caulinita (Ct); gibbsita (Gb); hematita (Hm) e goethita (Gt), em ambos os solos. Para as faixas da Hm e Gt, nota-se que há um leve aumento na concavidade que indica a presença dos óxidos nos solos. Quando maior a concavidade nessas faixas maior a intensidade destes óxidos nos solos, o que mostra que a adição do NSF e PR pode favorecer o aumento destes óxidos nos solos, com maior intensidade para solos mais magnéticos, originados de basalto.

SOLOS MENOS MAGNÉTICOS

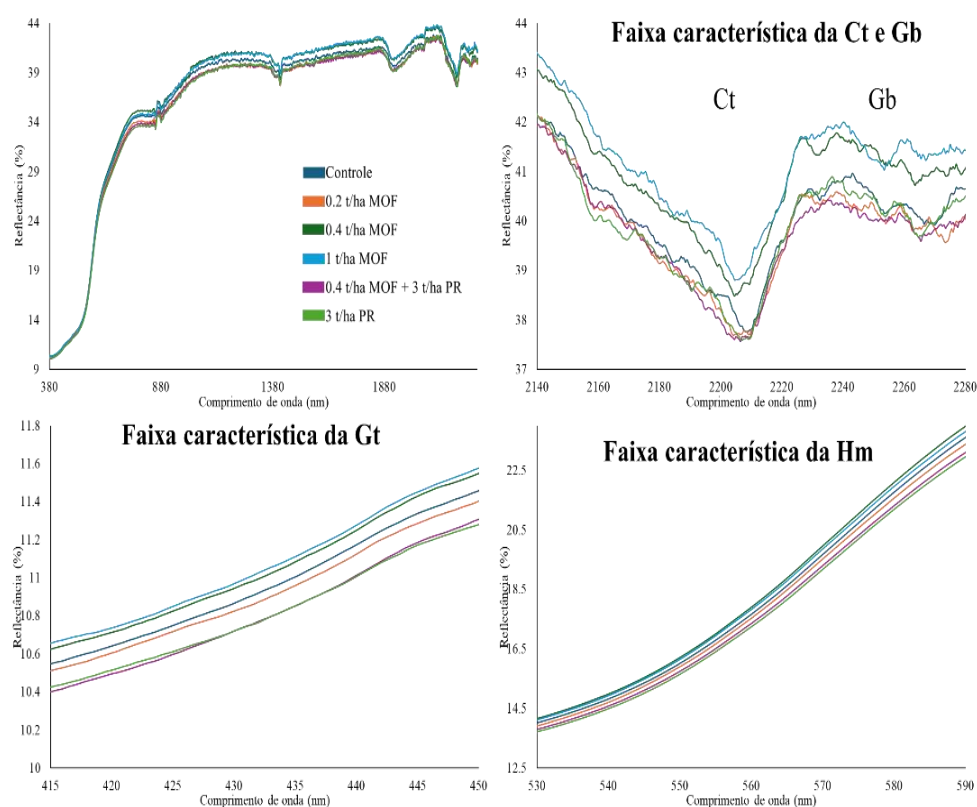


Figura 15. Assinatura espectral para os solos menos magnéticos, originados de arenito, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

SOLOS MAIS MAGNÉTICOS

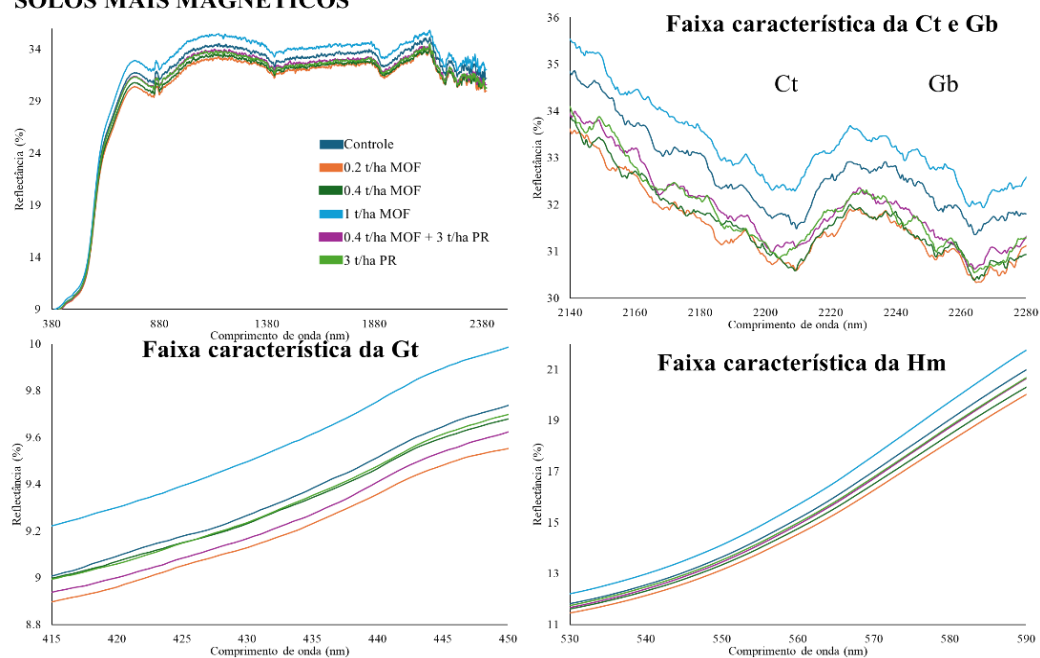


Figura 16. Assinatura espectral para os solos menos magnéticos, originados de basalto, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

Para as faixas característica da Ct e Gb, entre 2100 – 2280 nm, nota-se que para solos menos magnéticos (originados de arenito) a profundidade dos vales aumenta com a

adição de NSF e PR, principalmente para a dose em que são combinados ambos os materiais. Na faixa mais específica da Gb (2265 nm) o vale mais característico é para o tratamento controle, seguido da dose 0,4 t ha⁻¹ de NSF. Para os solos mais magnéticos pode ser observado o mesmo comportamento.

Pela análise de difração de raio x da fração de argila desferrificada, que permite a caracterização da Ct e Gb (Figura 17), pode-se observar que a adição de NSF e PR modifica o padrão de picos que é observado no tratamento controle. Há aumento da base, e redução da intensidade do pico para a Ct e para a Gb para todos os tratamentos, em solos menos magnéticos. A exceção foi para o tratamento de 0,4 t ha⁻¹ de NSF em que o pico de Gb se assemelha ao pico do tratamento controle. Para o tratamento de 0,2 t ha⁻¹ de NSF antes do pico característico da Gb próximo de 18,5 °2θ, apareceu um outro pico ainda não identificado ou caracterizado.

SOLOS MENOS MAGNÉTICOS

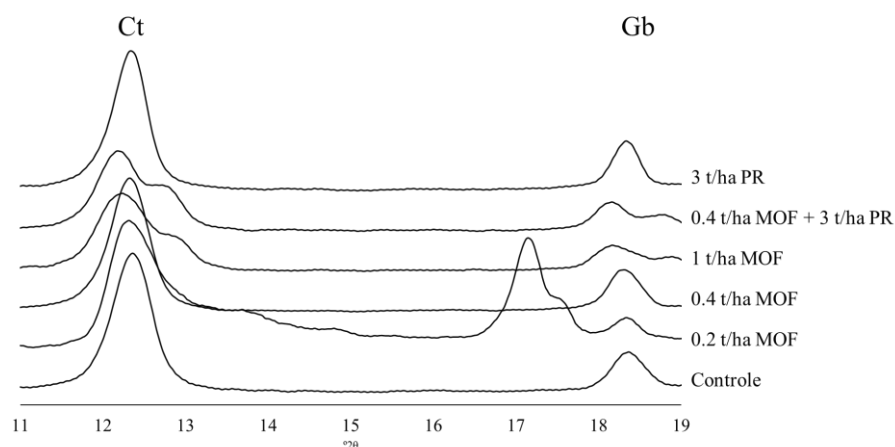


Figura 17. Difração de raios x da fração argila desferrificada para identificação de caulinita (Ct) e gibssita (Gb), para os solos menos, magnéticos, originados de arenito, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

Para os solos mais magnéticos (Figura 18) observa-se comportamento semelhante para os picos da Ct. Conforme são adicionadas as doses de NSF ou PR os picos tornam-se menos intensos e mais largos. Enquanto o pico da Gb diminui a intensidade para a dose de 0,2 t ha⁻¹ de NSF e fica semelhante ao pico do tratamento controle para a dose de 3 t ha⁻¹ de PR. Para os demais tratamentos os picos ficaram mais largos e tiveram menor intensidade. Picos mais largos na base e de menor intensidade indicam a presença de minerais mais amorfos, menos cristalinos. Enquanto picos mais altos e finos indicam minerais mais cristalinos (Resende et al., 2017).

SOLOS MAIS MAGNÉTICOS

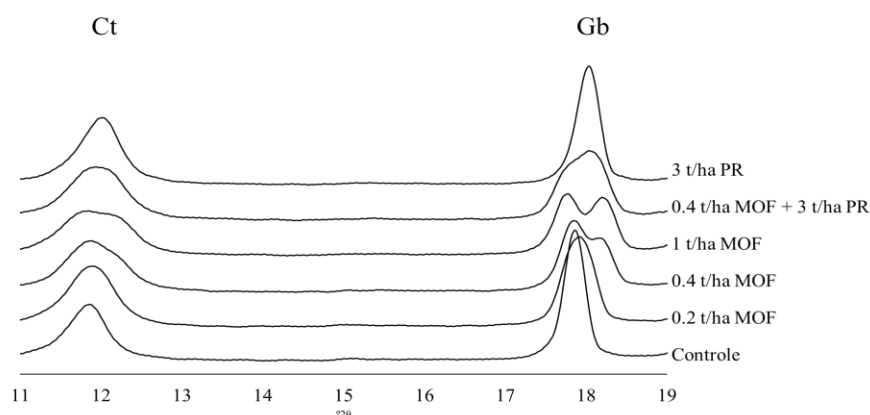


Figura 18. Difração de raios x da fração argila desferrificada para identificação de caulinita (Ct) e gibssita (Gb), para os solos mais magnéticos, originados de basalto, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

Os dados cristalinos para os minerais Ct e Gb também foram realizados, área do pico, largura a meia altura (LMA) e diâmetro médio do cristal (DMC) também foram realizados. Contudo não foi possível observar diferenças significativas entre os dados. Podemos indicar que a adição do NSF e do PR tem potencial para alterar a cristalinidade e quantidade dos minerais, Ct e Gb, todavia em 50 os resultados não são significativos estatisticamente. Porém os resultados de difração corroboram com os resultados espectrais, os tratamentos modificam a quantidade e cristalinidade da Ct e Gb.

Para a fração de argila tratada para concentração de óxidos e quantificação de Hm e Gt (Figura 19) é possível observar que os picos referentes ao reflexo da Gt 110 tendem a diminuir, em solos menos magnéticos. Deixando esta face do mineral menor e menos cristalina. A Gt 111 não apresenta mudanças visíveis. Para a Hm 012 e 110 os picos também diminuem a intensidade. Para os solos mais magnéticos (Figura 20) os picos da Hm 012 e 110 aumentam significativamente com as doses de PR e NSF. Enquanto da Gt 110 e 111 diminuem de intensidade.

SOLOS MENOS MAGNÉTICOS

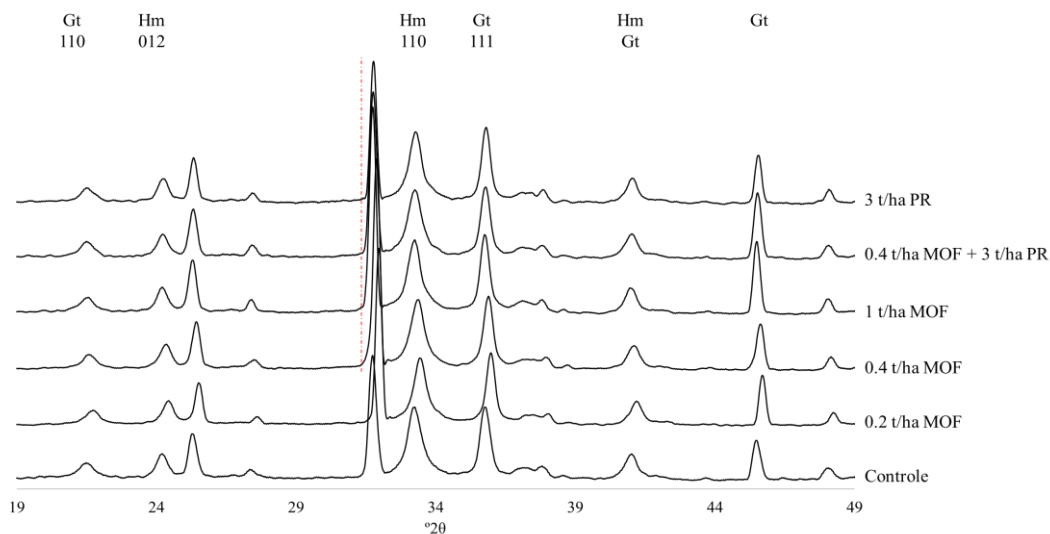


Figura 19. Difração de raios x da fração argila com concentração de óxidos para identificação de hematita (Hm) e goethita (Gt) para os solos menos magnéticos, originados de arenito, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

SOLOS MAIS MAGNÉTICOS

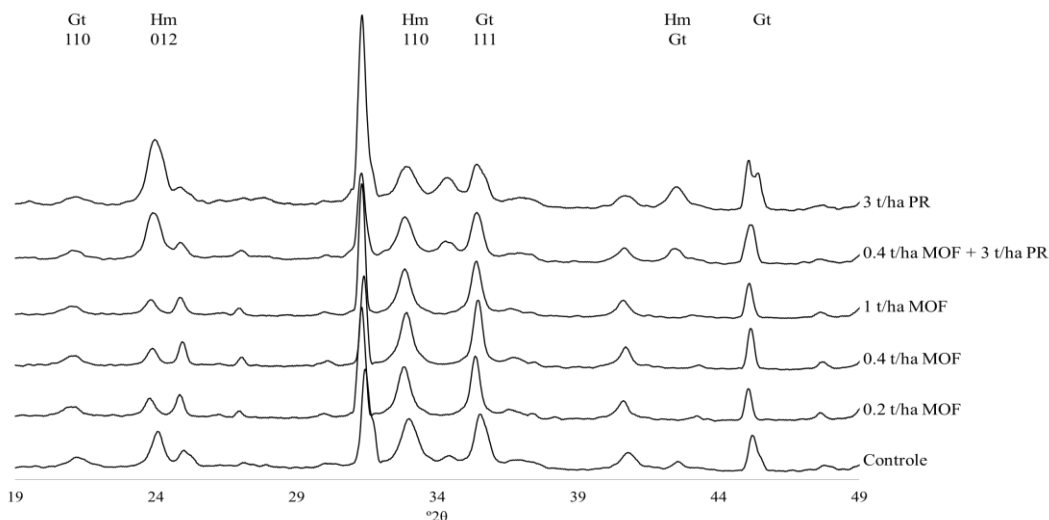


Figura 20. Difração de raios x da fração argila com concentração de óxidos para identificação de hematita (Hm) e goethita (Gt) para os solos mais magnéticos, originados de basalto, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

Outro pico da Gt, próxima de 45° 2θ , aumenta de intensidade e área do pico em ambos os solos, para os diferentes tratamentos. Os reflexos desta face da Gt não são considerados para quantificação de seu teor e cristalinidade do solo. Seus reflexos de maior intensidade são próximo de 21° 2θ (100% de intensidade) e 37° 2θ (68% de intensidade), o reflexo próximo de 45° 2θ não tem porcentagem de intensidade

significativa na literatura básica (Navarro et al., 2017). Outras fontes estão sendo buscadas para melhor entendimento dos resultados.

Os dados cristalográficos das faces da Hm e Gt, LMA e DMC, foram realizados os que apresentaram diferenças significativas estão na Figura 21. Apenas o DMC da Hm 012 e Gt 110 apresentaram diferenças significativas para os solos mais magnéticos, originados de basalto. Devido a mineralogia das rochas de basalto, os solos originários possuirão maiores conteúdos de óxidos de ferro, como é possível observar pelos resultados e pela literatura (Camargo et al., 2008; Cunha et al., 2005; Ghidin et al., 2006). Para os solos menos magnéticos observa-se que o DMC da Gt 110 aumenta para a dose de 0,4 t ha⁻¹ de NSF, porém sem diferença significativa. Já para o solo mais magnético o DMC da Gt 110 aumenta significativamente para as doses de NSF de 0,2 e 0,4 t ha⁻¹, sendo o maior aumento observado para a dose de 0,4 t ha⁻¹ de NSF e 3 t ha⁻¹ de PR.

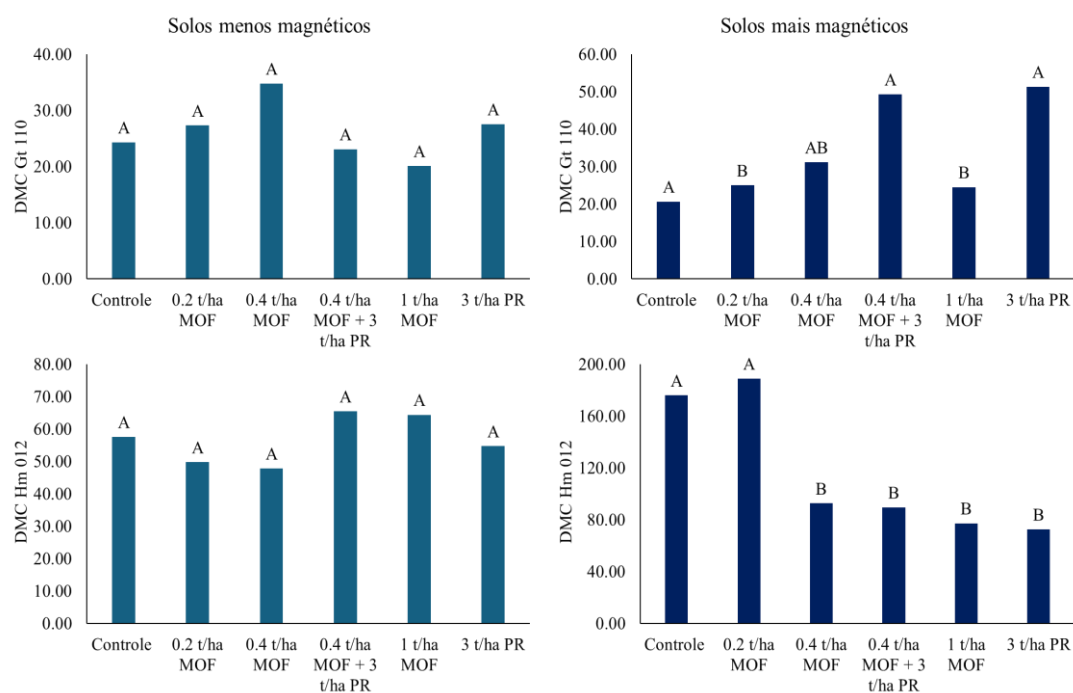


Figura 21. Atributos cristalográficos da fração argila com concentração de óxidos para os solos menos magnéticos, originados de arenito, e solos mais magnéticos, originados de basalto após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

Os valores médios de DMC estão de acordo com a literatura para Latossolos brasileiros (Schwertmann; Kampf, 1985). A maior cristalinidade da Hm em relação a Gt, também concorda com a literatura (Fontes; Weed, 1991). Quanto menor a cristalinidade do mineral menor seu DMC (Camargo et al., 2008; Silva et al., 2020). A substituição isomórfica do Fe pelo Al, ambientes de alta acidez, maior concentração de Si, são alguns

fatores que podem favorecer sua menor cristalinidade dos óxidos, e redução do seu DMC (Curi e Franzmeier, 1984; Schwertmann e Kampf, 1985; Schwertmann e Taylor, 1989).

O DMC da Hm 012 não apresenta diferença significativas para os solos menos magnéticos. Há aumento para a dose de 0,4 t ha⁻¹ de NSF somado a 3 t ha⁻¹ de PR, porém sem diferença estatística (Figura 21). Já para o solo mais magnético, observa-se que as doses de 0,4 t ha⁻¹ de NSF; 0,4 t ha⁻¹ de NSF somado a 3 t ha⁻¹ de PR; 1 t ha⁻¹ de NSF; e 3 t ha⁻¹ de PR o DMC da hm diminui significativamente. Indicando que a cristalinidade do mineral também. O que provavelmente pode estar acontecendo é a formação de novos cristais de Hm ainda de forma menos cristalina.

Esta última hipótese é confrontada ao observarmos o conteúdo de Hm para os solos mais magnéticos na Figura 22. é possível observar que para a dose de 0,2 t ha⁻¹ de NSF; 0,4 t ha⁻¹ de NSF somada a 3 t ha⁻¹ de PR e 3 t ha⁻¹ de PR aumentaram significativamente os conteúdos médios de Hm. Para as demais doses o comportamento não foi semelhante. Devemos lembrar que em 50 dias o NSF ainda não está totalmente dissolvido, como mostram alguns trabalhos da literatura seu pico de dissolução é próximo dos 90 a 100 dias. O que foi observado no primeiro experimento de cana-de-açúcar em que os resultados mais significativos foi na última coleta após 90 dias de experimento.

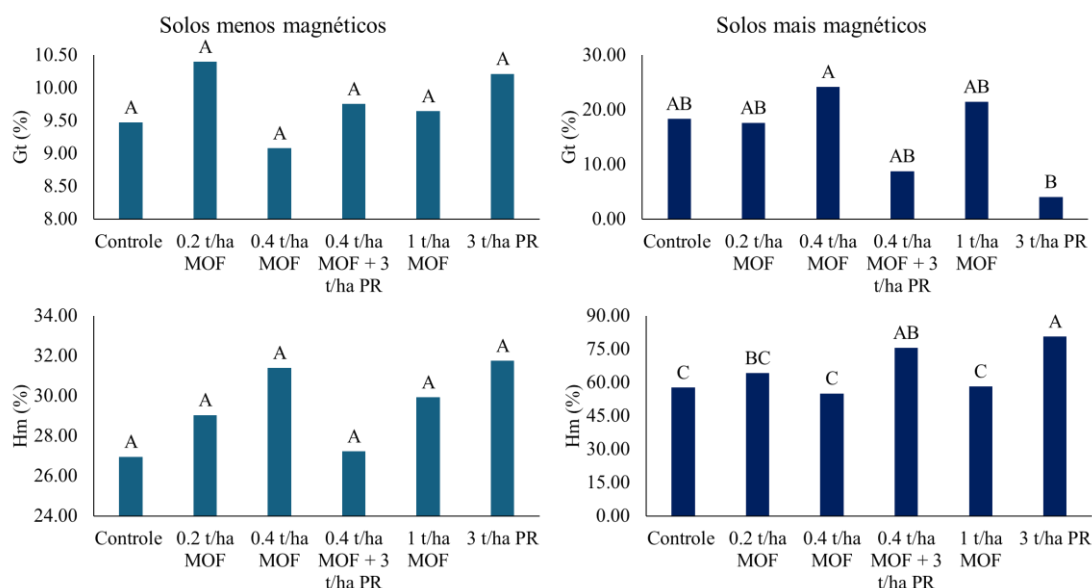


Figura 22. Teores de hematita (Hm) e goethita (Gt) da fração argila com concentração de óxidos para os solos menos magnéticos, originados de arenito, e solos mais magnéticos, originados de basalto, após o tratamento com diferentes doses de NSF e PR (Pó de rocha).

Os conteúdos de Gt diminuíram para as doses em que havia presença do PR, e aumentaram para os tratamentos que utilizaram apenas NSF (Figura 22). A Gt é um óxido

de ferro que possui alta capacidade para adsorção de P, quanto menor sua cristalinidade e maiores seus conteúdos maiores, maior é seu poder para adsorver o íon. A dose de 0,4 t ha⁻¹ de NSF aumentou o conteúdo da Gt e sua cristalinidade, como pode ser observado pelo maior DMC. Para os solos menos magnéticos, houve aumento do teor de Hm para a dose de 0,4 t ha⁻¹ de NSF, e diminuição da Gt, porém sem diferenças estatísticas significantes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição da partícula sintética altera as propriedades magnéticas, espectrais, mineralógica e os teores de K, Ca e Mg do solo.

O uso de nanopartículas sintéticos e de pó de rocha na agricultura é novo e inovador e com potencial para melhorar as funções ecossistêmicas do solo. Ainda são necessários novos experimentos para inferir todas as mudanças nas propriedades dos solos que esta pode trazer.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackerson, J.P. et al. 2015. Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground VisNIR library with external parameter orthogonalization. *Geoderma* 259–260: 196–204.
- Anderson M.J., Whitcomb P.J. 2015 DOE simplified, practical tools for effective experimentation, Third Edition. 3 edn, Productivity Press .
- Anstoetz, M. et al. 2015. Novel applications for oxalate-phosphate-amine metal-organic-frameworks (OPA-NSFs): Can an iron-based OPA-NSF be used as slow-release fertilizer? *PLoS One* 10, 1–16.
- Anstoetz, M. et al. 2016. Characterization of an oxalate-phosphate-amine metal-organic framework (OPA-NSF) exhibiting properties suited for innovative applications in agriculture. *J. Mater. Sci.* 51, 9239–9252.
- Aquino, R.E. et al. 2016. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. *Geoderma* 262, 35–44.
- Bahia, A.S.R.S. et al. 2015a. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo , Brazil. *Geoderma Reg.* 5, 150–156.
- Bahia, A.S.R.S. et al. 2015b. Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO₂ emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. *Sci. Agric.* 72, 157–166.
- Bahia, A.S.R.S., et al. 2017. Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81, 1450–1462.
- Camargo, L.A. et al 2008a. Variabilidade Espacial De Atributos Mineralógicos De Um Latossolo Sob Diferentes Formas Do Relevo. I - Mineralogia Da Fração Argila. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 32, 2269–2277.
- Camargo, L.A. et al. 2008b. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 32, 2279–2288.
- Camargo, L.A. et al. 2015. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 251–252, 124–132.
- Campos, M.C.C. et al. 2009. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 13, 297–304.
- Carmo, D.A.B. et al. 2016. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 51, 1261–1271.
- Clark, R.N., 1999. Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. Manual of Remote Sensing, in: Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing. pp. 3–58.
- Costa, ACS. et al. 1999. Quantification and Characterization of Maghemite in Soils Derived from Volcanic Rocks in Southern Brazil. *Clays Clay Miner.* 47, 466–473.
- Dearing, J.A. Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994. 104p
- Dearing, J.A. et al. 1996. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophys. J. Int.* 127, 728–734.
- Demattê, J.A.M. et al. 2019. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma* 354, 113793.
- Demattê, J.A.M. et al. 2017. Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. *J. Environmental Manag.* 197, 50–62.
- Embrapa, 2017. Manual de métodos de análises, in: Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília, DF, p. 574.
- FAPESP. 2021. Biblioteca Virtual da FAPESP. Disponível em: < <https://bv.fapesp.br/pt/>>.
- Fernandes, K., Marques Jr, J., Santos, A., Souza, R. De, Demattê, J.A.M., Ribon, A.A., 2020. Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. *Catena* 195, 104795. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104795>

Ferraz, C.P., Costa, N.J.S., Teixeira-Neto, E., Teixeira-Neto, Â.A., Liria, C.W., Thuriot-Roukos, J., Machini, M.T., Froidevaux, R., Dumeignil, F., Rossi, L.M., Wojcieszak, R., 2020. 5-hydroxymethylfurfural and furfural base-free oxidation over AuPd embedded bimetallic nanoparticles. *Catalysts* 10. <https://doi.org/10.3390/catal10010075>

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1981). Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000. São Paulo: IPT.

La Scala Jr, N., Marques Jr, J., Pereira, G.T., Cora, J.E., 2000. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1459–1462.

Lepsch IF (2011) 19 Lições de Pedologia. São Paulo. Oficina de Textos. 456p.

Marques Júnior, J., Siqueira, D.S., Camargo, L.A., Teixeira, D.D.B., Barrón, V., Torrent, J., 2014. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian haplustalf. *Geoderma* 219–220, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.007>

Minasny, B., McBratney, A.B., Hartemink, A.E., 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma* 155, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024>

ONU. 2021. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/>>.

Peluco, R.G., Marques Júnior, J., Siqueira, D.S., Silva, L.S., Gomes, R.P., 2020. Soil magnetic signature for identification of areas with different sorption potentials of imazaquin. *Crop Prot.* 137. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105295>

Penteado, M.M., Ranzani, G. Aspectos geomorfológicos e os solos do município de Jaboticabal. *Geographica*, v.25, p.42-61,1971.

Peters, C., Dekkers, M.J., 2003. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Phys. Chem. Earth* 28, 659–667. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00120-7)

Raij, B.V.; Abndrade, J.C.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p. 2001

Ramos, P.V., Inda, A.V., Barrón, V., Siqueira, D.S., Marques Júnior, J., Teixeira, D.D.B., 2020. Color in subtropical Brazilian soils as determined with a Munsell chart and by diffuse reflectance spectroscopy. *Catena* 193, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104609>

Resende, J.M. do A.R., Marques Júnior, J., Martins Filho, M.V., Dantas, J.S., Siqueira, D.S., Teixeira, D.D.B., 2014. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SOLOS COESOS DO LESTE MARANHENSE. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 1077–1090.

Resende, M. et al. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: International Soil Classification Workshop, 8., 1998, Rio de Janeiro, RJ. Proceedings... Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988. p.78-108

Resende, M., Santana, D.P., Franzmeier, D.P., Coey, J.M.D., 1986b. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: Proceedings of the International Soil Classification Workshop. EM- BRAPA, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 78–108.

Sanchez, R.B., Marques Júnior, J., Pereira, G.T., Souza, Z.M. de, 2005. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 9, 489–495. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662005000400008>

Santos, H.L., Júnior, J.M., Matias, S.S.R., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., 2011. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. *Rev. Bras. Ciências Agrar.* 6, 710–716. <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i4a1347>

Santos, L.F. dos, Sodré, F.F., Martins, E. de S., Figueiredo, C.C. de, Busato, J.G., 2021. Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical charges in a Brazilian Savanna Ferralsol. *Pesqui. Agropecu. Trop.* 51, e66691. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v51e66691.2>

SCOPUS. 2021. Welcome to Scopus Preview. Disponível em: < <https://www.scopus.com/home.uri>>.

Silva, F.M. da, Souza, Z.M. de, Figueiredo, C.A.P. de, Marques Júnior, J., Machado, R.V., 2007. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. *Ciência Rural* 37, 401–407. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782007000200016>

- Silva, L.S., Marques Júnior, J., Barrón, V., Gomes, R.P., Teixeira, D.D.B., Siqueira, D.S., Vasconcelos, V., 2020. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. *Catena* 185, 104258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104258>
- Silvero, N.E.Q., Siqueira, D.S., Coelho, R.M., Da Costa Ferreira, D., Marques, J., 2019. Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of São Paulo Central West, Brazil. *Sci. Total Environ.* 693, 133–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.269>
- Siqueira, D.S., Marques, J., Matias, S.S.R., Barrón, V., Torrent, J., Baffa, O., Oliveira, L.C., 2010. Correlation of properties of Brazilian Haplustals with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use Manag.* 26, 425–431. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x>
- Souza, Z.M. de, Marques Júnior, J., Pereira, G.T., 2004. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 39, 491–499. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2004000500012>
- Souza, Z.M. De, Marques, J., Tadeu, G., 2004. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 39, 491–499.
- Souza, Zigomar M, Júnior, J.M., Pereira, G.T., Bento, M.J.C., 2004. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. *Eng. Agrícola* 8, 51–58.
- Souza, Zigomar Menezes, Marques Júnior, J., Pererira, G.T., Moreira, L.F., 2004. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Irriga* 9, 1–11.
- Souza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Gómez-Padilla, E., Masunaga, S.H., Effenberger, F.B., Rossi, L.M., López-Sánchez, R., Jardim, R.F., 2021. Fe₃O₄ nanoparticles and Rhizobium inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean plants grown in soil. *Rhizosphere* 17, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100275>
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science, in: *Soil Science*. pp. 163–215. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Terra, F.S., Demattê, J.A.M., Viscarra Rossel, R.A., 2018. Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. *Geoderma* 318, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053>
- Torrent, J., Liu, Q.S., Barrón, V., 2010. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 161–173. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01216.x>
- Vasques, G.M., Demattê, J.A.M.A.M., Rossel, R.A.V., Ramírez-Lopes, L., Terra, S., Viscarra Rossel, R.A., Ramírez-López, L., Terra, F.S., 2014. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. *Geoderma* 223–225, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019>
- Viscarra Rossel, R.A., Bui, E.N., 2016. A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. *Sci. Total Environ.* 542, 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.119>
- Viscarra Rossel, R.A., Bui, E.N., De Caritat, P., McKenzie, N.J., 2010. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible-near-infrared reflectance spectra. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 115, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2009JF001645>
- Wu, K., Du, C., Ma, F., Shen, Y., Liang, D., Zhou, J., 2019. Degradation of metal-organic framework materials as controlled-release fertilizers in crop fields. *Polymers (Basel)*. 11. <https://doi.org/10.3390/polym11060947>
- Zarbin, A.J.G., 2007. QUÍMICA DE (NANO)MATERIAIS Aldo J. G. Zarbin. *Quim. Nova* 30, 1469–1479.
- Swoboda P, Döring TF, Hamer M (2022) Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of The Total Environment*. 807: 150976.

ANEXOS

Orientações



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



ATESTADO



Atestamos que a Profa. Dra. KATHLEEN FERNANDES BRAZ, RG nº 64.838.140-7, expedido pela SSP/SP, coorientou os discentes abaixo relacionados, em Programa stricto sensu desta Unidade Universitária:

Programa: Agronomia (Ciência do Solo)

DISCENTE	CURSO	INÍCIO	FIM	SITUAÇÃO
LILIAN MARESA BUENO NOGUEIRA	MESTRADO ACADÊMICO	13/09/21	13/12/21	CANCELADO

Programa: Agronomia (Produção Vegetal)

DISCENTE	CURSO	INÍCIO	FIM	SITUAÇÃO
LUANA BIANCA OLIVEIRA DA SILVA	MESTRADO ACADÊMICO	14/09/21	11/12/23	CONCLUÍDO

Programa: Agronomia (Produção Vegetal)

DISCENTE	CURSO	INÍCIO	FIM	SITUAÇÃO
GABRIELA MOURÃO DE ALMEIDA	DOUTORADO	14/09/21	28/04/23	CONCLUÍDO
JOÃO DE DEUS FERREIRA E SILVA	DOUTORADO	14/09/21	13/03/24	CONCLUÍDO

Jaboticabal, 03 de junho de 2024.


Márcia Luciana Natividade dos Santos
Supervisor de Seção Técnica de
Pós-Graduação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



ATESTADO



Atestamos que a Profa. Dra. KATHLEEN FERNANDES BRAZ, RG nº 64.838.140-7, expedido pela SSP/SP, coorienta os discentes abaixo relacionados, em Programa stricto sensu desta Unidade Universitária:

Programa: Agronomia (Ciência do Solo)

DISCENTE	CURSO	INÍCIO	SITUAÇÃO
ISADORA RIBEIRO URUGA	MESTRADO ACADÊMICO	16/10/23	EM ANDAMENTO
JOSUÉ JOSÉ DE OLIVEIRA JUNIOR	MESTRADO ACADÊMICO	29/05/23	EM ANDAMENTO

Jaboticabal, 03 de junho de 2024.


Márcia Luciana Natarelli dos Santos
Supervisor de Seção Técnica de
Pós-Graduação

Disciplinas Ministradas



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Jaboticabal



DECLARAÇÃO

DECLARO, para os devidos fins, que a pós-doutoranda. Kathleen Fernandes Braz, RG nº 64.838.140-7, atuou em atividades de formação docente, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP - Câmpus de Jaboticabal, nas turmas das disciplinas abaixo relacionadas:

SEM	CÓDIGO	DISCIPLINA	C.H. DISCIPLINA	C.H. EFETIVA	Nº DE ALUNOS
Ano letivo: 2024					
1	S0001bioT	GEOLOGIA	60.0	15.0	37

* Disciplina Em Curso

** Disciplina ministrada em regime especial de recuperação (RER)



Documento assinado digitalmente
LUCIANA CARLA AGOSTINHO SARTOR
Data: 02/07/2024 13:47:23 -0300
Verifique em <https://validar.id.gov.br>

Jaboticabal, 02 de Julho de 2024

Luciana Carla Agostinho Sartor
Diretor Técnico de Divisão/Divisão Técnica Acadêmica

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Câmpus de Jaboticabal
Via Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, CEP: 14884900, Jaboticabal - São Paulo
Página de Internet: <http://www.fcav.unesp.br/>. CNPJ: 48.031.918/0012-87.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



ATESTADO

ATESTAMOS que a Profa. Dra. Kathleen Fernandes Braz, RG 64.838.140-7 - SSP, ministrou/ministra aulas aos discentes do Programa de Pós-graduação desta Unidade Universitária, conforme abaixo descrito:

Programa: Agronomia (Ciência do Solo)

Disciplina	Ano	Dt.Início	Dt.Término	Curso	Discentes	Hr/Aula
Tópicos Especiais: Relação Solo-Paisagem	2023	27/11/2023	08/12/2023	MD	3	22

Jaboticabal, 15 de fevereiro de 2024


Márcia Luciana Natividade dos Santos
Supervisor de Seção Técnica de
Pós-Graduação

DECLARAÇÃO

DECLARO, para os devidos fins, que a pós-doutoranda, Kathleen Fernandes Braz, RG nº 64.838.140-7, atuou em atividades de formação docente, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP - Câmpus de Jaboticabal, nas turmas das disciplinas abaixo relacionadas:

SEM	CÓDIGO	DISCIPLINA	C.H. DISCIPLINA	C.H. EFETIVA	Nº DE ALUNOS
Ano letivo: 2023					
2	S1-001agroP1	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	20.0	37
2	S1-001agroP2	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	20.0	36
1	122TP	GEOLOGIA	60.0	20.0	43
Ano letivo: 2022					
2	S0001agroP1	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	15.0	40
2	S0001agroP2	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	15.0	35
2	S0001agroP3	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	15.0	37
1	122TP	GEOLOGIA	60.0	20.0	34
Ano letivo: 2021					
2	S0001agroP1	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	20.0	43
2	S0001agroP2	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	20.0	35
2	S0001agroP3	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	20.0	50
2	S0001agroT	GEOLOGIA, MINERALOGIA E GÊNESE DO SOLO	60.0	20.0	128
1	122TP	GEOLOGIA	60.0	20.0	34

* Disciplina em Curso

** Disciplina ministrada em regime especial de recuperação (REB)

Jaboticabal, 18 de Fevereiro de 2024



Documento assinado digitalmente
 LUCIANA CARLA AGOSTINHO SARTOR
 Data: 18/02/2024 14:09:48-0300
 Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Luciana Carla Agostinho Sartor
 Diretor Técnico de Divisão/Divisão Técnica Acadêmica