Universidade de São Paulo

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Sugestão de amostragem para análise de atributos físicos do solo orientada pelo mapeamento com espectrometria difusa

Natália Gonçalves Canal

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheira Agrônoma.

PIRACICABA

2021

Natália Gonçalves Canal

Sugestão de amostragem para análise de atributos físicos do solo orientada pelo mapeamento com espectrometria difusa

Orientador:

Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheira Agrônoma.

Piracicaba

2021

Às transformações e à

coragem de provocá-las.

AGRADECIMENTOS

Em 2014, se alguém me perguntasse onde eu estaria em 9 anos, nem nos cenários mais improváveis eu diria que estaria aqui.

Aos meus pais, por todo o apoio e, principalmente, pela presença.

Ao meu irmão, por ser a minha pessoa.

Ao professor José Paulo Molin, pela oportunidade e pela liberdade que me deu, e por estar sempre disponível e aberto.

À Universidade de São Paulo, mais uma vez. E à ESALQ, pela dose de adrenalina e de motivação no final dessa longa caminhada. Mas, principalmente, por uma grande loucura fazer tanto sentido e me fazer entender que nós estamos exatamente onde deveríamos em cada momento. E nesse momento!

MUITO OBRIGADA!

"(...) nothing safe is worth the drive."

SUMÁRIO

RESUMO.....7

ABSTRACT 8

Lista de figuras 9

Lista de tabelas 10

1. INTRODUÇÃO.....11

2. REVISÃO DE LITERATURA.....12

2.1. Física do solo 12

2.2. Agricultura de Precisão 14

3. OBJETIVOS.....17

4. MATERIAL E MÉTODOS 17

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 22

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....36

REFERÊNCIAS.....37

RESUMO

Sugestão de amostragem para análise de atributos físicos do solo orientada pelo mapeamento com espectrometria difusa

A avaliação dos atributos do solo é de suma importância para a tomada de decisão no manejo agrícola. Entretanto, discute-se a densidade amostral praticada de forma que represente a realidade da lavoura. Além de morosa, a amostragem e a análise de solo possuem custo elevado, se configurando como um entrave para essa etapa da produção. O objetivo do presente trabalho foi coletar espectros de uma lavoura com espectrômetro de infravermelho próximo (NIR), avaliar a criação de modelos de predição para textura (argila, areia e silte), matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (OC) e propor uma amostragem indeformada para atributos físicos guiada pelo mapeamento com alta densidade espacial. Foram coletados 305 espectros de campo com um espectrômetro NIR e 72 amostras de solo para determinação de atributos físico-químicos em laboratório. Com esses dados foram calibrados modelos preditivos utilizando o modelo estatístico de regressão LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) para os atributos estudados. Posteriormente foi realizada modelagem geoestatística e confecção de mapas desses atributos. Por fim, por meio das informações em alta resolução espacial obtidas com o espectro, sugeriu-se pontos para coleta de amostras de solo indeformadas. Textura, MO e OC apresentaram boa resposta espectral no NIR e os modelos foram satisfatórios para predição desses atributos. Futuros trabalhos podem avaliar se os pontos de coleta sugeridos para amostragem indeformada diferem na estrutura física do solo.

Palavras-chave: agricultura de precisão, atributos do solo, espectrometria de solo, física do solo

ABSTRACT

Sampling suggestion for soil physical attributes analysis guided by diffuse spectrometer mapping

The evaluation of soil attributes is of great importance for decision-making in agriculture. However, a sample density that represents the reality of soil attributes variation is discussed. In addition of being time-consuming, soil sampling and analysis have a high cost, being an obstacle to this step of production. The objective of this study was to acquire online near infrared (NIR) spectra of an area, calibrate prediction models for texture (clay, sand and silt), organic matter (MO) and organic carbon (OC) and propose an undeformed sampling grid for physical attributes guided by soil mapping with high spatial density provided by the sensor. A total of 305 field spectra with an NIR spectrometer and 72 soil samples were collected to determine physical-chemical attributes in the laboratory. These data were used to fit predictive models using the statistical regression model LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) for the attributes studied. Then, geostatistical modeling and map generation of these attributes was performed. Through the information in high spatial resolution obtained with the spectrum, points for the collection of undeformed soil samples were suggested. Texture, OM and OC presented reasonable spectral response in NIR and the models were satisfactory for prediction of these attributes. Future studies can evaluate whether the collection points suggested for undeformed sampling differ in soil physical structure.

Keywords: precision agriculture, soil attributes, soil spectroscopy, soil physics

Lista de figuras

Figura 1. Fluxograma com as etapas do trabalho. 18
Figura 2. Localização da área em estudo, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.....19
Figura 3. Frequência de distribuição dos valores preditos e dos valores da análise de laboratório para argila, areia, silte, MO e OC (g kg^{-1}). 24
Figura 4. Correlação de Pearson dos atributos da área de estudo obtidos pelas análises de laboratório. 26
Figura 5. Semivariogramas referentes aos valores de laboratório para os atributos argila (a), areia (b), MO (c) e OC (d). 27
Figura 6. Semivariogramas referentes aos valores preditos pelo modelo para os atributos argila (a), areia (b), MO (c) e OC (d).....27
Figura 7. Mapa das frações do solo da área estudada gerados com os valores preditos pelo modelo: argila (em g kg^{-1}, à esquerda) e areia (em g kg^{-1}, à direita). 28
Figura 8. Mapa de distribuição espacial de matéria orgânica (MO, em g kg^{-1}). À esquerda, com dados das análises de solo realizadas em laboratório, e à direita, com dados preditos pelo modelo. 29
Figura 9. Mapa de distribuição espacial de carbono orgânico (OC, em g kg^{-1}). À esquerda, com dados das análises de solo realizadas em laboratório, e à direita, com dados preditos pelo modelo. 30
Figura 10. CEa (mS m^{-1}) do solo, com dados coletados em 2019 (à esquerda) e mapa de altimetria da área em estudo (à direita) obtidos com o Google Earth Pro. 32
Figura 11. Condutividade elétrica aparente (CEa) (à esquerda) e altimetria do terreno, com as setas indicando a dinâmica da água no solo (à direita). 33
Figura 12. Mapa com a sugestão de localização das amostragens indeformadas para análise dos atributos físicos do solo: índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração. 35

Lista de tabelas

Tabela 1. Coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada atributo do solo avaliado (argila, areia, silte, matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (OC) utilizando o método LASSO para calibração dos modelos preditivos. 23
Tabela 2. Dados dos semivariogramas para cada atributo do solo analisado (argila, areia, MO e OC) com os valores das análises de laboratório e preditos pelo modelo. C0: efeito pepita. C1: patamar de variância. A1: alcance.....28

1. INTRODUÇÃO

A análise de solo é uma ferramenta importante para conhecimento da qualidade física, química e biológica do solo. Essas informações dão suporte para a tomada de decisão do planejamento e do manejo da lavoura. Entretanto, existem questionamentos acerca da forma de coleta e de avaliação das amostras de solo, visto que dependem de conhecimento técnico da mão-de-obra tanto da coleta como das análises em laboratório para obtenção de resultados confiáveis; da densidade amostral praticada, para que a área de interesse seja bem representada; alguns atributos do solo que avaliam a qualidade física do solo requerem amostras indeformadas para análise, e esses atributos não são constantemente avaliados e monitorados; e o custo das análises, que se configuram muitas vezes como fator limitante, fazendo com que o número de amostras coletadas seja reduzido, diminuindo a densidade amostral ou até mesmo a não realização da análise de solo.

A Agricultura de Precisão (AP) tem estudado novas ferramentas para coleta e de avaliação de amostras de solo, buscando facilitar esse processo e aumentar a densidade amostral com aplicação de técnicas como o sensoriamento proximal do solo (PSS) e a espectroscopia de refletância difusa (DRS).

A DRS é baseada na mensuração da radiação refletida de forma difusa por uma porção de solo, que tem relação com a sua constituição físico-química. São utilizadas regiões do espectro eletromagnético como o visível (Vis), o infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho médio (MIR). A textura e a MO possuem padrões de absorbância bem definidos nessa região do espectro.

Esses atributos têm forte relação com a estrutura do solo: a floculação da argila é o primeiro passo para formação dos agregados do solo e a matéria orgânica (MO) é agente cimentante, importante para estabilidade dos agregados devido às ligações químicas que estabelece com as partículas minerais do solo. O estudo desses atributos pode orientar em relação a qualidade da estrutura física do solo, principalmente em solos mais arenosos, em que o papel da MO na estabilidade dos agregados é mais importante (CUNHA et al., 2015).

Sugere-se que o mapeamento da textura e da MO em uma área pode direcionar a coleta de amostras indeformadas para avaliação dos atributos de estrutura e conservação do solo, otimizando tempo e recursos empregados para tal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Física do solo

Diversos fatores bióticos e abióticos afetam o crescimento e o desenvolvimento das plantas: disponibilidade de água e de nutrientes, radiação solar (luz), oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2), temperatura e suporte mecânico, entre outros (PEIXOTO et al., 2011; GUBIANI et al., 2013; SILVA et al., 2021). Como muitos desses fatores estão ligados ao solo, a avaliação dos seus atributos pode fornecer informações importantes acerca da qualidade do mesmo (BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

O solo pode ser visto por diferentes perspectivas, dependendo do profissional que o examina. Dentro das ciências agrárias, pode ser avaliado de acordo com suas características físicas, químicas e biológicas. Essas características, entretanto, não estão isoladas no sistema, mas intimamente relacionadas (CUNHA et al., 2012).

A qualidade do solo não é definida apenas pelas suas funções agrícolas. Contribuem para a definição dessa qualidade o seu papel em ecossistemas naturais e manejados, possibilitando a vida de diversos organismos que dele dependem, mantendo ou melhorando a qualidade da água e do ar, dando assistência à saúde e à habitação dos seres humanos, e pela capacidade de manter essas funções para o futuro (SANTANA; BAHIA FILHO, 1999; CUNHA et al., 2012; BERTOLLO; LEVIEN, 2019). Assim, o gerenciamento do solo deve ser pensado para manutenção dessas atividades a curto, médio e longo prazo.

O solo é um sistema trifásico composto pelas fases sólida, líquida e gasosa (BERTOLLO; LEVIEN, 2019). A fase sólida é composta por minerais e MO, e essa é a porção mais estável do solo, visto que os minerais provêm do material de origem e são resultado dos processos de intemperismo físico-químico (SAMPAIO, 2011). A MO é uma pequena fração da fase sólida, principalmente nos solos brasileiros, tipicamente tropicais. Isso porque mesmo com a adição de grandes quantidades de material orgânico no solo, após a decomposição, apenas uma parcela muito pequena permanece de fato no solo como MO estável. As partículas primárias do solo (areia, silte e argila) possuem diferentes tamanhos e a porcentagem composta por essas frações nos permite classificar o solo quanto a sua textura (MOZAFFARI et al., 2022). O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) desenvolveu uma escala para classificação das frações granulométricas do solo que posteriormente foi adotada

no Brasil. Nessa classificação as partículas de areia apresentam tamanho entre 2 e 0,05 mm, as de silte entre 0,05 e 0,002 mm, e as partículas de argila tamanho inferior a 0,002 mm (MARTINS, 2018).

Os resíduos orgânicos aplicados no solo são decompostos, sofrendo transformações físicas, químicas e biológicas que dão origem à MO (LOSS et al., 2007). Por sua vez, a MO está intimamente ligada a diversos atributos físicos, químicos e biológicos do solo; quando estável é importante agente cimentante, atuando na estruturação do solo. A MO atua na melhoria da agregação e aumenta o índice de estabilidade dos agregados, aumenta a porosidade, reduz a densidade do solo e a resistência do solo à penetração, aumenta o armazenamento de água e a aeração (LOSS et al., 2007; FERREIRA; CRUZ, 2017).

A argila e a MO são importantes materiais coloidais que compõe a fase sólida, com grande superfície específica e cargas predominantemente negativas. São partículas capazes de adsorver nutrientes, armazenando-os no solo, e capazes de dessorvê-los, repondo esses nutrientes para a solução do solo e disponibilizando-os gradualmente para que as plantas absorvam de acordo com sua necessidade (SILVA; BOHNEN, 2006; DUBEUX JR. et al., 2007).

A qualidade física e química de um solo não é importante apenas para as plantas. A atividade microbiana atua decompondo a MO e disponibilizando íons inorgânicos nutrientes de plantas para as mesmas, em um processo denominado mineralização (ANDREOTE et al., 2014; SOUZA et al., 2018). Essa comunidade biológica também requer adequadas condições para sua sobrevivência, diversidade e manutenção das funções ecológicas e para o funcionamento do seu metabolismo e sucesso dos processos de decomposição dos mais diversos materiais orgânicos aplicados no solo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Assim, alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, que acarretem a diminuição da quantidade de MO e de nutrientes podem acarretar perdas na produtividade das culturas, caracterizadas como degradação do solo (CRUZ et al., 2003).

A análise de solo provê informações acerca dos atributos e subsidia o manejo e as práticas culturais em uma propriedade. No entanto, assim como essa etapa é chave na tomada de decisão em uma lavoura, pode ser um dos gargalos da produção. Muito se discute acerca da densidade amostral praticada, de forma que essa

amostragem represente de forma fidedigna a variabilidade dos atributos do solo e possibilite a adoção do manejo mais adequado (CHERUBIN et al., 2015). Alguns fatores são determinantes no momento da análise de solo em uma propriedade, pois o processo inclui: o custo da análise, a mão-de-obra para coleta das amostras, o número de amostras, as técnicas de realização da amostragem e das análises laboratoriais e a interpretação dos resultados. O aumento da densidade amostral de forma que a distribuição dos atributos seja bem representada e suporte a tomada de decisão, configura aumento relevante no custo da amostragem e análise de solo, se tornando inviável economicamente (DEMATTÊ et al., 2015; TREVISAN et al., 2015).

2.2. Agricultura de Precisão

A Agricultura de Precisão (AP) pode ser considerada uma área muito recente dentro do contexto histórico da agricultura. No Brasil, ganhou espaço na década de 2000 e, segundo definição da Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA):

> Agricultura de Precisão é uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa os dados temporais, individuais e espaciais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária.

As variações espaciais e temporais existentes atuam ao longo do ciclo das culturas, culminando na diferença de produtividade entre áreas dentro de um talhão (pequena escala), de uma propriedade (mesoescala) ou de uma região (macroescala) ao longo das safras. Diversos fatores podem ocasionar diferenças na produtividade de uma área. Contudo, a investigação deve direcionar ao que é determinante para ocorrência de tal diferença. Dessa forma, a AP se configura como estratégia para gerenciar a desuniformidade, mas não obrigatoriamente para eliminá-la (MOLIN, 2004). E, nesse sentido, há duas vertentes dentro da AP: a que trabalha com a variabilidade espacial das lavouras e a que trabalha com o desenvolvimento de tecnologias. Na primeira, observa-se a investigação da variabilidade, a produção de mapas a partir de amostragens, sensores e sistemas de informação geográfica, visando a obtenção de diagnósticos que suportem a tomada de decisão na gestão das lavouras considerando essa variabilidade (MENEGATTI et al., 2006; ALVES et al., 2013; CAON e GENÚ, 2013; CHERUBIN et al., 2014). Já a segunda está associada

ao desenvolvimento e uso de máquinas, automação, controle de tráfego, sistemas de direção automática, plataformas digitais, aplicativos e soluções digitais em geral (MOLIN et al., 2020).

O desenvolvimento da AP possibilitou diversas mudanças positivas para a amostragem e análise de solo: a amostragem georreferenciada, que permite a espacialização dos dados, o aumento da densidade amostral e o uso de tecnologias que facilitam a coleta. No entanto, ainda há questões como o alto custo do serviço devido ao aumento do número de amostras, a disponibilidade desses equipamentos na propriedade e a necessidade de mão-de-obra qualificada ou de treinamento dos funcionários para utilização dos mesmos (CHERUBIN et al., 2015; DEMATTÊ et al., 2015; MOLIN; TAVARES, 2019).

O uso de sensores em campo, próximos (até 2,0 m) ou em contato direto com o solo é chamado de Sensoriamento Proximal do Solo (PSS) (VISCARRA ROSSEL et al., 2011). O funcionamento desses sensores possibilita a coleta de grande número de amostras, otimizando tempo e recursos financeiros destinados à análise dos atributos do solo em comparação com a análise tradicional.

Algumas dessas técnicas têm se destacado, como a condutividade elétrica aparente do solo (CEa), que é a capacidade do mesmo em conduzir corrente elétrica e essa propriedade varia em função dos constituintes físico-químicos do solo, dentre eles: textura, umidade e conteúdo de MO (MOLIN; RABELLO, 2011; GODOY et al., 2019). O teor de argila e o conteúdo de MO são fatores determinantes na CEa do solo, isso porque essas partículas possuem cargas na superfície e grande capacidade de retenção de água, que é meio condutor de corrente. Além disso, a MO disponibiliza cátions para o meio. Os valores de CEa crescem na medida que o teor de argila, o conteúdo de MO e a umidade do solo aumentam (BENITES; MENDONÇA, 1998; ALVES et al., 2013).

Outra técnica é a Espectroscopia de Refletância Difusa (DRS) é utilizada para medir a porcentagem da radiação incidente sobre uma porção de solo que é refletida de forma difusa em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético (MOLIN; TAVARES, 2019). O comportamento da radiação refletida depende da composição das moléculas do solo. Por isso, a utilização de padrões para geração de calibrações específicas para as propriedades do solo permite que o uso de sensores provenha análise de determinados atributos em quantidade e qualidade.

Uma das técnicas da DRS, muito comum para estudo do solo, utiliza as regiões do espectro eletromagnético do visível (400 a 700 nm, Vis), infravermelho próximo (700 a 2500 nm, NIR) e infravermelho médio (2500 a 25000 nm, MIR) (BEN DOR; BANIN, 1995; VISCARRA ROSSEL et al., 2006).

Os espectros Vis-NIR têm sido utilizados para predizer diversos atributos químicos e físicos do solo. A textura e a MO são os atributos com maior número de calibrações e com bons modelos de predição, visto que a argila e a MO têm padrões de absorbância bem definidos na região do visível e do infravermelho próximo (LACERDA et al., 2016; CEZAR et al., 2019).

Os benefícios para amostragem de solo que acompanharam o desenvolvimento da AP também configuram benefícios ambientais, pois o gerenciamento da variabilidade da lavoura de forma mais assertiva viabiliza a otimização dos recursos empregados para produção agropecuária. A recomendação de aplicação de insumos baseada na média dos valores em uma área desuniforme acarreta a recomendação de sub e superdoses em diferentes áreas. Em locais onde a dose de insumo é insuficiente para a demanda, ocorre escassez de recursos, menor desenvolvimento da cultura e diminuição da produtividade. Em contrapartida, a superdose pode gerar contaminação ambiental, visto que os insumos em excesso não são utilizados e permanecem no ambiente (MOLIN; TAVARES, 2019). Além disso, o uso da DRS diminui a utilização de reagentes para análise de solo, sem geração de resíduos (TREVISAN et al., 2015).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias tornou possível que alguns dos atributos do solo pudessem ser quantificados por meio do sensoriamento do solo. Contudo, outros atributos requerem a amostragem indeformada de solo ou análise em laboratório para sua avaliação, como índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração, por exemplo.

A hipótese do trabalho é de que os atributos que requerem coleta de amostras indeformadas ou análise em laboratório (índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração) possuem covariância com a textura, o conteúdo de MO e de OC do solo, que por sua vez possuem resposta no espectro NIR. Assim, o uso da DRS NIR possibilitaria o mapeamento da textura, do conteúdo de MO e de OC do solo e, como consequência, seria possível direcionar os locais de amostragem indeformada para análise desses

atributos físicos da área em estudo, otimizando tempo, recursos humanos e financeiros.

3. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de um espectrômetro difuso portátil para mapear textura, teor de matéria orgânica e carbono orgânico do solo, a fim de direcionar a coleta de amostras de solo para análise dos atributos físicos que requerem amostras indeformadas de solo e análise em laboratório (índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração). Os objetivos específicos foram:

- amostrar em alta densidade uma lavoura com um espectrômetro NIR coletando amostras de solo georreferenciadas;
- avaliar a criação de modelos de predição de atributos físicos: textura (areia, silte e argila), matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (OC);
- propor um mapa com a localização da amostragem indeformada para análise dos atributos físicos: índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração, a partir da textura e do teor de MO e OC do solo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho compreendeu cinco etapas: coleta de dados em campo (aquisição dos espectros e das amostras de solo associadas aos espectros para análise em laboratório), análise de referência em laboratório das amostras de solo, calibração dos modelos preditivos, modelagem geoestatística para confecção de mapas dos atributos e sugestão de pontos para coleta de amostras de solo indeformadas a partir das informações em alta resolução espacial obtidas com o espectro na área em estudo (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma com as etapas do trabalho.

A área em que o projeto foi desenvolvido possui aproximadamente 6 ha, e fica localizada em Piracicaba, SP, em área da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ – USP), com coordenadas centrais 22º43’01”S, 47º36’50”W. A temperatura média anual é de 22,5 ºC, com média de 16 ºC para temperatura mínima e 29 ºC para temperatura máxima, e precipitação média anual de 1306 mm (LEB ESALQ USP, 2022). A textura do solo da área é franco-arenosa.

Figura 2. Localização da área em estudo, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

O espectrômetro utilizado foi o MicroNIR OnSite-W (VIAVI Solutions Inc, California, EUA), que funciona em contato direto com o solo, emitindo radiação no NIR através de uma janela de safira. Parte da radiação é transmitida, parte é absorvida e parte é refletida. O sensor capta a porcentagem de radiação refletida e converte em valores de absorção. Esses valores variam de acordo com a composição do solo. O equipamento tem resolução espectral entre 908,1 e 1676,2 nm, coletando a cada 6,2 nm, o que resulta na leitura de 125 comprimentos de onda. O sinal coletado é carregado por um cabo USB e convertido para transmissão por meio de um cabo Ethernet, para gravação em um computador portátil. O conjunto foi acoplado em um chassi montado no engate de três pontos com levante hidráulico de um trator. Fixado em uma haste sulcadora, o equipamento opera em profundidade regulável e a profundidade adotada foi de 0,15 m. A ponteira da haste rompe o solo e o sensor acoplado percorre o interior do sulco para coleta dos espectros de radiação.

A coleta de espectros de radiação em campo funciona de forma que o equipamento agrupa amostras e faz uma análise de componentes principais, excluindo amostras que estão fora do limite de confiança estabelecido no software e, após essa etapa, gera um espectro pela média. Assim, cada espectro é coletado,

dentro de um tempo de integração, que é definido na interface do equipamento, que possui integração de dados espectrais com posicionamento via GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite). Assim, cada ponto de coleta é associado à sua latitude e longitude. Dessa forma, a densidade de coleta de espectros depende do tempo de integração definido e da velocidade de deslocamento do equipamento no campo. O espaçamento entre passadas adotado foi de 12 m, com velocidade aproximadamente constante de 0,583 m s^{-1} (2,1 km h^{-1}). O tempo de integração adotado foi o mínimo que o equipamento permitia, de 10 s, o que gerou 382 espectros na área de estudo. Visto que a condutividade elétrica aparente do solo (CEa) apresenta estabilidade temporal (SERRANO et al., 2014), como dado complementar, foi utilizada uma coleta de dados na área realizada em 2019, disponível no banco de dados do laboratório. A coleta foi realizada com o equipamento Veris 3100 (Veris Technologies, Kansas, USA). A CEa pode ser obtida por contato, em que discos de corte lisos penetram no solo funcionando como eletrodos de fluxo de corrente elétrica. A CEa do solo é captada a uma profundidade diretamente proporcional aos espaçamentos entre os eletrodos (discos) (MOLIN; RABELLO, 2011). Neste caso coletou-se a CEa nas camadas de 0 a 0,3 m e de 0 a 0,9 m e utilizou-se apenas aquela da primeira camada, de 0 a 0,3 m, com maior aproximação à profundidade das coletas de dados de espectrometria e de amostras de solo.

Após a coleta de dados espectrais, foram coletadas 72 amostras deformadas de solo georreferenciadas, com metodologia adaptada de Munnaf et al. (2020). Durante a operação com espectrômetro, a haste percorre o solo deixando um sulco com superfície de fundo suavizada. No fundo deste sulco, foram coletadas amostras pontuais, de forma aleatória, e marcadas com coordenadas GNSS. Para coincidir o início da coleta espectral com a coleta de solo tradicional, ao sinal de que o equipamento havia começado uma nova análise de espectro, uma estaca de madeira era alocada no sulco. Com a velocidade de deslocamento do trator e o tempo de integração de cada espectro, foi possível coletar solo para análise do mesmo transecto de onde foi gerado um espectro.

As amostras foram submetidas a análise físico-química em laboratório. Dessa forma, das amostras coletadas, as análises física e química forneceram dados quantitativos acerca dos atributos do solo, permitindo chegar às possíveis calibrações

e à validação de modelos de predição de atributos do solo utilizando espectroscopia NIR em campo.

O processamento dos dados ocorreu no ambiente do software RStudio (RStudio, 2020) e o método estatístico utilizado foi o Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), que é um método de seleção e redução de variáveis que realiza regressão com penalidades 1L – norm que tem por objetivo encontrar β = {β = βj}, valor que minimiza a Equação 1.

$$\sum_{i=1}^{N} (y_i - \sum_j x_{ij}\beta_j)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{\rho} |\beta_j| \qquad \text{(Equação 1)}$$

Sendo:

x_{ij} = preditores normalizados

y_i = valores de resposta centrais

i = 1, 2, 3, ..., N

j = 1, 2, 3, ..., N

Portanto, é um método de redução de dimensionalidade, indicado para trabalho com dados multivariados, como os espectros NIR de solo obtidos no presente trabalho. O banco de dados foi dividido na proporção 70:30 para calibração e validação dos modelos.

Os parâmetros de avaliação dos modelos calibrados foram o coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), comumente utilizados na literatura como métrica de robustez de modelos preditivos.

Foi utilizado o software Vesper (MINASNY et al., 2005) para modelagem da dependência espacial dos atributos do solo analisados individualmente, interpolação dos dados e confecção de mapas desses atributos avaliados por krigagem, observando a capacidade de predição dos modelos, possíveis correlações entre valores e feições obtidas por amostragem tradicional e pela predição via DRS, além de possíveis correlações entre atributos.

O número de classes para visualização dos mapas e histogramas foi definido pela Regra de Sturges (Equação 2):

$$\mathrm{NC} = 1 + 3{,}322 \log \mathrm{N} \qquad \text{(Equação 2)}$$

sendo:

NC = número de classes

N = número de amostras

Por fim, foram sugeridos pontos de coleta para análise dos atributos físicos do solo de acordo com os mapas gerados pela coleta de espectros da lavoura com o espectrômetro, buscando identificar se o mapeamento prévio possibilita a orientação das amostragens e a otimização de tempo e dos recursos empregados para tal. Utilizou-se os atributos argila e MO para gerar o mapa de recomendação, sendo que foi atribuído peso 2 para a MO, devido ao papel desse atributo na estrutura física do solo (LOSS et al., 2007; FERREIRA; CRUZ, 2017). Dessa forma, sugeriu-se, nesse trabalho, o uso da Equação 3:

$$\mathrm{X} = \frac{ARGILA}{MÁX\ ARGILA} + 2 \times \frac{MO}{MÁX\ MO} \qquad \text{(Equação 3)}$$

sendo:

X = valor do pixel

Máx argila = maior valor de argila observado (g kg^{-1})

Máx MO = maior valor de MO observado (g kg^{-1})

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com determinação dos atributos por análise em laboratório foram encontrados valores entre 51 e 183 $g.kg^{-1}$ para argila (média = 118,46 $g.kg^{-1}$), 751 e 871 $g.kg^{-1}$ para areia (média = 795,54 $g.kg^{-1}$), 18 e 130 $g.kg^{-1}$ para silte (média = 86 $g.kg^{-1}$), caracterizando a textura do solo como franca-arenosa. Para MO os valores variaram

de 12 a 35 $g.kg^{-1}$ (média = 18,26 $g.kg^{-1}$) e para OC de 7 a 20 $g.kg^{-1}$ (média = 10,58 $g.kg^{-1}$).

Para os dados preditos pelo modelo, foram encontrados valores entre 104,5 e 128,5 $g.kg^{-1}$ para argila (média = 119,2 $g.kg^{-1}$), 790,4 e 800,8 $g.kg^{-1}$ para areia (média = 795,5 $g.kg^{-1}$), 82,47 e 90,25 $g.kg^{-1}$ para silte (média = 85,48 $g.kg^{-1}$), caracterizando a textura do solo como franca-arenosa. Para MO os valores variaram de 11,88 a 24,13 $g.kg^{-1}$ (média = 18,28) e para OC de 7,52 a 13,85 $g.kg^{-1}$ (média = 10,64 $g.kg^{-1}$).

Utilizando o método estatístico LASSO para processamento dos dados, foram calibrados modelos preditivos dos atributos de estudo. Os resultados de validação dos modelos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para cada atributo do solo avaliado (argila, areia, silte, matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (OC) utilizando o método LASSO para calibração dos modelos preditivos.

LASSO		
	R^2	RMSE
ARGILA	0,3728	22,0576
AREIA	0,0610	22,0673
SILTE	0,2075	23,9630
MO	0,3339	2,9068
OC	0,3204	1,6906

Na figura 3 são apresentados os histogramas com a frequência de distribuição dos valores preditos (à esquerda) e dos valores determinados em laboratório (à direita) para cada atributo.

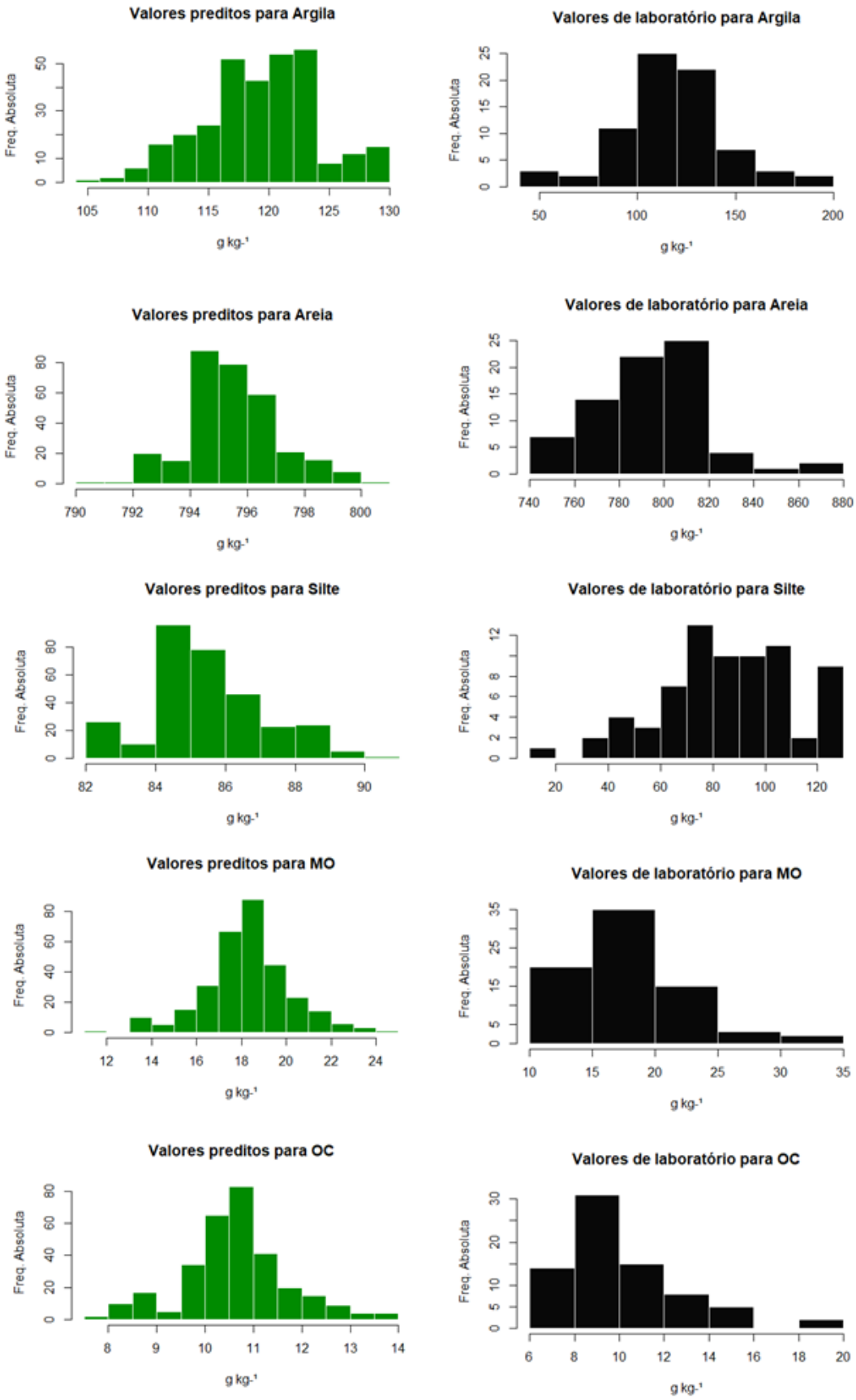

Figura 3. Frequência de distribuição dos valores preditos e dos valores da análise de laboratório para argila, areia, silte, MO e OC (g kg^{-1}).

O modelo teve bom desempenho na predição de textura (areia, silte e argila), MO e OC em comparação com os dados obtidos em laboratório, o que era esperado devido aos padrões de absorbância bem definidos que que tais atributos apresentam no espectro NIR (Lacerda et al., 2016; Cezar et al., 2019).

Os atributos preditos pelo modelo têm distribuição estatística semelhante aos valores encontrados com a análise físico-química do solo em laboratório, sendo que o intervalo que compreende os valores mais frequentes em ambas as análises (coleta espectral e laboratório) são semelhantes, como é possível observar nos histogramas (Figura 3). Entretanto, na análise em laboratório observa-se a ocorrência de valores mais extremos, tanto para valores mínimos como para valores máximos, em todos os atributos. A média, por sua vez, é muito semelhante. A observação de valores mais extremos em laboratório provavelmente se deu pelo uso do método LASSO. A suavização dos valores preditos quando comparados aos valores observados, ou inseridos na calibração dos modelos preditivos, é uma característica conhecida que os modelos de redução de dimensionalidade podem apresentar (BELLON-MAUREL et al., 2010; VELLIANGIRI et al., 2019).

Identificou-se, neste trabalho, que o uso do R^2 como parâmetro estatístico para avaliação dos modelos preditivos não foi satisfatório. Apesar dos modelos apresentarem satisfatória predição dos atributos físico-químicos do solo, apenas a análise do R^2 poderia levar ao descarte dos modelos. Os atributos avaliados nesse estudo apresentam resposta espectral direta no NIR (STENBERG et al., 2010). Sugere-se que o R^2 não deve ser utilizado como métrica de descarte de modelos preditivos dos atributos do solo com DRS NIR.

Foi realizada análise de correlação entre os atributos avaliados, utilizando as análises de solo em laboratório (Figura 4). Argila e areia demonstraram considerável correlação negativa de -0,42; silte demonstrou correlação negativa com ambos, argila e areia. MO e OC apresentaram fator quase linear de correlação (0,99) e apresentaram distribuição independente com os atributos físicos do solo.

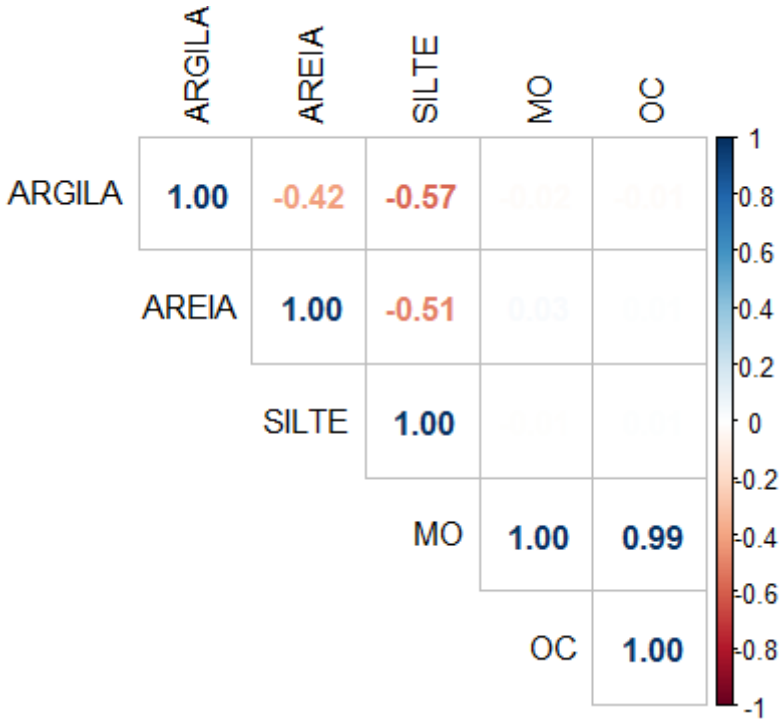

Figura 4. Correlação de Pearson dos atributos da área de estudo obtidos pelas análises de laboratório.

Nas figuras 5 e 6 e na tabela 2 são apresentados os semivariogramas e os dados da krigagem utilizando os dados das análises em laboratório e os dados preditos pelo modelo. Com a interpolação por krigagem, foi possível gerar mapas com os dados das análises de solo realizadas em laboratório e com os dados preditos pelo modelo: mapas de textura (argila e areia) (Figura 7) e de distribuição espacial dos atributos MO e OC (Figura 8 e 9, respectivamente). Para areia com os dados obtidos em laboratório não foi gerado mapa por krigagem, pois na análise de dependência espacial dos dados foi considerado efeito pepita puro.

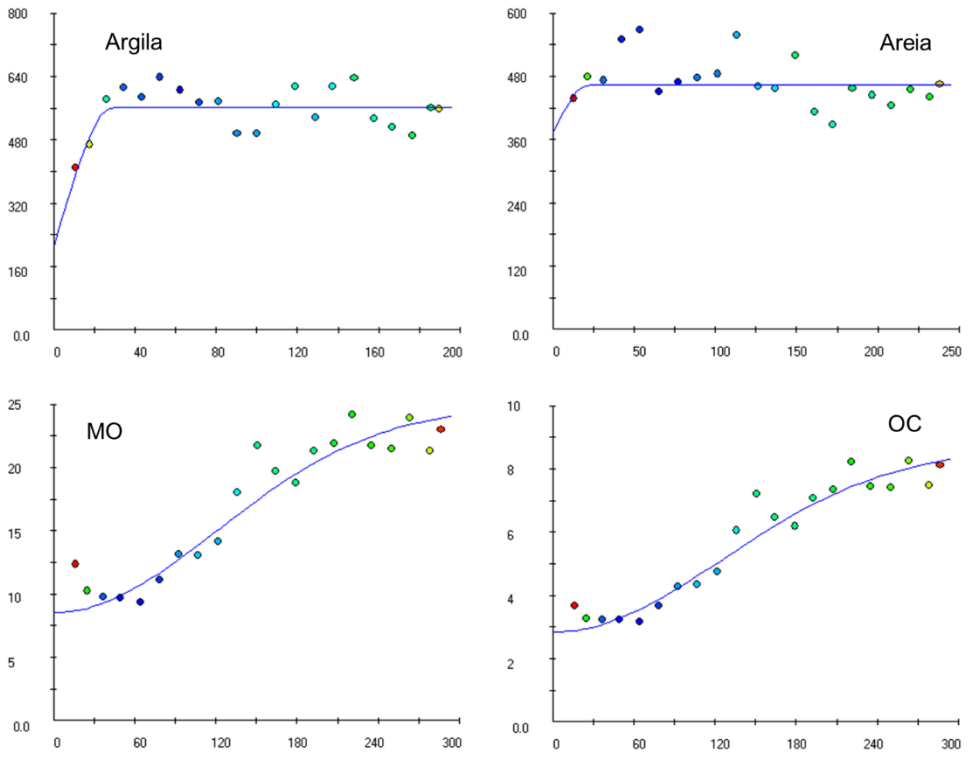

Figura 5. Semivariogramas referentes aos valores de laboratório para os atributos argila (a), areia (b), MO (c) e OC (d).

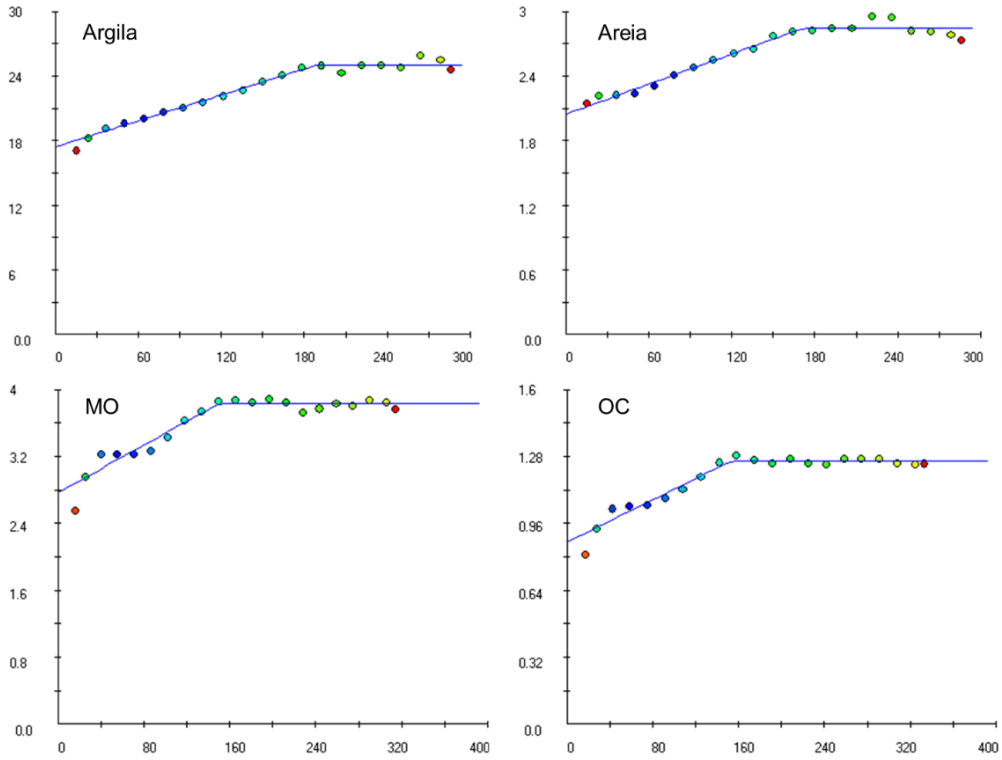

Figura 6. Semivariogramas referentes aos valores preditos pelo modelo para os atributos argila (a), areia (b), MO (c) e OC (d).

Tabela 2. Dados dos semivariogramas para cada atributo do solo analisado (argila, areia, MO e OC) com os valores das análises de laboratório e preditos pelo modelo. C0: efeito pepita. C1: patamar de variância. A1: alcance.

	Análise de laboratório			Preditos pelo modelo		
	C0	C1	A1	C0	C1	A1
Argila	210,10	352,50	30	17,44	7,57	188
Areia	-	-	-	2,05	0,80	172
MO	8,53	16,34	170	2,44	1,44	72
OC	2,84	5,83	177	0,87	0,39	154

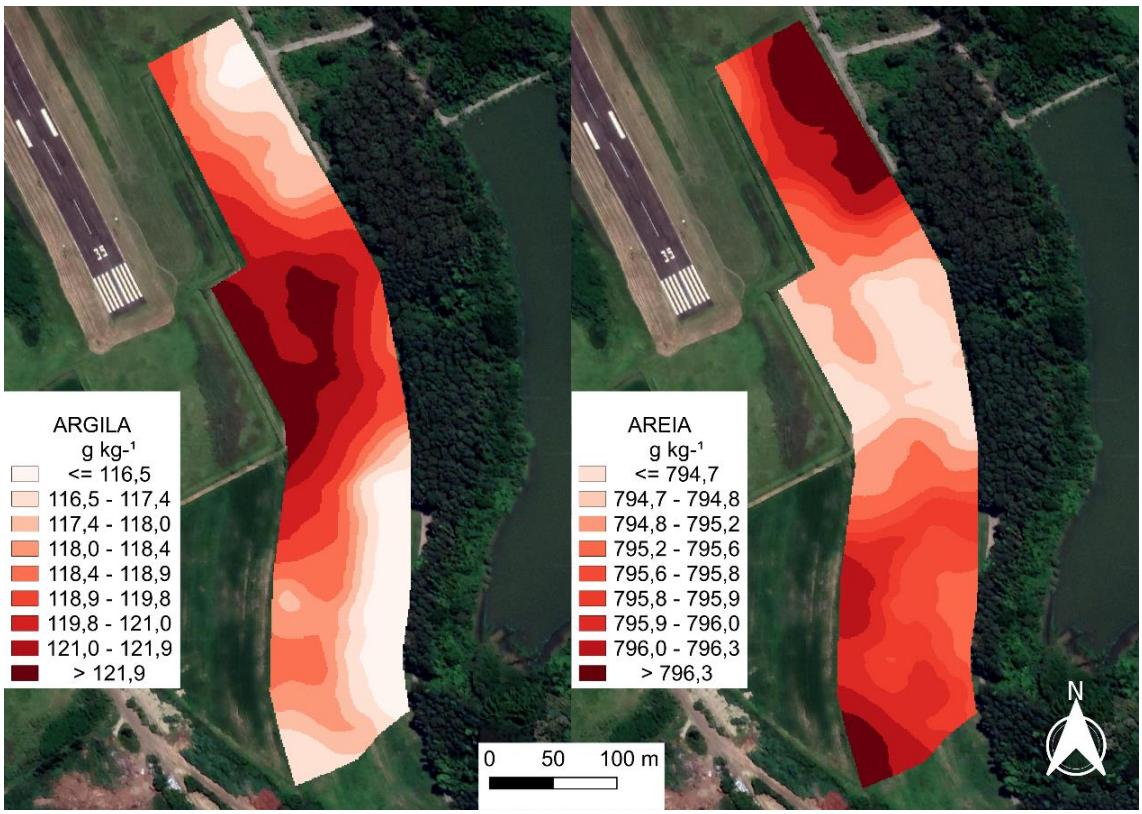

Figura 7. Mapa das frações do solo da área estudada gerados com os valores preditos pelo modelo: argila (em g kg^{-1}, à esquerda) e areia (em g kg^{-1}, à direita).

Em relação à distribuição espacial dos atributos físicos do solo, os locais com maior teor de argila têm menor teor de areia (Figura 7). A textura do solo é composta

por uma proporção dessas partículas minerais e a relação entre areia e argila é inversamente proporcional (LONG et al., 2013).

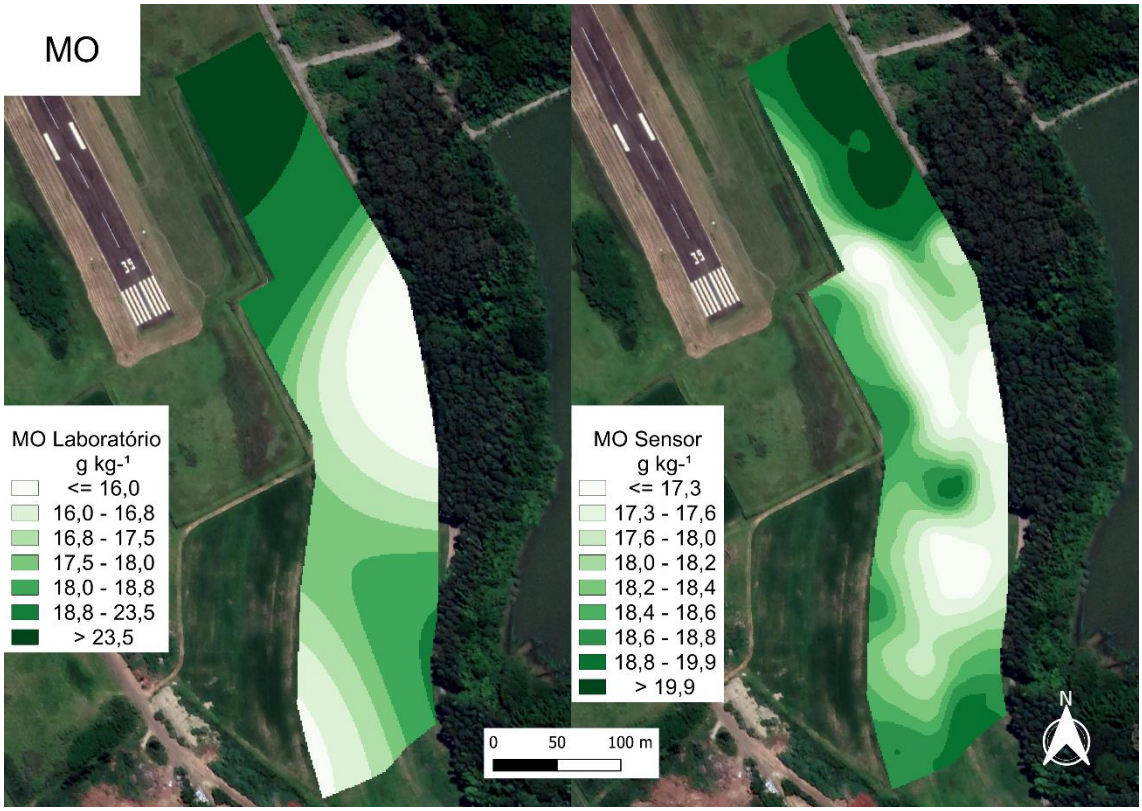

Figura 8. Mapa de distribuição espacial de matéria orgânica (MO, em g kg^{-1}). À esquerda, com dados das análises de solo realizadas em laboratório, e à direita, com dados preditos pelo modelo.

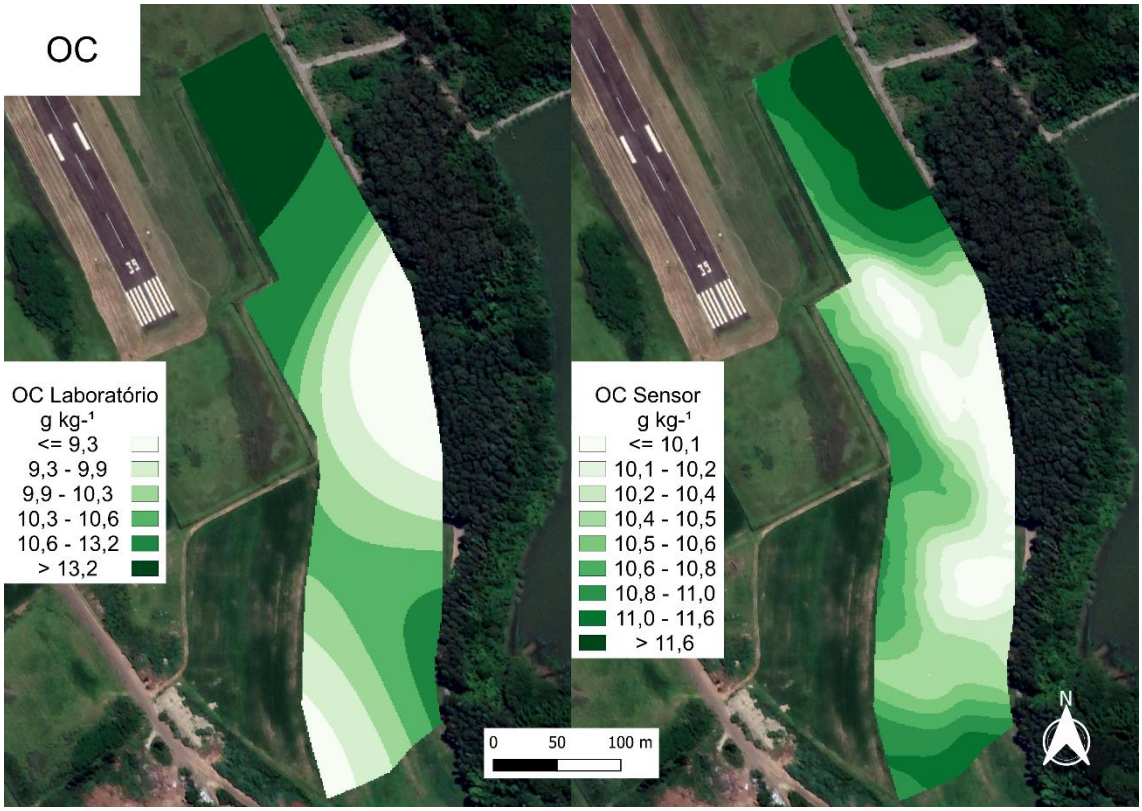

Figura 9. Mapa de distribuição espacial de carbono orgânico (OC, em g kg^{-1}). À esquerda, com dados das análises de solo realizadas em laboratório, e à direita, com dados preditos pelo modelo.

É possível observar a semelhança nas feições dos mapas de MO e OC gerados com dados das análises de solo realizadas em laboratório e com dados preditos pelo modelo (Figuras 8 e 9). Os mapas gerados com os dados coletados pelos sensores apresentam maior detalhamento ou número de zonas diferentes de quantificação desses atributos, provavelmente pelo fato de que esses mapas foram gerados com maior número de amostras do que as levadas para o laboratório (CHERUBIN et al., 2014). Foram 305 amostras coletadas pelo sensor na área em estudo e 72 amostras coletadas para análise em laboratório.

Com o aumento da densidade amostral promovida pelo uso do sensor, os variogramas ajustados mostraram que para os atributos MO e OC houve menor alcance do que utilizando os dados de laboratório (Tabela 2), fato que pode ser explicado pelo aumento de feições identificadas pelo sensor para esses dois atributos (Figuras 8 e 9). Já para argila e areia o alcance foi maior do que utilizando os dados de laboratório. O modelo de predição e a krigagem dos dados suavizaram as feições para esses atributos, aumentando o alcance (Tabela 2).

A distribuição de MO e OC foi semelhante, como era sugerido pela correlação observada entre os atributos (Figura 4). Esse fator pode ser observado nos mapas com a distribuição espacial desses atributos (Figuras 8 e 9). A semelhança na distribuição ocorre pela relação existente, descrita na literatura: 58% da MO estável está na forma de OC (LOSS et al., 2007; FERREIRA; CRUZ, 2017). Assim, maiores teores de OC no solo estão associados à maiores teores de MO. Dessa forma, os resultados apresentados para os dois atributos demonstram robustez dos modelos calibrados, que chegaram, como era esperado, em valores de predição e distribuição espacial semelhantes, e não de forma aleatória na área de estudo.

Os locais com maior teor de MO e OC são as regiões mais planas ou com menor altitude no terreno (Figuras 8, 9 e 10). Sugere-se que isso ocorra devido à dinâmica da água no solo. Nos locais mais baixos, ocorre a deposição das partículas pela ação do vento e da água, resultando em maior teor de MO e OC. Já nos locais mais planos, a infiltração de água é mais lenta e uniforme, conferindo decomposição mais lenta, sem o carregamento dessas partículas (SANCHEZ et al., 2009).

Com dados já disponíveis, gerou-se o mapa de CEa como informação complementar, o mapa de altimetria com Google Earth Pro (GOOGLE, 2022) e extraídos os contornos da área em estudo (Figura 10).

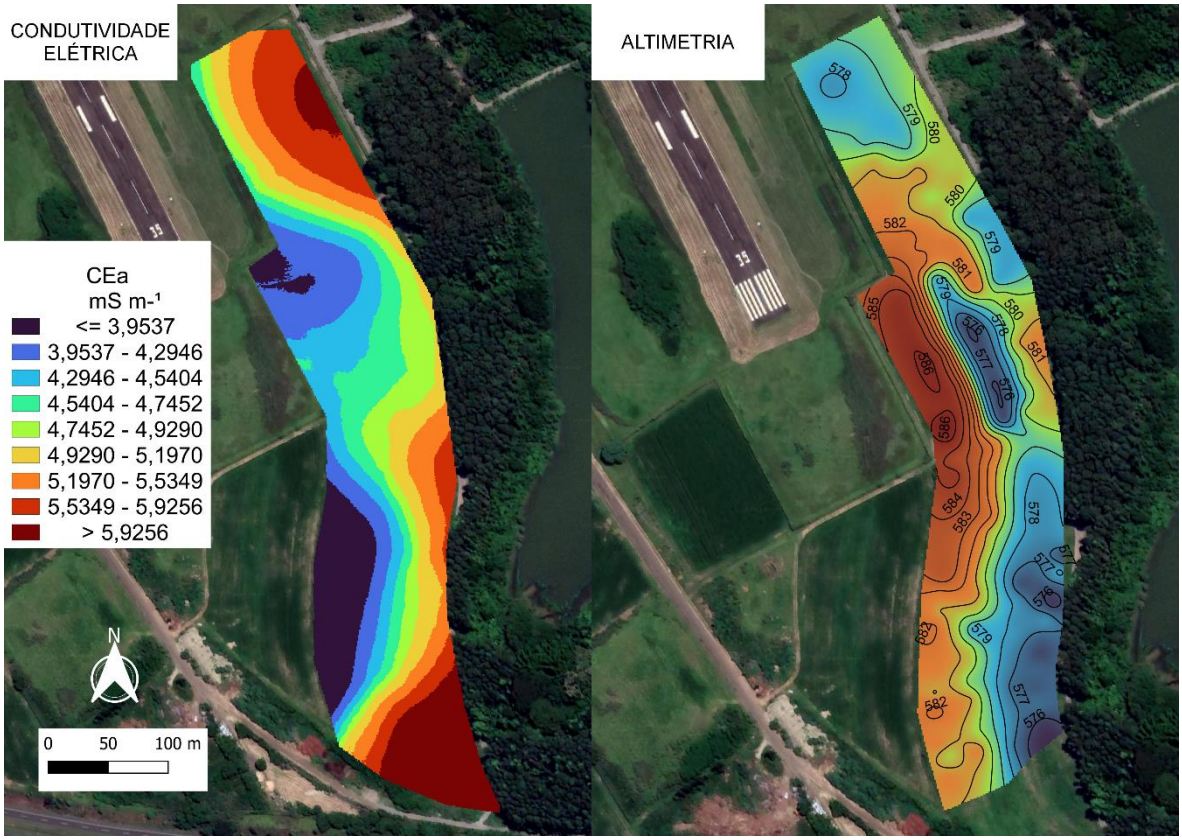

Figura 10. CEa (mS m^{-1}) do solo, com dados coletados em 2019 (à esquerda) e mapa de altimetria da área em estudo (à direita) obtidos com o Google Earth Pro.

A CEa do solo é fortemente influenciada pelo teor de argila e o conteúdo de MO devido à grande superfície específica, às cargas na superfície dessas partículas e à grande capacidade de retenção de água (VEIGA, 2018; LIMA, 2021). Smaniotto et al. (2021) encontraram relação positiva entre o teor de argila e de matéria orgânica e a CEa do solo. A relação entre o teor de argila e a CEa do solo não foi bem elucidada no presente trabalho, visto que os locais com maior teor de argila apresentaram menor CEa (Figuras 7 e 10).

No entanto, a CEa do solo mostrou relação considerável com dois fatores da área de estudo. Os locais com maior teor de MO, também tenderam a apresentar maior CEa (Figuras 8 e 10). Além disso, o fator que apresentou maior importância para compreensão dos valores de CEa foi o relevo da área de estudo. Em locais onde ocorre maior acúmulo de água, a CEa do solo é maior, visto que a água é meio condutor de corrente (MOLIN; RABELLO, 2011).

É importante, portanto, que se note o relevo do terreno para compreender a influência do mesmo nos atributos físicos do solo e na CEa (Figura 10). A área possui um terraço a Sudeste com menor elevação no terreno (em tonalidade azul). A Sudoeste há um terraço com maior altitude (em tonalidade marrom-alaranjada). Ao Norte há um platô de menor altitude (em tonalidade azul).

É possível observar que os locais com maior altitude na área estudada apresentaram menor CEa, da mesma forma, locais com menor altitude apresentaram maior CEa. O fato de que a água é drenada mais facilmente nos locais mais altos do terreno e se acumula nas baixadas pode explicar esses resultados. Na figura 11 as setas indicam o fluxo da água no terreno.

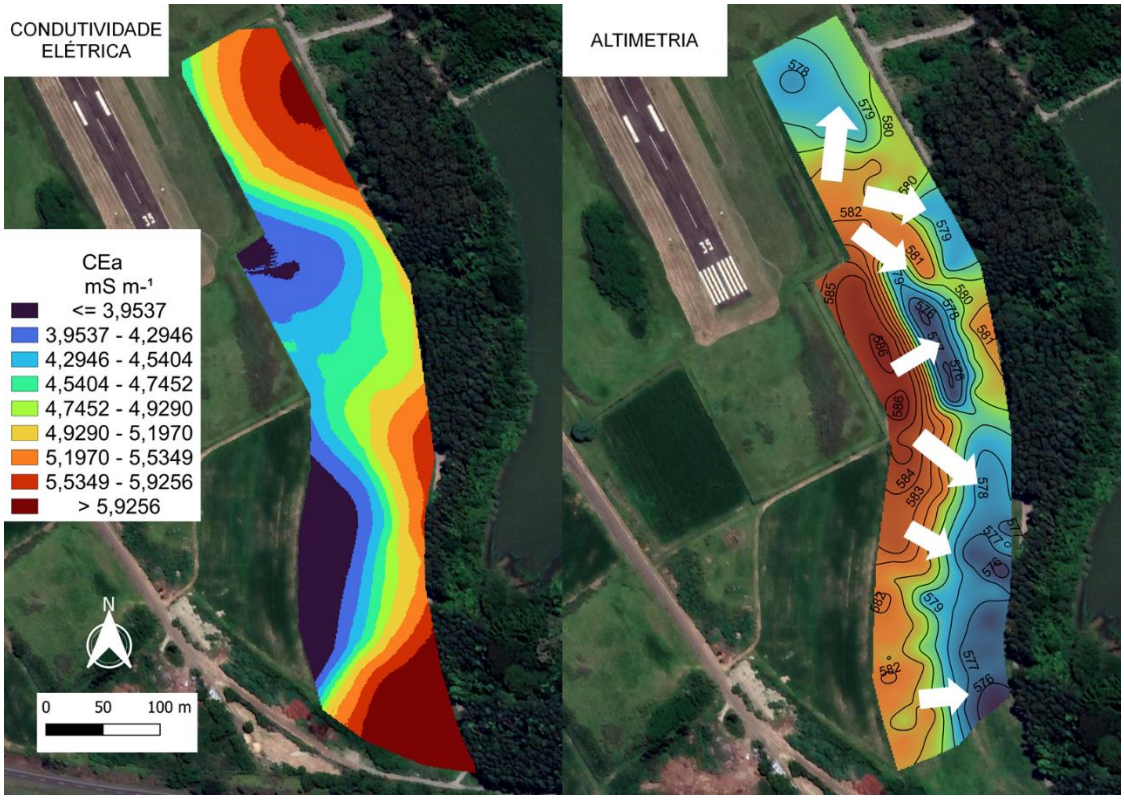

Figura 11. Condutividade elétrica aparente (CEa) (à esquerda) e altimetria do terreno, com as setas indicando a dinâmica da água no solo (à direita).

A classificação da textura do solo da área é franco-arenoso. Esse solo possui baixo conteúdo de argila e, assim, menor capacidade de retenção de água. Apesar de existir variação nos valores de argila e MO, fatores diretamente relacionados à CEa, os teores apresentados desses atributos na área são baixos. A textura majoritariamente arenosa impede grande capacidade de retenção de água no solo. A

água que entra no sistema infiltra rapidamente pelos macroporos, devido à granulometria, e a dinâmica da água no terreno será influenciada principalmente pelo relevo, que é, portanto, o fator de maior importância na CEa, como observado nesse trabalho (CICORE et al., 2014; SANA et al., 2014).

Com os resultados apresentados no presente trabalho, que demonstram o bom funcionamento do sensor para mapear o conteúdo de argila e de MO na área em estudo, a influência desses atributos na agregação do solo e na qualidade física do solo, principalmente em solos mais arenosos (LOSS et al., 2007; CUNHA et al., 2015; FERREIRA; CRUZ, 2017), propõe-se um índice de mapeamento da estrutura do solo para coleta de amostras indeformadas e análise em laboratório de atributos físicos como índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração. Esse índice considera os dois elementos que mais influenciam a estrutura do solo na área: argila e MO. Ressalta-se que a textura do solo é franco-arenosa e, portanto, a MO tem papel mais significativo na agregação. O resultado foram quatro zonas, com uma amostra representando cada uma dessas zonas (Figura 12).

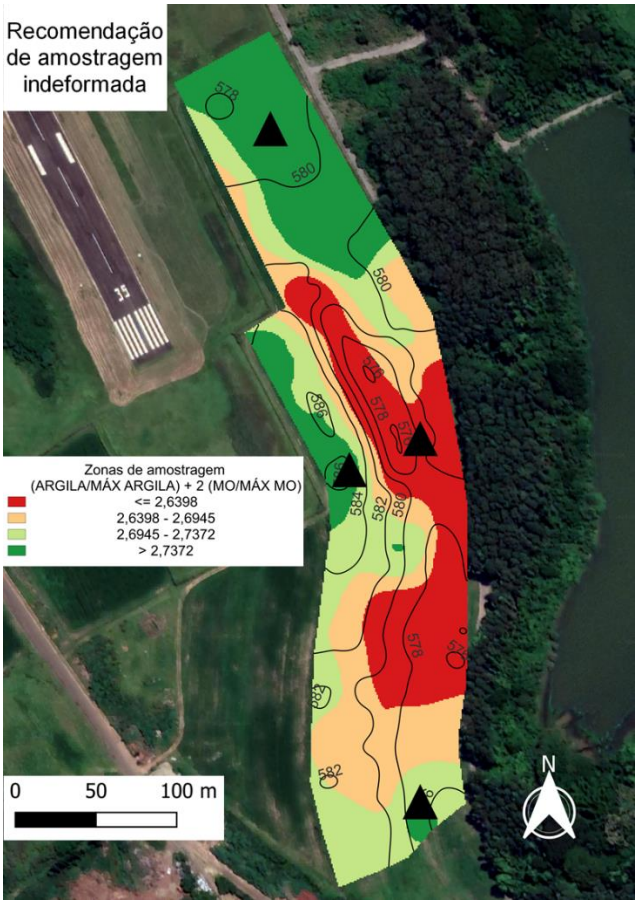

Figura 12. Mapa com a sugestão de localização das amostragens indeformadas para análise dos atributos físicos do solo: índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração.

As amostras indeformadas de solo são importantes para estudo da estrutura, permitindo a avaliação da qualidade física do solo. Essa avaliação está diretamente relacionada à capacidade de retenção de água, de aeração e de conservação desse recurso. No entanto, a amostragem indeformada é um processo moroso e requer cuidados tanto no momento da coleta, como na conservação das amostras entre a coleta no campo e a avaliação em laboratório, para que os resultados apresentem a realidade da área em estudo. Além disso, a avaliação desses atributos físicos do solo não é praticada com frequência pelos produtores, mas apenas para investigação de um problema ou para avaliação do solo para planejamento da irrigação.

Sugere-se que trabalhos futuros investiguem o uso da espectroscopia de reflectância difusa em tempo real para auxiliar o mapeamento espacial em alta densidade de atributos físicos do solo, objetivando compreender se o mapeamento é

capaz de indicar a transição de zonas onde esses atributos físicos diferem na lavoura, de modo a otimizar o planejamento de coleta de amostras indeformadas de solo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os atributos argila, areia, MO e OC apresentaram boa resposta espectral no NIR. A DRS NIR possibilitou o mapeamento da distribuição espacial desses atributos, bem como o estudo da dinâmica do solo na área em estudo, apesar de a análise do R^2 para avaliação dos modelos de predição sugerir o contrário. Por se tratar de uma área com solo arenoso, o relevo do terreno, corroborando os dados de CEa da área, foram fatores importantes para explicar a dinâmica de MO.

Por fim, direcionou-se zonas para coleta de amostras indeformadas de solo para análise de atributos físicos em laboratório (índice de estabilidade dos agregados, porosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração) utilizando as informações obtidas pelo mapeamento da argila e da MO em alta densidade espacial com DRS NIR. Futuros trabalhos podem testar a hipótese de que as zonas sugeridas diferem entre si em relação aos atributos de estrutura física do solo.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. M. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. 2013. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. Bioscience journal (online), 29 (1): 104-114. Disponível em: < https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13687/11974> Acesso em: 21 abr. 2022.

ANDREOTE, F. D.; GUMIERE, T.; DURRER, A. 2014. Exploring interactions of plant microbiomes. Scientia Agrícola, v. 71, n. 6, p. 528-539.

BELLON-MAUREL, V.; FERNANDEZ-AHUMADA, E.; PALAGOS, J. M. R.; McBRATNEY, A. 2010. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993610001585> Acesso em: 20 mai. 2022.

BEN-DOR, E.; BANIN, A. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. Soil Science Society of America Journal, 59(2), 364-372.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. 1998. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 22: 215-221. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/vPx54GXCN9rxxWGtbkmFbPm/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 21 abr. 2022.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. 2019. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. Pesquisa Agropecuária Gaúcha, v. 25, n. 3, p. 208-218.

CAON, D.; GENÚ, A. M. 2013. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 6, p. 629-639.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. 2016. Microbiologia do Solo. 2 ed. Piracicaba: ESALQ. 221 p.

CEZAR, E.; NANNI, M. R.; GUERRERO, C.; DA SILVA JUNIOR, C. A.; CRUCIOL, L. G. T.; CHICATI, M. L.; SILVA, G. F. C. 2019. Organic matter and sand estimates

by spectroradiometry: Strategies for the development of models with applicability at a local scale. Geoderma, 340, 224-233.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; MENEGOL, D. R.; DA ROS, C. O.; PIAS, O. H. C.; BERGHETTI, J. 2014. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. Ciência Rural, v. 44, p. 425-432.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M. 2015. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 50, n. 2, p. 168-177.

CICORE, P.L.; PERALTA, N. R.; CASTRO FRANCO, M.; SANCHEZ, H. R.; COSTA, J. L. 2014. Conductividad electrica aparente y altimetria para delimitar ambientes edáficos em suelos ganaderos. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Cicore/publication/322896290_CONDUCTIVIDAD_ELECTRICA_APARENTE_Y_ALTIMETRIA_PARA_DELIMITAR_AMBIENTES_EDAFICOS_EN_SUELOS_GANADEROS/links/5a7468000f7e9b20d4911591/CONDUCTIVIDAD-ELECTRICA-APARENTE-Y-ALTIMETRIA-PARA-DELIMITAR-AMBIENTES-EDAFICOS-EN-SUELOS-GANADEROS.pdf> Acesso em: 28 mai. 2022.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. 2003. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 27, n. 6. Viçosa.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A. 2012. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, (16)1.

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. 2015. Matéria orgânica do solo. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). Recurso solo: propriedades e usos. São Carlos: Cubo.

DEMATTÊ, J. A. M.; ALVES, M. R.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T.; BARROS E SOUZA, A.; ROMERO, D. J.; SATO, M. V. 2015. Hyperspectral remote sensing as na alternative to estimate soil attributes. Revista Ciência Agronômica, v. 46, n. 2, p. 223-232.

DUBEUX JR., J. C. B.; SOLLENBERGER, L. E.; MATHEWS, B. W.; SCHOLBERG, J. M.; SANTOS, H. Q. 2007. Nutrient Cycling in Warm-Climate Grasslands. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2135/cropsci2006.09.0581> Acesso em: 01 mar. 2022.

FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. 2017. Fertilidade do Solo: Matéria Orgânica. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias/UNESP. Edição revista em 2017.

GODOY, F. O.; BERNARDI, A. C. C.; ROSSI, F.; BUENO, J. O. A. 2019. Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo e sua relação com matéria orgânica e granulometria. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 48, Campinas, SP: SBEA, 2019. CONBEA. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1121545> Acesso em: 21 abr. 2022.

GOOGLE – Google Earth Pro. 2022. Versão 7.3.4.8642. Disponível em: <https://www.google.com/earth/versions/>

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. 2013. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 1, p. 1-10.

ISPA – International Society of Precision Agriculture. Precision Ag Definition. Disponível em: <https://www.ispag.org/about/definition> Acesso em: 11 abr. 2022.

LACERDA, M. P.; DEMATTÊ, J. A.; SATO, M. V.; FONGARO, C. T.; GALLO, B. C.; SOUZA, A. B. 2016. Tropical texture determination by proximal sensing using a regional spectral library and its relationship with soil classification. Remote Sensing, 8(9), 701.

LEB – ESALQ – USP. 2022. Série de Dados Climatológicos do Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP. Departamento de Engenharia de Biossistemas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/postocon.html> Acesso em: 17 jul. 2022.

LIMA, T. A. 2021. Determinação da condutividade elétrica (CE) do extrato de saturação do solo a partir da CE em extratos solo/água na relação 1:5.

Disponível em: <https://releia.ifsertao-pe.edu.br/jspui/handle/123456789/704> Acesso em: 20 mai. 2022.

LONG, R. M.; GREGO, C. R.; VICENTE, L. E.; FRANCESCHINI, M. H. D.; SATO, M. V. 2013. Análise geoestatística da granulometria do solo como suporte na montagem de biblioteca espectral em área de pastagem. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/971775/1/RE13511.pdf> Acesso em: 21 mai. 2022.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BRITO, R. J.; ARINELLI, G. P. 2007. Atributos químicos e físicos de solos de tabuleiros sob diferentes coberturas vegetais na região norte fluminense. Magistra, Cruz das Almas – BA, v. 19, n. 2, p. 150-162.

MARTINS, D. W. P. 2018. Dispositivo para ensaio automático de sedimentação e análise granulométrica do solo. Dissertação – Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação. Goiás: Goiânia. 114 f.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P.; GÓES, S. L.; KORNDORFER, G. H.; SOARES, R. A. B.; LIMA, E. A. 2006. Benefícios econômicos e agronômicos da adoção de agricultura de precisão em usinas de açúcar. In: 2º Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. Disponível em: <https://www.agriculturadeprecisao.org.br/wp-content/uploads/2019/11/cgr_2006-03.pdf> Acesso em: 21 abr. 2022.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. 2005. Vesper version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture.

MOLIN, J. P. 2004. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. p 1-10. Disponível em: <https://www.agriculturadeprecisao.org.br/wp-content/uploads/2020/01/cgr_2004-08.pdf> Acesso em: 21 abr. 2022.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. 2011. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. Engenharia Agrícola [online], v. 31, n. 1, p. 90-101. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000100009> Acesso em: 20 abr. 2022.

MOLIN, J. P.; TAVARES, T. R. 2019. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: Challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. Engenharia Agrícola, 39(SPE), 126-147.

MOLIN, J. P.; BAZAME, H. C.; MALDANER, L.; CORREDO, L. P.; MARTELLO, M.; CANATA, T. F. 2020. Agricultura de precisão e as contribuições digitais para a gestão localizada das lavouras. Revista Ciência Agronômica [online], v. 51, n. spe. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200088> Acesso em: 20 abr. 2022.

MOZAFFARI, H.; MOOSAVI, A. A.; DEMATTE, J. A. M. 2022. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data: Introducing two new methods. Biosystems Engineering, v. 216, p. 198-217.

MUNNAF, M. A.; GUERRERO, A.; NAWAR, S.; HAESAERT, G.; VAN MEIRVENNE, M.; MOUAZEN, A. M. 2020. A combined data mining approach for on-line prediction of key soil quality indicators by Vis-NIR spectroscopy. Soil and Tillage Research, 205, 104808.

PEIXOTO, C. P.; CRUZ, T. V.; PEIXOTO, M. F. S. P. 2011. Análise quantitativa do crescimento de plantas: conceitos e prática. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2011b/ciencias%20agrarias/analise%20quantitativa.pdf> Acesso em: 01 abr. 2021.

RStudio Team. 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA.

SAMPAIO, E. P. M. 2011. Mineralogia do Solo. Departamento de Geociências: Universidade de Évora, 22 p.

SANA, R. S.; ANGHINONI, I.; BRANDÃO, Z. N.; HOLZSCHUH, J. 2014. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. Disponível em: < https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/tjTDJFMkMPfx4vZBRhCqhBJ/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 28 mai. 2022.

SANCHEZ, R. B.; JÚNIOR, J. M.; DE SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. 2009. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. Solos e Nutrição de Plantas. Bragantia 68

(4). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400030> Acesso em: 04 jun. 2022.

SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. F. C. 1999. Indicadores de Qualidade do Solo. In: Embrapa Milho e Sorgo – Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Brasília, DF. [Ciência do solo e qualidade de vida: anais].[Planaltina: Embrapa Cerrados].

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; DA SILVA, J. M. 2014. Spatial and Temporal Patterns of Apparent Electrical Conductivity: DUALEM *vs*. Veris Sensors for Monitoring Soil Properties. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/6/10024/htm> Acesso em: 05 jun. 2022.

SILVA, L. S.; BOHNEN, H. 2006. Relações entre nutrientes na fase sólida e solução de um latossolo durante o primeiro ano nos sistemas plantio direto e convencional. Revista Ciência Rural, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1164-1171.

SILVA, T. R. G.; COSTA, M. L. A.; FARIAS, L. R. A.; SANTOS, M. A.; ROCHA, J. J. L.; SILVA, J. V. 2021. Fatores abióticos no crescimento e florescimento das plantas. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, e19710413817.

SOUZA, M. S.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, J. R. I.; LEITE, M. L. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. 2018. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de pastagens tropicais. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Alexandre-Manicoba-Da-Rosa-Ferraz-Jardim-2/publication/325157940_Ciclagem_de_nutrientes_em_ecossistemas_de_pastagens_tropicais/links/5afb3a22aca272e7302c2a9e/Ciclagem-de-nutrientes-em-ecossistemas-de-pastagens-tropicais.pdf> Acesso em: 01 mar. 2022.

SMANIOTTO, A. O.; ALVES, T.; CASTOLDI, G.; MORAES, V. H.; CRUZ, S. C. S.; TEMPESTA, I. F.; BRAZ, M. G. 2021. Importância da condutividade elétrica aparente do solo. Disponível em: <https://periodicos.ifgoiano.edu.br/index.php/informe_goiano/article/view/131> Acesso em: 20 mai. 2022.

STENBERG, B.; ROSSEL, R. A. V.; MOUAZEN, A. M.; WETTERLIND. 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. Disponível em: <

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211310070057> Acesso em: 20 mai. 2022.

TREVISAN, R. G.; EITELWEIN, M. T.; COLAÇO, A. F.; GARZELLA, T. C.; MOLIN, J. P. 2015. Imagens de satélite da vegetação nativa no mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo. X Congresso Brasileiro de Agroinformática. Disponível em: <http://afurlan.com.br/lap/cp/assets/layout/files/tc/pub_imagens-de-satelite-da-vegetacao-nativa-no-mapeamento-da-variabilidade-espacial-de-atributos-do-solo---trevisan-rg--eitelwein-mt--colaco-af--garzella-tc--molin-jp--x-sbiagro-2015---04-.pdf> Acesso em: 11 abr. 2022.

VEIGA, V. S. 2018. Correlação espacial entre condutividade elétrica e atributos químicos e físicos do solo. Disponível em: < https://bdm.ufmt.br/handle/1/927> Acesso em: 20 mai. 2022.

VELLIANGIRI, S.; ALAGUMUTHUKRISHNAN, S.; JOSEPH, S. I. T. 2019. A review of dimensionality reduction techniques for efficient computation. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920300879> Acesso em: 20 mai. 2022.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, 131(1-2), 59-75.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; ADAMCHUK, V. I.; SUDDUTH, K. A.; McKENZIE, N. J.; LOBSEY, C. 2011. Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time. In Advances in agronomy (Vol. 113, pp. 243-291). Academic Press.