

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**DENSIDADES AMOSTRAIS COMBINADAS COM PONTOS  
ADICIONAIS NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS  
QUÍMICOS DO SOLO**

**Pedro José de Souza Comparin**

**DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2023**

**DENSIDADES AMOSTRAIS COMBINADAS COM PONTOS ADICIONAIS  
NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO**

Pedro José de Souza Comparin  
Engenheiro Agrônomo

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez  
CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Elisangela Dupas

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre.

Dourados  
Mato Grosso do Sul  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C737d Comparin, Pedro José De Souza

Densidades amostrais combinadas com pontos adicionais na variabilidade espacial de atributos químicos do solo [recurso eletrônico] / Pedro José De Souza Comparin. -- 2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Jorge Wilson Cortez.

Coorientadora: Elisângela Dupas.

Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Geoestatística. 2. Fertilidade do solo. 3. Agricultura de Precisão. I. Cortez, Jorge Wilson. II. Dupas, Elisângela. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

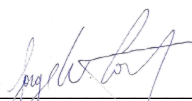
**DENSIDADES AMOSTRAIS COMBINADAS COM PONTOS ADICIONAIS  
NA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO**

por


Pedro José de Souza Comparin

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título  
de MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovado em: 24/02/2023

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez  
Orientador – UFGD/FCA

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Silvia Correa Santos  
UFGD/FCA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eber Augusto Ferreira do Prado  
IFMS – Ponta Porã

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus,

À minha esposa Mariluci Costa Comparim

Ao meu orientador Dr. Jorge Wilson Cortez

A meu pai, Ivair Luiz Comparim

À minha mãe, Cláudia Cristiane de Souza Comparim

Às minhas irmãs, Isabela de Souza Comparim Viana e Isadora Comparim Scaffa

## **DEDICO**

À minha filha, Violeta Costa Comparim

## **OFEREÇO**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

A Instituição Fundação Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

## **AGRADEÇO**

## BIOGRAFIA DO AUTOR

**PEDRO JOSÉ DE SOUZA COMPARIN** – nascido no município de Dourados – MS, no dia 10 de fevereiro de 1996, cursou ensino fundamental no colégio “o Italianinho” no município de Maracaju – MS. Cursou o primeiro e segundo ano do ensino médio no colégio “Alexander Fleming” e o terceiro ano no colégio “Nota 10”, ambas localizadas no município de Campo Grande – MS, no período de 2011 a 2013. Em 2014, ingressou na Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), para o curso de Agronomia (Bacharelado). Durante o andamento do curso, participou por 2 anos e meio como bolsista do programa de educação tutorial (PET – Agronomia). Participou também do grupo de iniciação científica no laboratório de microbiologia e fitopatologia agrícola. Participou também do projeto de iniciação científica voluntária (PIVIC) da UFGD. Participou ainda como trainee na área de projetos da Terra Fértil, empresa júnior durante a graduação. Após o término da graduação trabalhou como assistente técnico na produção vegetal de produtores rurais, foi credenciado ao Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e atuou em projetos de georreferenciamento de imóveis rurais. Ingressou em 2021 no programa de pós-graduação de agronomia da UFGD (PPGAGRO), mestrado, como bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), participou do Grupo de Pesquisa em Agricultura de Precisão e Mecanização e auxiliou como colaborador nos cursos de extensão intitulado: “Curso de QGIS para Agricultura de Precisão”.

# SUMÁRIO

PÁGINA

RESUMO.....	vi
i	
ABSTRACT.....	vii
ii	
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Agricultura de precisão (AP).....	3
2.1.1 Conceitos de AP.....	3
2.1.2 Amostragem georreferenciada de solo.....	4
2.1.3 Sensoriamento remoto e estratégia de amostragem de solo.....	6
2.2 Atributos químicos.....	7
2.2.1 Acidez do solo e sua correção.....	7
2.2.2 Potássio.....	9
2.2.3 Fósforo.....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Local.....	12
3.4 Equipamentos e insumos.....	15
3.5 Avaliações.....	17
3.5.1 Atributos químicos.....	17
3.5.2 Recomendações.....	17
3.5.3 Índice de vegetação.....	18
3.6 Análise dos dados.....	19
3.6.1 Descritiva e geoestatística.....	19
3.6.2 Coeficiente de desvio relativo.....	20
3.6.3 Coeficiente Kappa.....	21
3.6.4 NDVI e correlação de Pearson.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
4.1 Fósforo (P).....	23
4.2 Potássio (k).....	26
4.3 Saturação por bases (V).....	29
4.4 CTC.....	33
4.5 Recomendações.....	36
4.5.1 Calcário.....	36
4.5.2 Fósforo.....	38
4.6 NDVI da cultura da soja e correlações.....	40
5 CONCLUSÕES.....	44
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

COMPARIN, P. J. S. **Densidades amostrais combinadas com pontos adicionais na variabilidade espacial de atributos químicos do solo**. 51f. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados-MS.

## RESUMO

A agricultura de precisão compreende ferramentas e tecnologias para o uso racional de insumos agrícolas. Para avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, como CTC (capacidade de troca de cátions), V% (saturação por bases), teores de K (potássio) e P (fósforo) são utilizadas a técnica de amostragem georreferenciada de solo guiada por produtos do sensoriamento remoto, como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) que possui relação dependência com a produtividade das culturas da soja e do milho. avaliar malhas amostrais regulares e a alocação de pontos adicionais de coleta baseados nas regiões de transições dos mapas de NDVI da cultura anterior na determinação da variabilidade espacial de atributos, fósforo, potássio, capacidade de troca de cátions e a saturação por bases, além das recomendações de adubação e correção e sua correlação com o NDVI da soja na safra anterior. O experimento foi realizado no talhão de 224 ha de uma fazenda comercial localizada no município de Maracaju – MS, Latossolo Vermelho Distroférico (Lvdf). Os arranjos amostrais foram gerados por uma grade regular de uma amostra por hectare (1:1), com adição de até 50% de pontos adicionais alocados pelo mapa de NDVI, compondo assim 336 pontos amostrais e as demais grades foram compostas pela retirada de 10% dos pontos adicionais até 0% e da mesma forma para a grade de 1 amostra a cada 4 hectares (1:4). Foram avaliados os teores de P, K, CTC e V (%) submetidos a estatística descritiva, geoestatística, krigagem ordinária, avaliação dos mapas pelos coeficientes de desvio relativo (CRD) e Kappa. Também foi avaliado o NDVI da cultura da soja de 2021/2022 com base nas imagens disponíveis do satélite Sentinel 2 e sua correlação com os atributos do solo. O P mesmo com valores adequados a altos na área permite separar grades de diferentes intensidades amostrais, sendo as grades mais adensadas adequadas para avaliação da variabilidade deste atributo. Verifica-se que as grades com uma amostra por hectare já se conseguem resultados satisfatórios, mas com 30% de pontos adicionais ocorre a melhor representação da variabilidade. O K apresentou valores elevados na área toda, o que fez com que não fosse possível distinguir as grades amostrais. Para a CTC as grades amostrais estudadas foram equivalentes na estimativa da variabilidade espacial. V% teve melhor identificação da variabilidade espacial com o uso das grades de no mínimo 1:1. Para fins de recomendação de calcário as grades com uma amostra por hectare (1:1) são mais eficientes em representar a variabilidade do que as de uma amostra para 4 ha (1:4) e à medida que aumenta a quantidade de pontos adicionais melhora a estimativa na grade 1:1. A correlação entre o P e o NDVI é muito fraca, fraca com o K e moderada com a CTC e V%.

**Palavras-chave:** geoestatística, fertilidade do solo, agricultura de precisão



COMPARIN, P. J. S. **Sampling densities handled with additional points of the spatial variability of soil chemical attributes**. 51f. 2023. Dissertation (MSc in Agricultural Engineering), Federal University of Grande Dourados, Dourados-MS.

### ABSTRACT

Precision agriculture comprises tools and technologies for the rational use of agricultural inputs. In order to evaluate the spatial variability of soil fertility attributes, such as CEC (cation exchange capacity), V% (base saturation), K (potassium) and P (phosphorus), the georeferenced soil sampling technique guided by remote sensing products, such as NDVI, which has a dependence relationship with the productivity of soybean and corn crops. Thus, the goal was to evaluate regular sampling meshes and the allocation of additional collection points based on the transition regions of the NDVI maps of the previous culture in determining the spatial variability of attributes, phosphorus, potassium, cation exchange capacity and base saturation, in addition to the recommendations of fertilization and correction and its correlation with the soybean NDVI in the previous harvest. The experiment was carried out in a plot of 224 ha of a commercial farm located in the city of Maracaju - MS, the soil was oxissol. The sampling arrangements were generated by a regular grid of one sample per hectare (1:1), with the addition of up to 50% of additional points allocated by the NDVI map, thus composing 336 sample points and the other grids were composed by the withdrawal of 10 % of additional points up to 0% and likewise for the grid of 1 sample every 4 hectares (1:4). P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), K ( $\text{Cmolc dm}^{-3}$ ), CEC ( $\text{Cmolc dm}^{-3}$ ) and V (%) were evaluated, submitted to descriptive statistics, geostatistics, ordinary kriging, evaluation of maps by relative deviation coefficients (CRD) and kappa. The NDVI of the 2021/2022 soybean crop was also evaluated based on available images from the Sentinel 2 satellite and its correlation with soil attributes. Phosphorus (P) even with appropriate to high values in the area allows separating grids of different sampling intensities, with denser grids suitable for assessing the variability of this attribute. It appears that the grids with a sample per hectare already achieve satisfactory results, but with 30% of additional points the best representation of the variability occurs. Potassium (K) showed high values in the whole area, which made it impossible to distinguish the sample grids. For CEC, the sample grids studied were equivalent in estimating spatial variability. Base saturation (V%) had better identification of spatial variability with the use of grids of at least 1:1 (one sample per hectare). For limestone recommendation purposes, the grids with a sample per hectare (1:1) are more efficient in representing the variability than those with a sample for 4 ha (1:4) and the measure that increases the number of additional points improves the estimate in the 1:1 grid. The correlation between P and NDVI is very weak, weak with K and moderate with CEC and V%.

**Keywords:** geostatistic, soil fertility, precision agriculture

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) abrange o estudo da variabilidade espacial e temporal dos recursos agrícolas, a fim de otimizá-los quanto ao seu uso para integrar as bases da sustentabilidade.

Uma das ferramentas preponderantes na AP é a amostragem georreferenciada de solo. Esta técnica permite o estudo do comportamento dos atributos do solo a fim de conhecer e delimitar sua variabilidade espacial. Esta por sua vez, imprescindível para a aplicação assertiva no planejamento dos programas de correção e adubação para a produção vegetal.

Para determinar a variabilidade espacial dos atributos químicos, podem ser utilizadas algumas ferramentas e estratégias. A amostragem georreferenciada de solo, a qual pode ser realizada tanto em grades como células, constitui um ramo de estratégias. Pois a amostragem em célula permite um menor dispêndio operacional e financeiro, todavia não permite aplicar uma ferramenta de interpolação, e, portanto, não conhecer intrinsecamente a distribuição espacial do atributo.

Todavia, há a possibilidade de escolher o método de amostragem em grade. Este método, já permite o estudo prévio da continuidade espacial do atributo e posterior escolha do método de interpolação. O qual, se escolhido, o método interpolador geoestatístico como a Krigagem, permite o melhor conhecimento e tomada de decisão para realizar as intervenções como, se necessário, a prática de correção de solo, como a calagem, bem como a própria recomendação de adubação do elemento no sistema de produção, no caso, sucessão de culturas soja-milho.

A fim de executar com maior assertividade a amostragem georreferenciada, procura-se utilizar tecnologias auxiliares como o sensoriamento remoto, tendo os índices de vegetação para auxiliar o planejamento da amostragem de solo. Os índices de vegetação possuem relação de dependência com a produtividade de culturas cultivadas, como milho e podem ser utilizados para prever os possíveis locais de maior variabilidade espacial dos atributos químicos do solo.

Com a análise da variabilidade espacial procura-se interpretar a fertilidade do solo, tendo como atributos básicos a capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). Estes atributos compõem a recomendação de intervenção de correção da

acidez do solo, fundamentais para a classe de solo, latossolos. Além destes, os macronutrientes presentes em grandes quantidades nos programas de adubação como o fósforo (P) e o potássio (K).

Assim, a fim de que se possa atingir satisfatório planejamento de correção e adubação do solo e o conhecimento da distribuição espacial de seus atributos. Objetivou-se avaliar malhas amostrais regulares e a alocação de pontos adicionais de coleta baseados nas regiões de transições dos mapas de NDVI da cultura anterior na determinação da variabilidade espacial de atributos, fósforo, potássio, capacidade de troca de cátions e a saturação por bases, além das recomendações de adubação e correção e sua correlação com o NDVI da soja na safra anterior.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Agricultura de precisão (AP)**

#### **2.1.1 Conceitos de AP**

O termo agricultura de precisão (AP) possui algumas definições e conceitos. Assim, este pode ser definido como um sistema de gerenciamento agrícola com base na variação espacial e temporal com objetivo do retorno econômico, sustentabilidade, dentre outros. Este gerenciamento é realizado com ferramentas e tecnologias de AP que por sua vez permitem o uso racional dos insumos agrícolas objetivando detectar, monitorar e manejar a variabilidade temporal e espacial dos sistemas agropecuários (MAPA, 2017).

Já a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (Combap, 2013) define a AP da seguinte maneira como:

“Trata-se de um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico e à redução do impacto ao ambiente”.

A agricultura assim como outras atividades econômicas estão em constante evolução. Disserte o fato acima, esta evolução contínua, especificamente do setor agrícola é sustentada por aprimoramento concomitante de outras ciências tais como os sistemas de informações geográficas (SIGs) bem como o sistema de posicionamento global. Estas dentre outras ciências fornecem um alicerce de conhecimento para a agricultura. Seus conceitos partem da premissa em tratar o sistema de produção como não homogêneo, levando assim a gerenciamento dos recursos utilizados (TSCHIEDEL e FERREIRA, 2002).

Portanto, a fim de realizar as investigações da AP, obedece-se a uma sequência cíclica de ações. Este método, comumente denominado o ciclo da AP, o qual inicia-se pela investigação da variabilidade das informações obtidas do solo e ou das plantas cultivadas, analisar e interpretar tais dados com auxílio das ferramentas e tecnologias como o SIG e os sistemas de posicionamento global, realizar uma intervenção

como as aplicações de insumos a taxa variada. Assim, por seguinte este ciclo se reinicia e ocorre sucessivamente (MOLIN et al, 2015).

### **2.1.2 Amostragem georreferenciada de solo**

O conhecimento da variabilidade de um atributo químico do solo pode ser inferido por amostragem. Segundo Guarçoni et al. (2006), uma população é a união de indivíduos, os quais compartilham ao menos uma característica em comum. Assim como, a amostra representa parte dessa população, representando-a como um subconjunto.

Dentro do âmbito do ciclo de AP, a obtenção de informações dos atributos químicos do solo pode ocorrer em algumas metodologias de amostragem. Desta forma para detectar a variabilidade espacial de um atributo, a assertiva caracterização do tamanho e a forma dos pontos amostrais se fazem necessários. Segundo Guedes et al. (2015), a forma e o tamanho amostral inferem diretamente na predição dessa variabilidade. Pois, direcionam os modelos teóricos de interpolação dos locais não-amostrados e sucessivamente a estrutura da dependência espacial, etapa da interpretação e análise de dados e por fim na construção dos mapas temáticos com a etapa de intervenção da AP.

Uma estratégia de amostragem do solo que pode ser realizada é a denominada amostragem em célula. Este método consiste em representar a área a ser estudada não mais em pontos localizados espacialmente conhecidos, mas sim a área total da célula a qual representaria a média desta. Este método representa uma alternativa ao produtor quando do método tradicional resulta em grande número de amostras, acarretando um dispêndio financeiro e operacional mais elevado. (MOLIN et al., 2015)

Valente et al. (2018) estudando eficiência de amostragem de grade para caracterização do potássio no solo estudaram 3 diferentes estratégias de amostragem. A primeira, sendo grade regular 1:1, ou seja, uma amostra por hectare, grade regular 1:4, ou seja, uma amostra a cada 4 hectares e a terceira foi amostragem por célula a cada 4 hectares. Concluíram que grades pouco densas como 1:4, o mais adequado seria realizar a amostragem por célula.

A amostragem de solo por grade consiste em uma outra modalidade de estratégia. Dessa maneira essa estratégia se define, através de amostragem, o estudo da variabilidade espacial do elemento a ser estudado, (LOPES et al., 2020). Segundo

Cherubim et al. (2015), quando se deseja avaliar a qualidade de um estudo da distribuição espacial de atributos do solo, deve-se definir uma grade amostral adequada.

A amostragem de solo por grade consiste em uma outra modalidade de estratégia. Essa maneira, segundo Grego et al (2014) os locais não amostrados são determinados a partir dos pontos amostrados com uso da ferramenta de interpolação como ocorre com os interpoladores geoestatísticos. Dentre os interpoladores utilizados, tem como exemplo a Krigagem ordinária que consiste em um método de interpolação cuja finalidade é estimar os locais não amostrados com base nos pontos conhecidos, utilizando a dependência espacial dentre as amostras, as quais são estimadas pela validação dos variogramas que correlaciona o a variância dentre os locais conhecidos com a distância física dentre eles. (MOTOMIYA et al., 2006)

Segue o modelo teórico do variograma (Ferraz et al., 2017)

$$\gamma(h) = 1. ([2.N(h)].[Z(x_i) - Z.(x_i + h)]^2)^{-1} \quad (1)$$

Segundo Ferraz et al (2017), a equação 1 traz consigo suas definições. O N (h) representa o número de pares experimentais de observações, representado pelo símbolo Z (x<sub>i</sub>) do seu par Z (x<sub>i</sub> + h), separados pelo vetor h dos pontos georreferenciados (x<sub>i</sub>), são os dados em si da variável analisada e o  $\gamma(h)$  representa a variância no eixo Y enquanto h representa os valores de distância no eixo x. A partir desses elementos são realizados os modelos existentes contribuindo para surgir os parâmetros: Efeito pepita (C<sub>0</sub>), Alcance (A) e Patamar (C<sub>1</sub>).

Os parâmetros determinados pelo variograma são ferramentas essenciais para o planejamento amostral. Sendo assim, o efeito pepita (C<sub>0</sub>), representa através do modelo teórico acima, o ponto o qual o modelo intercepta o eixo Y representado pela variância  $\gamma(h)$ . Este ponto indica a variabilidade não explicada, aquela que intrínseca a variável que se deseja determinar.

Enquanto o alcance (A) representa o ponto o qual a variabilidade da variável em questão não se correlaciona mais com o vetor h de outro ponto conhecido. Lemos Filho et al (2008) descreve como a distância a partir da qual não há mais continuidade espacial e os dados passam a se comportarem de maneira aleatória. E ainda servir de parâmetro indicativo para os intervalos de amostragem.

Segundo Molin et al (2015), o alcance representa o grau de homogeneização de determinada variável em estudo. Desta maneira, a distância mínima para entre amostras deve ser igual ou inferior a metade do alcance. Sendo esta condição, claramente,

quando se tem a análise geoestatística prévia do local de estudo para então conduzir um planejamento amostral.

Assim, para realizar o propositivo planejamento de uma amostragem georreferenciada de solo há algumas estratégias. Destaca-se a utilização de uma grade regular, a qual os pontos amostrais são distribuídos de maneira uniformemente igual em função de uma densidade de amostragem. Cherubim et al. (2015) avaliaram diferentes malhas amostrais para caracterização da dependência espacial e seus parâmetros de acurácia para os teores de fósforo (P) e potássio (K), para Latossolos, e concluíram que grades amostrais menores que 100 m são eficientes para a modelagem desses atributos químicos do solo.

Morato et al (2021), com pesquisas em um local com 3 classes de solos diferentes obtiveram resultados diferentes. Estes autores desenvolveram a pesquisa com malhas regulares de 200 m, ou seja, 1 amostra a cada 4 hectares, e após realizarem o corte dos *outliers* identificaram o K com alcance de 1.207 m e a CTC com alcance de 396,57 m.

Amado et al (2009), avaliando atributos químicos do solo, de classe de Latossolos, em dois campos experimentais, em grade 1:1 obtiveram resultados diferentes. Em seus resultados nota-se como destaque, quanto a estatística descritiva, o parâmetro do coeficiente de variação, que se apresentou na magnitude de 62,2 % no campo, no município de Trindade do Sul. Quanto aos parâmetros geoestatísticos, no campo de Trindade do Sul (TS), o alcance de P foi de 102 m e no campo de Palmeiras das Missões (PM), obtiveram alcance de 255 m. Enquanto o alcance para K no TS foi de 416 m e no campo de PM foi de 408 m.

### **2.1.3 Sensoriamento remoto como ferramenta estratégia de amostragem de solo**

O sensoriamento remoto é uma das tecnologias utilizadas na AP. Esta ferramenta pode ser definida como a obtenção de dados de um alvo sem que haja necessidade de um contato físico direto. Deste modo, essa tecnologia evoluiu para certas combinações matemáticas dentre dados de reflectância dos alvos a partir de diferentes bandas espectrais que culminaram na formação dos índices de vegetação (IV) (SHIRATSUCHI et al., 2014).

Deste modo, os IVs conhecidos do sensoriamento remoto destacam-se para seu uso na inferência de comportamento dos alvos estudados. Assim, como é o caso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o qual é composto por uma razão da soma pela diferença dentre dados de dois espectros de reflectâncias das ondas eletromagnéticas (VIAN et al., 2018).

O NDVI resulta em um valor de escala de -1 a 1. Estes valores adimensionais, aos quais se resultam no índice no respectivo interim representa o grau de vigor expresso pela vegetação. Os valores maiores do NDVI, são por consequência o gradiente dentre a reflectância do infravermelho com o vermelho, indicando, portanto, maior quantidade de clorofila e matéria seca e, portanto, maior o potencial produtivo da planta (RISSINI et al., 2015).

Este IV pode ser relacionado com fatores de produção. Segundo Trindade et al. (2019), avaliando o NDVI na cultura da soja observaram que o NDVI correlacionou com a produtividade, quando este obtido no estágio fenológico R2. Assim como Bolton e Friedl (2013) observaram correlação alta ( $r^2 = 0,69$ ) do NDVI com produtividade para cultura do milho (*Zea mays*).

Segundo Zanzarini et al. (2013), houve correlação espacial envolvendo NDVI e atributo químico como o fósforo e o atributo granulométrico como argila. Enquanto Santos et al. (2021), apresentaram correlação significativamente positiva dentre a saturação de bases V% e NDVI.

Molin et al. (2015) recomenda como estratégia de planejamento amostral fazer a alocação de 30% de pontos adicionais na malha regular planejada. Segundo os autores esta recomendação aliada ao posicionamento randômico dos pontos amostrais a malha pode caracterizar uma eficiente estratégia na determinação da variabilidade do atributo estudado.

## **2.2 Atributos químicos do solo**

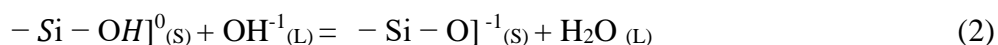
### **2.2.1 Acidez do solo e sua correção**

Nos solos da classe Latossolos, a limitação do cultivo das grandes culturas deve-se a muito pelas condições de acidez do solo, predominando o desequilíbrio de alguns elementos essenciais à produção de plantas. Disto decorre pelas cargas do solo



estarem ocupadas mais intensamente por íons hidrogênio  $H^+$  e  $Al^{3+}$  a fim de manter a neutralidade (RAIJ et al., 1991).

A existência de cargas no solo é proveniente de alguns mecanismos. Primeiramente, relacionado a origem e formação do solo, as cargas permanentes ou ditas independentes de pH. Há então a situação que as cargas são geradas pelo processo de protonação e desprotonação dos coloides orgânicos e inorgânicos as quais são denominadas cargas variáveis ou também dependentes de pH. Cabe ressaltar que em solos tropicais como é o caso dos Latossolos, há presença majoritária de coloides cargas dependentes de pH, tornando-o como parâmetro fundamental para a dinâmica de cargas no solo bem como a presença da matéria orgânica do solo (MOS) como destaque de suprimento dos coloides orgânicos. (BATISTA et al., 2018). Segue um exemplo da formação de cargas negativas pela elevação do pH segundo mesmos autores

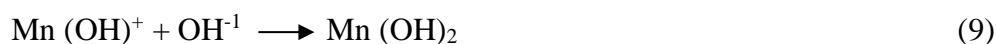


Para corrigir esta situação limitante para o desenvolvimento das culturas, pode-se aplicar métodos de correção do solo. Um método eficiente é denominado calagem, o qual consiste na aplicação de calcário a fim de corrigir a acidez do solo e ainda fornecer elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas como  $Mg^{+2}$  e  $Ca^{+2}$ . (CORRÊA et al., 2008).

As reações do calcário no solo são descritas por (SOUSA et al., 2007)



(3)



Essas reações, 2 e 3 demonstram a correção da acidez pela neutralização do  $H^+$ . O ânion  $CO_3^{-1}$  como base forte conduz a hidrólise da água e formação do íon  $OH^{-1}$ , o qual vai neutralizar a acidez ativa do solo ( $H^+$ ). As reações 5, 6 e 7 demonstram o efeito da calagem na precipitação do alumínio e as reações 8 e 9 a precipitação do Manganês tóxico. (SOUSA et al., 2007)

Tissi et al (2004) conduziram experimento para avaliar o efeito da calagem na semeadura da cultura do milho (*Zea mays*). Este experimento foi conduzido em solo

de classe Latossolo vermelho distroférico, em sistema de rotação de culturas. Foi concluído que além de aumentar a absorção de P, Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) pela cultura do milho houve redução dos teores de H + Al e de Al trocável.

Menezes et al. (2019), estudando métodos para estimativas de necessidade de calagem, concluíram que o método de saturação por bases foi o que melhor estimou. Este método consiste em relacionar a diferença da saturação de bases ( $V_1$ ) de referência, saturação de bases ( $V_2$ ) do solo estudado e a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (SOUZA e LOBATO, 2004).

Ragagnin et al (2010) estudaram a diferença de recomendações de calcário em 3 situações de densidade de amostragem. 157, 76 e 38 amostras. Os autores concluíram que a redução da densidade de amostragem reduziu a quantidade total do corretivo a ser aplicado, porém os autores consideraram ainda viável as amostragens menos densas a fim de diluir custos.

Enquanto que Oliveira et al (2008), estudaram a comparação dentre os métodos de amostragem de solo para calagem e adubação na cultura do café (*Coffea canéfora*). O experimento desenvolvido sob solo Latossolo vermelho distroférico, foram coletados 109 pontos em 1 há. Os autores concluíram que dentre os atributos químicos, P e K representaram os menores alcances. Com relação a calagem, o método de amostragem georreferenciada conseguiu detectar zonas de déficit e excesso de calagem, as quais não seriam possíveis pelos métodos convencionais de amostragem de solo.

### 2.2.2 Potássio

O K, é um dos nutrientes que as plantas necessitam em grande quantidade. Em se tratando de escala seu requerimento é o segundo na escala, estando atrás somente do nitrogênio (N). O exemplo na cultura da Soja (*Glycine max*), para cada 1000 kg de grãos produzidos são exportados 20 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (CAVALINI et al., 2018).

O potássio participa de diversos processos metabólicos das plantas, pode-se destacar é o efeito direto de sua deficiência no processo metabólico da fotossíntese, diminuindo a produção de fotoassimilados e elevando a respiração. Este processo acarreta num déficit energético ocasionando danos ao crescimento e consequente produção da planta, (DECHEN e NACHTIGALL, 2007). Segundo Pinheiro et al. (2011), o potássio auxilia na a recuperação dos tecidos colonizados por patógenos biotróficos, como o caso da *Phakopsora pachyrhizi*, agente causal da ferrugem asiática da soja.

Este elemento (K), diferentemente do fósforo, destaca-se na relação do solo por apresentar-se em forma iônica eletropositiva. Assim, sua forma trocável, monovalente ( $K^+$ ) pode interagir com coloides do solo na forma de adsorção (ERNANI et al., 2007). O potássio, quanto ao seu transporte no solo, pode ser realizado tanto por fluxo de massa, onde o movimento ocorre em favor do gradiente de potencial hídrico formado pelo processo de absorção de água pelas plantas. Porém o processo majoritário no transporte de K ocorre pelo processo de difusão (OLIVEIRA et al., 2004).

Oliveira et al (2004) avaliaram o efeito do transporte de K na disponibilidade de nutrientes para cultura do algodão (*Gossypium L.*). Os autores concluíram que o mecanismo da difusão foi responsável pela faixa de 72 a 96%, na absorção de K. Concluíram ainda que a água quando presente em maior quantidade na solução do solo contribuiu para o favorecimento do mecanismo de transporte de difusão enquanto em regiões mais secas houve favorecimento do mecanismo do fluxo de massa.

Dessa maneira, diante de informações dos principais elementos para cultivo de plantas, busca-se por determinar um eficiente programa de adubação. Assim como a metodologia clássica assepte no essencial conhecimento dos teores desses elementos presentes no solo. pois se considerado em nível inferior a um determinado protocolo prevê adubação de correção para posterior adubação de manutenção. Segundo Lange et al. (2019), no sistema de sucessão milho-soja, a adubação potássica na cultura de soja interfere na exportação de nutrientes da cultura de milho.

### 2.2.3 Fósforo

O Fósforo (P) é um dos elementos presentes no solo. Sua importância se deve pela sua essencialidade a nutrição mineral das plantas, de modo que os teores desse elemento na planta podem variar de 0,5 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> de matéria seca, porém a faixa de equilíbrio situa-se de 1,0 a 1,5 g kg<sup>-1</sup>. A sua dinâmica no solo apresenta-se em certa complexidade quantos as suas formas químicas e interações químicas com as partículas presentes no solo (VINHA et al., 2021); (DECHEN e NACHTIGALL, 2007).

Quanto ao fornecimento deste elemento na agricultura, torna-se uma variável problemática. Disto decorre, segundo Oliveira et al (2021), do seu suprimento oriundo de fontes solúveis de rochas fosfáticas. Sendo esta fonte finita, seu uso racional remonta um dos pilares do conceito de AP, quanto ao gerenciamento racional dos recursos naturais.

O solo pode ser uma fonte e/ou dreno de fósforo. Esta afirmação explana-se pelo justo fato do comportamento químico deste elemento no solo. Desta maneira quanto mais intemperizado o solo torna-se quimicamente mais eletropositivo levando a tendência de ocorrer os processos denominados adsorção e posterior fixação do fósforo ao solo (MATOS et al., 2017).

Este processo de fixação do P, é resultado da formação do P Não-Lábil.

Esse processo decorre principalmente pela presença dos oxí-hidróxidos de ferro e alumínio. Isso ocorre devido ao aumento da capacidade de adsorção de ânions principalmente pela presença dos minerais intemperizados de ferro e alumínio. Neste cenário, perpetua-se em grande parte na classe de solos dos Latossolos, Novais e Smith (1999) citam que os Latossolos localizados no bioma do cerrado brasileiro podem adsorver um montante de  $2 \text{ mg g}^{-1}$  de P, equivalendo em outras unidades a  $9.200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (NOVAIS et al., 2019).

Desta maneira, esse elemento tem alto potencial de se tornar não disponível às plantas. Esse fator se deve pela difusão ser um dos principais mecanismos de transporte desse elemento no solo. Ainda sendo que sua movimentação no solo é relativamente mais lenta quando comparado a outros elementos, e é explicado pela elevada sorção do mesmo com os colóides do solo. Assim constituindo um problema a ser enfrentado na adubação das plantas cultivadas (COSTA et al., 2006).

Araujo et al. (2003) estudaram o comportamento do fósforo no solo. Os autores elucidaram que há a presença de duas regiões distintas na solução do solo. Onda, na solução móvel os solutos são transportados por fluxo de massa, enquanto na solução dita imóvel, o transporta dá-se por difusão. Os autores ainda acrescentam que nos Latossolos, a solução imóvel está presente no espaço intra-agregado, e estando retida uma maior energia, torna-se menos disponível á nutrição das plantas.

Silva et al (2015) estudaram a influência da compactação no fluxo difusivo do P e Zinco (Zn) em Latossolos. Os autores concluíram que sob efeito da compactação houve um aumento do fluxo difusivo do P, todavia, em solos com textura com maior presença de argila, houve uma maior limitação da difusão de P devido aos processos adsortivos relacionados a argila.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local

O experimento foi desenvolvido em um talhão de 224 ha localizada no município de Maracaju na região centro-oeste do Brasil e centro norte do Mato Grosso do Sul. Esta região localiza-se na latitude 21° 42' 59" de Sul e longitude 55° 31' 36" de Oeste, com altitude média de 533 m, com valores variando entre 509 à 545 m (Figura 1) e apresentando declividade média de 1,33%.

Este talhão, é oriundo de uma fazenda comercial denominada Fazenda Nossa Senhora Consoladora II, onde há desde 1996 o sistema de produção de sucessão de culturas, o qual a cultura da soja é cultivada no periodo de outubro a fevereiro, enquanto a cultura do milho é cultivada no período de fevereiro a agosto.

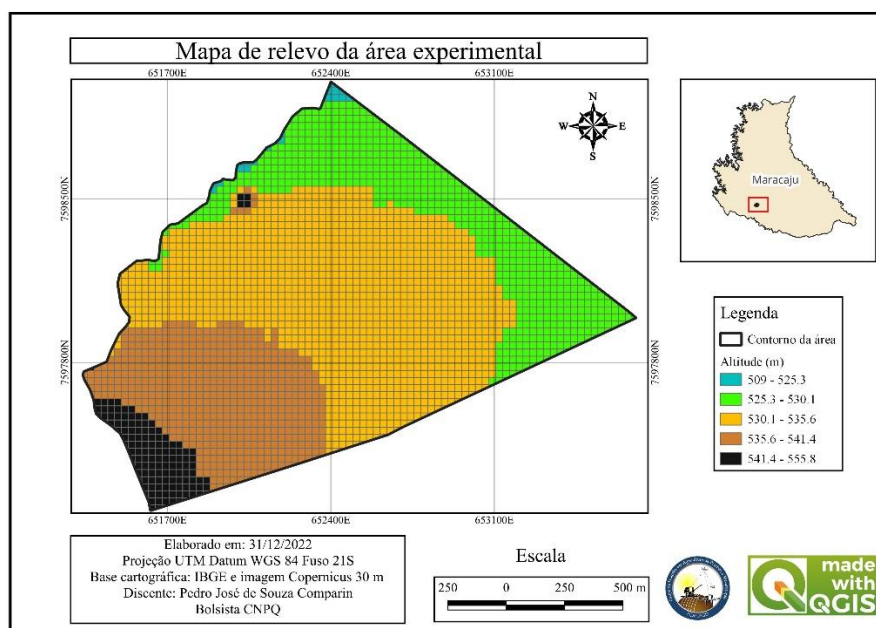
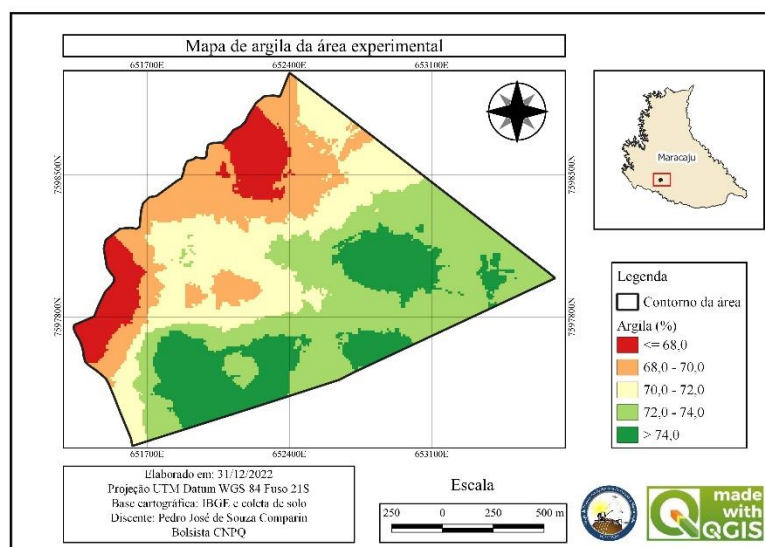
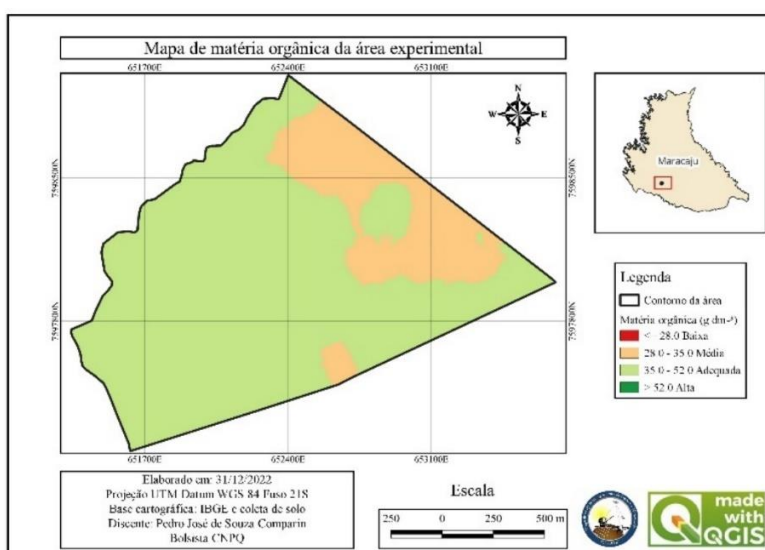


FIGURA 1. Mapa temático da localização da pesquisa e a altitude da área.

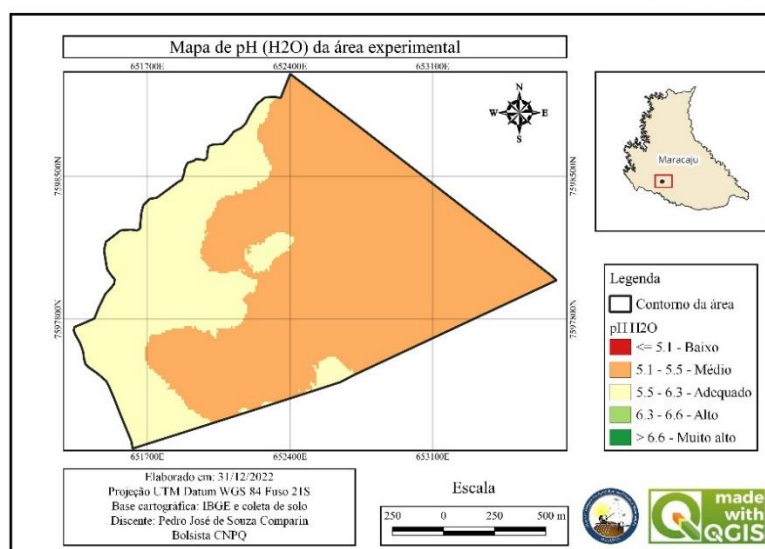
O experimento foi instalado num ambiente de solo classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) conforme classificação de Santos et al. (2018). Que possui teor médio de argila de 72%, com valores variando entre 65 e 76%, conforme Figura 2a.



a



b



c

FIGURA 2. Mapa temático da localização da pesquisa e a distribuição da argila (a), matéria orgânica (b) e pH (c) (SOUSA e LOBATO, 2004).

O clima do local segundo a classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE) é clima tropical subsequente em área de transição com clima tropical quente (IBGE, 2006).

### 3.2 Esquema amostral

A alocação dos pontos amostrais deu-se pela estratégia guiada pelo índice de vegetação NDVI da cultura anterior, o milho.

As imagens foram obtidas do satélite Sentinel 2, sendo baixado o produto L2A do dia 13 de abril de 2021, com resolução espacial de 10 m. Esta data foi escolhida por ser o produto imediatamente anterior disponível em que não houvesse a saturação pela cultura do milho. O NDVI foi calculado, utilizando as ferramentas de geoprocessamento do software de SIG, QGIS versão 3.22.11 (QGIS, 2022). Em seu cálculo foram utilizados valores do sensor na Banda 4 que representa a reflectância do vermelho ( $P_v$ ) no comprimento de onda de 664,6 nm e a banda 8 que fornece dados da refletância no infravermelho ( $P_{iv}$ ) no comprimento de onda de 832,8 nm (SENTINEL, 2022). Foi calculado o NDVI conforme Bezerra et al., (2018):

$$NDVI = ((P_{iv} - P_v) / (P_{iv} + P_v)) \quad (10)$$

Onde:

$P_{iv}$  é a faixa de reflectância na região do infravermelho próximo e

$P_v$  da região do vermelho.

O resultado do NDVI pode ser visto na FIGURA 3.

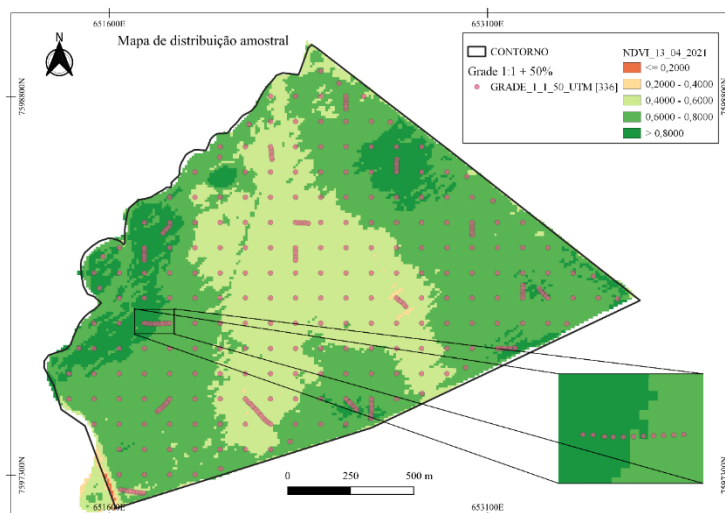


FIGURA 3. Mapa temático de NDVI do dia 13 de abril de 2021, na cultura do milho para alocação dos pontos adicionais.

O planejamento amostral baseado no NDVI do milho foi realizado com uma aplicação de grade amostral regular com a maior densidade amostral, 1:1, ou seja, 1 amostra para 1 hectare combinada com 50% de pontos adicionais a maior porcentagem de pontos adicionais, findando então em 336 amostras de solo georreferenciadas. Sendo 224 pontos oriundos da grade regular e 112 oriundos da grade de pontos adicionais (Figura 4). As demais grades com as variações de pontos adicionais estão dispostas nas Figuras 5 (grade 1:1) e 6 (grade 1:4) e no Quadro 1 com o quantitativo de pontos em cada grade estudada.

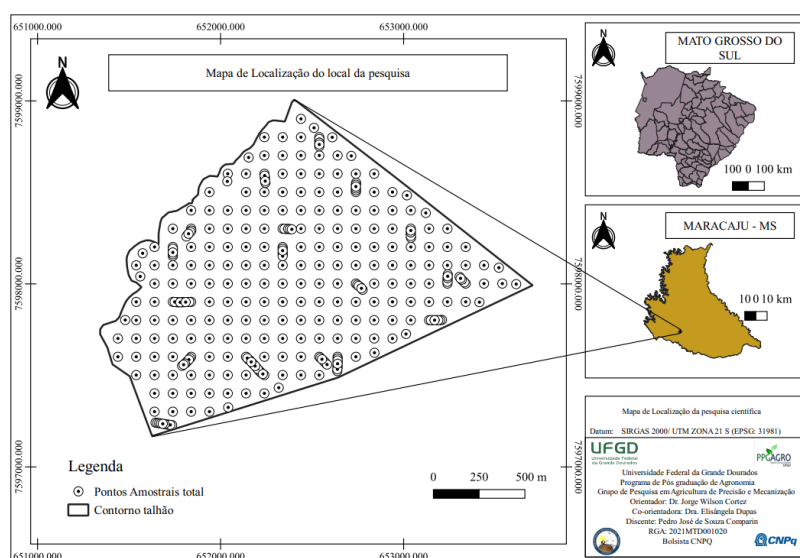


FIGURA 4. Mapa temático da localização da pesquisa com os pontos amostrais adicionados.

QUADRO 1. Quantitativos de pontos nas grades amostrais.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Regular + adicionais	224+112	224+89	224+58	224+44	224+23	224
<b>Total</b>	<b>336</b>	<b>313</b>	<b>282</b>	<b>268</b>	<b>247</b>	<b>224</b>
	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Regular + adicionais	56+28	56+21	56+16	56+11	56+6	56
<b>Total</b>	<b>86</b>	<b>77</b>	<b>72</b>	<b>66</b>	<b>62</b>	<b>56</b>



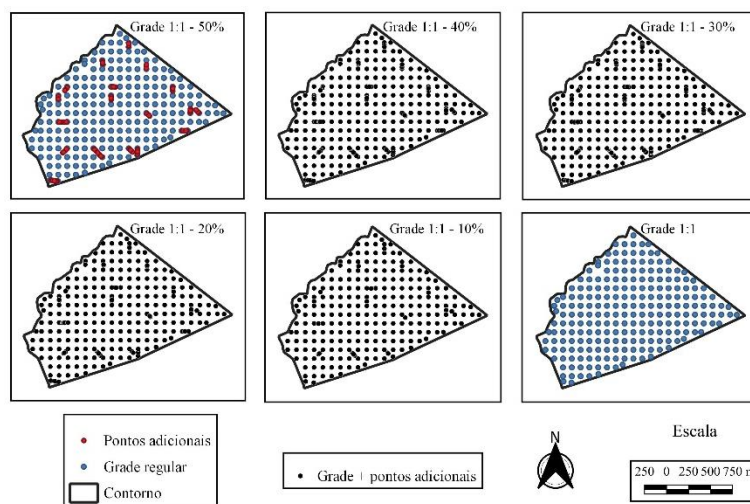


FIGURA 5. Grade 1:1 com pontos amostrais adicionados.

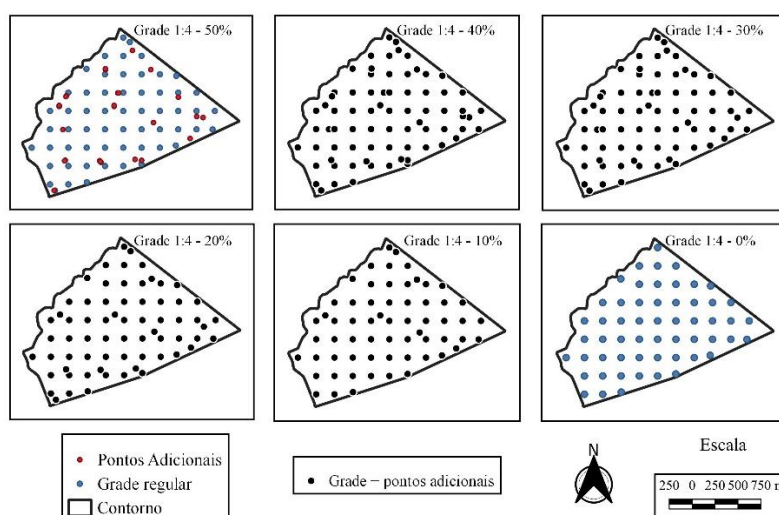


FIGURA 6. Grade 1:4 com pontos amostrais adicionados.

### 3.4 Equipamentos e insumos

A coleta georreferenciada de amostragem de solo (21/08/2021 – 30/08/2021) foi realizada com uso de uma broca helicoidal de 1 polegada e capacidade de 60 cm de profundidade acionada por um motor estacionário Buffalo 4.0, sendo este conjunto denominado de Solo Drill<sup>®</sup>. O conjunto de amostragem estava acoplado ao quadriciclo, modelo, Honda 4x4 Fourtrax<sup>®</sup> (17,78 Kw (26,9 Cv), 6.250 rpm). Para realizar a navegação das amostras no campo utilizou-se um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) operando com código C/A (*Course Aquisition*).

As amostras foram coletadas a partir de 8 subamostras por ponto e identificadas com etiquetas contendo o número dos pontos, ID. Assim, posteriormente estas foram submetidas a um laboratório comercial de análise de solo seguindo conforme protocolo do Programa de Análise de Laboratórios de Fertilidade da Embrapa (PAQLF). As amostras de solo, assim foram submetidas ao Solos Laboratório de Análise, Consult. E Informática Ltda ME, laboratório conveniado ao PAQLF.

A área experimental foi previamente dessecada quinze dias antes da semeadura. Na semeadura (12 a 14/10/2021) foram utilizadas sementes de soja cuja variedade é BMX COMPACTA IPRO, desenvolvida pela empresa Brasmax Genética, com ciclo de maturação de 129 dias (variedade de ciclo médio), com uma densidade de 14 sementes por metro em espaçamento de 0,50 m entre linhas, recomendado para a região, população esperada de 280.000 sementes por hectares. A adubação de semeadura foi com 200 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 02-23-23 (N-P-K) e em cobertura 150 kg ha<sup>-1</sup> de KCl.

Por meio do controle químico conforme recomendações agrônomicas, os talhões foram mantidos livres de pragas, doenças e plantas daninhas durante toda a safra.

### **3.5 Avaliações**

#### **3.5.1 Atributos químicos**

Das variáveis disponíveis na análise de solo foram avaliados neste trabalho os teores de potássio, fósforo, saturação por bases e capacidade de troca catiônica (CTC).

O P (mg dm<sup>-3</sup>) disponível foi analisado pelo método Mehlich<sup>-1</sup>, assim como o K (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) disponível.

A soma de bases, SB (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) foi obtida:  $SB \text{ (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$ . A saturação por bases foi calculada pela expressão:  $V (\%) = SB/T * 100$  (NOVAIS e MELLO, 2007).

A Capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada pela expressão:  $T = S + H^+ + Al^{3+}$  (SOUZA e LOBATO, 2004).

#### **3.5.2 Recomendações**

As recomendações para calagem, fósforo e potássio foram baseadas em Sousa e Lobato, (2004). Para a calagem utilizou-se o método de saturação por bases,

conforme equação 1. Definindo a saturação desejada como 60%, Sousa e Lobato, (2004) e PRNT - Poder Relativo de Neutralização Total do corretivo de acidez do solo de 80%.

$$NC \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = [(V_2 - V_1) \times 100^{-1}] \times CTC \times f \quad (11)$$

em que:

$V_2$  = Saturação por bases que se deseja;

$V_1$  = SB/T x 100 = Saturação por bases atual;

$CTC$  = (H + Al + SB) Cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>;

$SB$  = (Ca + Mg + K) Cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>;

$f$  = Fator de correção ( $f = 100 / \text{PRNT - Poder Relativo de Neutralização Total}$ ).

Para o fósforo a recomendação para solos com mais de 60% de argila corresponde à 280, 140, 70 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, quando a disponibilidade é muito baixa, baixa e média, respectivamente (SOUZA e LOBATO, 2004).

Para o potássio as recomendações de adubação ocorrem quando os valores nos solos estão baixos e médio. Quando a CTC é maior que 4,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> as doses irão variar de 50 a 100 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, em classes baixas e médias, respectivamente (SOUZA e LOBATO, 2004).

### 3.5.3 Índice de vegetação

Para analisar o componente de produção vegetal, foi realizado o processamento do NDVI da cultura da soja (*Glycine max*) cultivada logo após a realização das coletas das amostras de solo.

Assim para o cálculo do NDVI da soja foram obtidas as imagens do satélite Sentinel 2, sendo baixado o produto L2A, das datas de 04/11/2021, 04/12/2021, 18/01/2022, 23/01/2022 e 07/02/2022. Essas datas compreendem do período de emergência até a colheita da soja em que havia disponibilidade de imagem sem nuvem.

Para melhor compreensão dos dados de NDVI da cultura foi obtido do portal Agritempo (2023) dados de precipitação e temperatura média do período de cultivo da soja.

### 3.6 Análise dos dados

#### 3.6.1 Descritiva e geoestatística

Os dados foram inicialmente submetidos à análise descritiva para obtenção das medidas de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Quando da realização da interpolação dos dados no complemento do QGIS o Smart-map (PEREIRA et al., 2022) foi selecionado um algoritmo denominado “eliminar outliers” que faz uma análise da variável em estudo e verifica a possibilidade de dados discrepantes. Os *outliers* foram removidos seguindo mesmo critério de Bottega et al (2013), primeiro ocorre a definição do Intervalo interquartil (IQ), que resulta da diferença do quartil superior ( $Q_3$ ) pelo quartil inferior ( $Q_1$ ). Assim o Limite superior (LS) foi definido como ( $Q_3 + 1,5 \times IQ$ ), bem como o limite inferior definido como ( $Q_1 - 1,5 \times IQ$ ).

Quando identificados os outliers esses não são utilizados na análise do semivariograma e krigagem.

$$A \text{ semivariância é definida por } \gamma(h) = 1.([2.N(h)].[Z(x_i) - Z.(x_i + h)]^2)^{-1} \quad (12)$$

Em que:

$Y(h)$  = semivariância amostral que depende de  $h$

$h$  = distância entre dois pontos demarcados no plano ou no espaço,

$N(h)$  = número de pontos que estão distanciados no máximo pela distância  $h$ ,

$Z(x_i)$  = valor do atributo medido no ponto  $x_i$ ,

$x_i$  = local (ponto),  $x_i + h$  = ponto distanciado do ponto  $x_i$  por uma distância  $h$  (Ferraz et al., 2017).

Desta maneira os dados foram submetidos aos modelos matemáticos para o ajuste a sentimento:

$$\text{o modelo gaussiano, } \gamma(h) = C_0 + C_1 \times (1 - \exp((-3.(h.a^{-1})^2)) \quad (13)$$

$$\text{modelo esférico, } \gamma(h) = C_0 + C_1.((3.2^{-1}) \times (h.a^{-1}) - (1.2^{-1}).((h.a^{-1})^3)) \quad (14)$$

$$\text{modelo exponencial, } \gamma(h) = C_0 + C_1 \times (1 - \exp(-3.h.a^{-1})) \quad (15)$$

Em que: (SILVA NETO et al., 2020).

(05)

$a$  - Alcance

$C_0$  - Efeito pepita

$C_1$  - Patamar.

$h$  - Distância entre dois pontos demarcados no plano ou no espaço

Os modelos dos semivariograma foram selecionados baseados na menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (DALCHIAVON et al., 2017). Após a escolha do modelo este foi posto à prova por meio da validação cruzada, e observado os valores do coeficiente angular ( $a$ ) da reta o qual quanto mais próximo de 1 melhor a validação do modelo do semivariograma.

O interpolador utilizado foi a krigagem ordinária, isotrópica, com raio de busca igual ao alcance ( $a$ ) e vizinhança de 16 dados e foi realizado na resolução de 10 m, a mesma utilizada dos índices de vegetação.

Foi realizado ainda o cálculo do grau de dependência espacial (GDE). Este parâmetro proposto por Cambardella et al. (1997) consiste na relação dentre efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C$ ).

$$\text{GDE (\%)} = (C_0 \times C^{-1}) \times 100 \text{ em que:} \quad (16)$$

$C_0$  - efeito pepita

$C_1$  - patamar

que representa o quanto um atributo é dependente da variação espacial.

Assim, as camadas resultantes foram transformadas em vetor e extraídas as informações a partir da grade de resolução de 10 m, onde se obteve para todos os atributos, os mesmos 22798 dados, espacialmente alocados. A partir desse procedimento, foi realizado a construção dos mapas temáticos dos atributos do solo de acordo com a classificação descrita por Sousa e Lobato (2004).

### 3.6.2 Coeficiente de desvio relativo

Após a construção dos mapas temáticos, foram avaliados por meio do coeficiente de desvio relativo (CDR, %), o qual a partir de um mapa referência (grade 1:1 mias 50% de pontos adicionais), é calculado a diferença em módulo dos demais mapas, sendo assim quanto menor for a magnitude do valor, maior será a similaridade dentre os mapas comparados (CHERUBIN et al., 2015).

Desta maneira, o cálculo do CDR procede-se da seguinte forma

$$\text{CDR} = \sum |(T_{ij} - T_{iref}) \times T_{iref}^{-1}| \times (100 \times n^{-1}) \quad (17)$$

Em que:

$T_{ij}$  - é o valor do atributo  $i$  ( $K$  ( $\text{Cmol.dm}^{-3}$ ),  $P$  ( $\text{mg.dm}^{-3}$ ),  $\text{CTC}$  ( $\text{Cmol.dm}^{-3}$ ) e  $V(\%)$ ) das diferentes grades amostrais  $j$  (1:1 e 1:4) de 0 a 50% de amostras alocadas.

$T_{\text{iref}}$  representa os valores colocados geograficamente respectivos do mapa temático de referência e  $n$  representa o número total de dados (COELHO et al., 2009).

### 3.6.3 Coeficiente Kappa

O coeficiente kappa ( $K$ ) corresponde a um cálculo de matriz de erro, confusão, do qual sua magnitude varia de 0 a 100, no qual quanto mais próximo de 0, menor a concordância dentre os mapas e do contrário é verdadeiro, quando mais próximo de 100, maior a concordância dentre os mapas temáticos (ALBA et al., 2022). Foi utilizado como mapa referência a grade 1:1 mais 50% de pontos adicionais.

Assim, desta maneira o cálculo foi realizado conforme proposta por Cohen, (1960).

$$K = (P_o - P_c) \times (1 - P_c)^{-1} \quad (18)$$

Em que:

$P_o$  - Proporção observada de concordância dos objetos avaliados

$P_c$  - Proporção de que ocorra a concordância ao acaso.

Foi calculado também o desvio padrão para realizar o teste  $Z$  ( $\sigma_{k_o}$ ) o qual é calculado da seguinte maneira,  $\sigma_{k_o} = P_c \cdot (N \cdot (1 - P_c))^{-1}$ , onde  $N$  é o número de dados. Para enfim realizar o cálculo do teste de significância  $Z$ ,  $Z = K \cdot \sigma_{k_o}^{-1}$ .

### 3.6.4 NDVI e correlação de Pearson

Após o processamento da imagem do NDVI de 04 de dezembro de 2021, quando a cultura se apresentava no estágio fenológico R2 (TRINDADE et al., 2019) foi realizado o a interpolação pelo complemento, Smart-Map (PEREIRA et al., 2019) na resolução de 10 m, a mesma dos atributos avaliados. Após esses processamentos, a camada foi vetorizada na mesma grade dos atributos avaliados. Em seguida, foi realizada a classificação do mapa temático nas mesmas classes feita com o NDVI da cultura do milho (*Zea mays*), sendo as 5 classes de 0 a 1 com intervalo entre classes de 0,2 unidade.

Os dados provenientes desse processamento possuem então o mesmo posicionamento geográfico dos atributos de solo avaliados. Assim foram constituídos os mesmos 22798 dados. A partir desses dados, foi realizado a correlação entre os atributos, P, K, V e CTC com NDVI em todos os arranjos amostrais. O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) foi classificado de acordo com Ferreira (2018).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Fósforo (P)

Os teores de P no solo encontram-se altos conforme Souza e Lobato (2004), maior que  $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ . A causa pode ser explicado pelo excedente de adubação localizada no sulco de semeadura, quando da instalação das culturas (CHERUBIN et al., 2015). Os autores ainda observaram diminuição da amplitude conforme diminuição da densidade amostral explicada, pois quanto menor o número de amostras, os valores tendem a se aproximar da média.

Observa-se que ocorre valores elevados dos coeficientes de variação em todos os arranjos amostrais para o P (Quadro 2). Segundo Warrick e Nielsen (1980) o CV é baixo quando for inferior a 10% (alta precisão), médio quando estiver entre 10% e 60% muito alto quando maior que 60% (baixíssima precisão). De maneira geral, os CV estiveram acima de 70% em todas as grades analisadas.

Cherubim et al (2015) obtiveram CV abaixo em diferentes malhas amostrais para o P. Os CVs obtidos em Latossolo vermelho, situaram-se na faixa de 23 a 58% para o P. Carneiro et al (2016) obtiveram valor de 46% de CV para o P em latossolo vermelho estudando malhas regulares.

QUADRO 2. Estatística descritiva do P disponível ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) nas grades 1:1 e 1:4.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Média	27,95	27,58	27,28	27,04	26,33	25,48
DP <sup>1</sup>	18,77	20,25	19,70	19,76	19,33	18,54
CV (%) <sup>2</sup>	78,16	81,26	79,82	80,75	79,85	78,46
Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Média	27,65	26,52	26,58	24,99	24,64	25,42
DP <sup>1</sup>	19,48	19,21	18,81	18,95	18,50	23,91
CV (%) <sup>2</sup>	78,88	82,45	81,31	81,14	80,88	94,04

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Outro parâmetro que indica o ajuste adequado dos modelos é o coeficiente angular da reta (a), que foi obtido por meio da validação cruzada. Verifica-se que os valores foram próximos a 1,0 para todas as grades (Quadro 3). Valores próximos de 1 indicam maior confiabilidade e eficiência do modelo apresentado (ALHO et al., 2014).



QUADRO 3. Parâmetros geoestatísticos, coeficiente de desvio relativo e Kappa do P.

Grade 1:1						
Parâmetros	50%	40%	30%	20%	10%	0
Modelo	Esférico	Gaussiano	Esférico	Esférico	Gaussiano	Esférico
C <sub>0</sub>	89,49	162,88	96,82	85,30	252,31	134,16
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	513,163	565,290	496,90	494,272	805,55	639,78
A (m)	1316,9	1306,23	1304,61	1317,21	1317,02	1286,00
a	1,03	1,04	1,04	1,05	1,04	1,05
GDE (%)	17,44	28,81	19,48	17,26	31,33	20,97
CRD (%)	1,00	11,41	2,47	2,86	15,79	7,10
Kappa	100	76,59**	93,53**	71,51**	89,28**	86,01**
Grade 1:4						
Parâmetros	50%	40%	30%	20%	10%	0
Modelo	Exponencial	Esférico	Esférico	Esférico	Gaussiano	Esférico
C <sub>0</sub>	89,95	51,97	133,76	136,57	38,06	155,66
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	404,34	374,99	391,56	404,34	394,92	375,10
A (m)	1146,71	657,73	1192,13	1146,71	1116,81	1069,54
a	1,02	0,92	1,02	1,03	1,07	1,09
GDE (%)	19,50	13,86	34,16	33,78	46,27	41,50
CRD (%)	23,32	25,52	29,43	29,62	28,56	35,52
Kappa	56,57**	47,48**	44,58**	47,18**	50,67**	40,69**

(C<sub>0</sub>) – Efeito pepita; (C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>) – Patamar; (A) – Alcance (m); (a) - Coeficiente angular, validação cruzada; (GDE) - Grau de Dependência Espacial; (CDR) – Coeficiente de desvio relativo. \*\* Significativo pelo teste z a nível de significância de 1%

Com base no índice de dependência espacial (IDE) pode-se classificar o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para IDE  $\leq 25\%$ ; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para IDE  $> 75\%$  (CAMBARDELLA et al., 1994). Pelos dados pode-se verificar que (Quadro 3) que nas grades de 1:1, apenas as 40 e 10% tiveram GDE moderado e nas grades de 1:4 apenas as com 50 e 40% de pontos adicionais tiveram GDE forte.

Quanto aos valores de coeficiente de desvio relativo e ao índice kappa (Quadro 3) verifica-se que quando as grades possuem menores números amostrais, observa-se maiores diferenças dentre os mapas. Segundo a classificação de Landis e Koch (1977), todos os coeficientes kappa dos arranjos amostrais referentes as grades 1:1 obtiveram concordância substancial, enquanto os coeficientes referentes as grades 1:4 obtiveram apenas concordância moderada. Estes resultados denotam a dificuldade de conhecer a distribuição espacial do fósforo no solo em grades menores.

Cherubim et al. (2015) obtiveram comportamento de resposta com relação ao alcance semelhante. Conforme ocorrer o aumento da densidade amostral, e, portanto, diminuição da malha amostral, houve redução na variação dos dados. Este fenômeno ocorreu somente quando comparado os dados da malha 1:4 sem pontos adicionais com todas as demais malhas (Quadro 3).

Observa-se para o coeficiente Kappa que os valores do índice na grade de 1:1 e demais estiveram com valores variando de 71 a 93%, enquanto na grade de 1:4 os valores foram de 40 a 56%. Demonstrando a importância de grades amostrais mais densas (Quadro 3).

Para o fósforo a grade que mais se aproximou do padrão adotado (grade 1:1 com 50%) foi com 30% de pontos adicionais. Já na grade de 1:4 foi com 50% de pontos adicionais, enfatizando mais uma vez a questão do quantitativos de pontos amostrais para análise da variabilidade.

Nas Figuras 7 e 8 verifica-se a variabilidade espacial do fósforo. Como visto no Quadro 2, a média indicou valor alto, mas pelos mapas pode-se verificar que há uma região ao nordeste da área que não está com valores altos. Apresenta valores de baixo a adequado, conforme Souza e Lobato (2004). Com base na grade de 1:1 com 50% seria em torno de 10,8 ha que estariam nas classes baixo e médio e que necessitariam de correção. Essa região coincide com os valores médios de matéria orgânica (Figura 2b) e pH (Figura 2c) que podem ser um dos indicativos dos menores valores de fósforo.

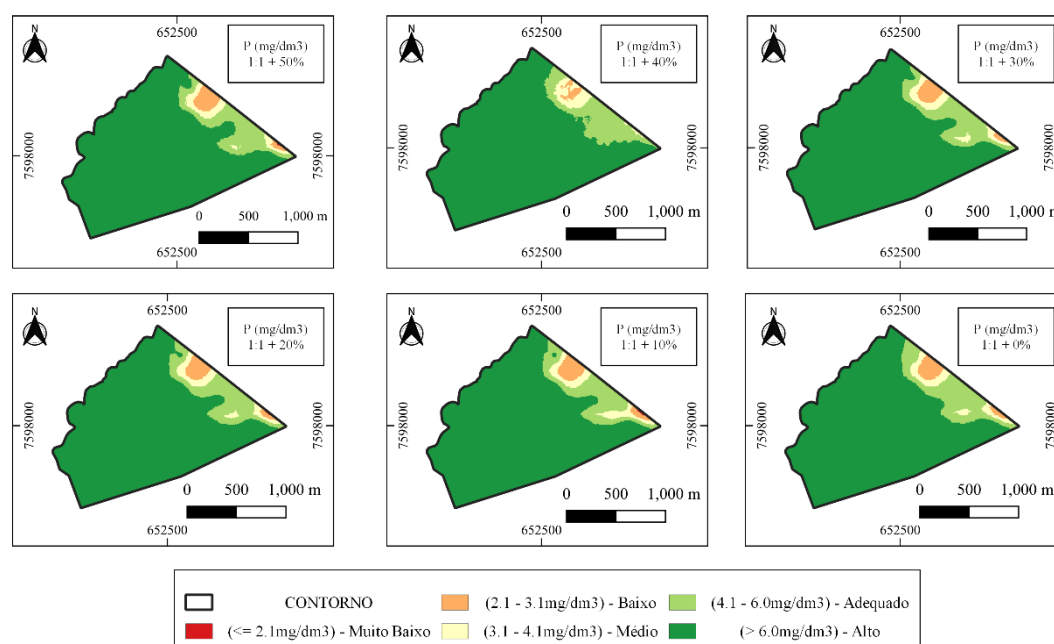


FIGURA 7. Mapas temáticos do fósforo P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) na grade 1:1 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

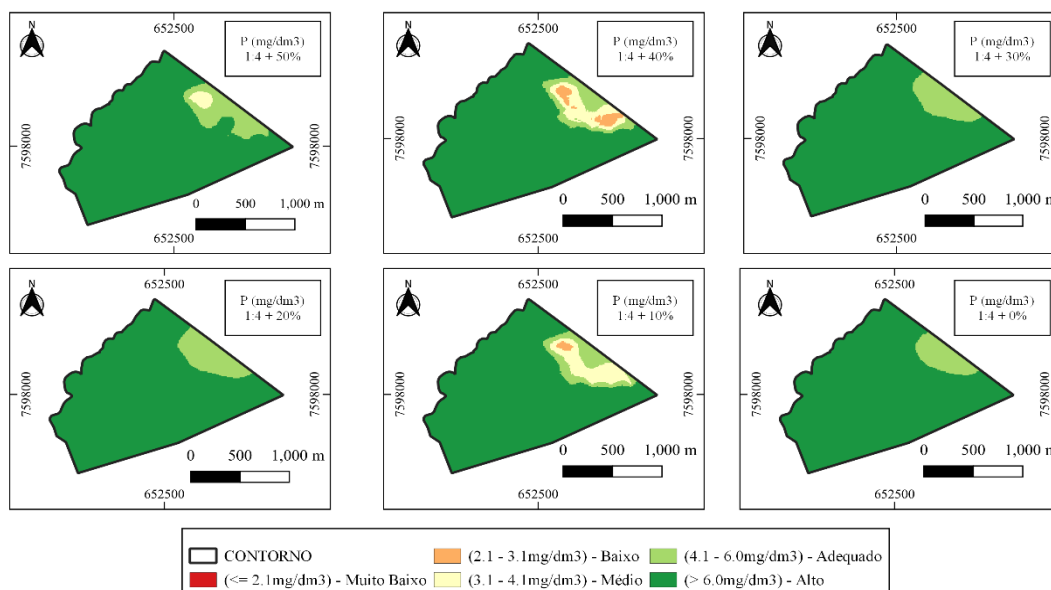


FIGURA 8. Mapas temáticos do fósforo P (mg dm<sup>-3</sup>) na grade 1:4 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

## 4.2 Potássio (K)

Quanto aos resultados envolvendo potássio (K) houve maior similitude dentre as grades amostrais (Quadro 4). Pois acima de 0,20 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> já é considerado valor alto (SOUZA e LOBATO, 2004) para solos com a CTC acima de 4,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. O CV de todas as grades segundo Warrick e Nielsen (1980), considerado médio.

A variação de K associados aos altos teores deste elemento no solo pode ter explicações quanto a sua variação e magnitude. Segundo Cherubim et al (2014) também obteve valores médios de K e pode ser explicado pelo manejo de adubação tanto em linha de semeadura quanto em área total. Assim como o alto grau de intemperismo de minerais primários como as micas (muscovita de 70 a 110 g Kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) e biotita (60 a 110 g Kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) feldspatos e feldspatoides bem como os minerais secundários como a ilita, vermiculita e minerais interestratificados. (ERNANI et al., 2007) (MELO, V. et al., 2019)

QUADRO 4. Estatística descritiva do K disponível ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) nas grades 1:1 e 1:4.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Média	0,63	0,63	0,64	0,64	0,63	0,63
DP <sup>1</sup>	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32
CV (%) <sup>2</sup>	50,37	50,83	50,84	51,63	51,66	51,99
Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Média	0,66	0,66	0,66	0,64	0,64	0,65
DP <sup>1</sup>	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35
CV (%) <sup>2</sup>	50,36	51,88	52,19	52,10	53,13	53,97

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Com relação aos parâmetros geoestatísticos (Quadro 5), o ajuste adequado dos modelos pode ser verificado pelo coeficiente angular da reta (a), que foi obtido por meio da validação cruzada. Verifica-se que os valores foram superiores a 0,8 para todas as grades (Quadro 5).

QUADRO 5. Parâmetros geoestatísticos, coeficiente de desvio relativo e Kappa do K.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Esférico	Esférico	Esférico	Gaussiano
C <sub>0</sub>	0,03	0,03	0,01	0,009	0,03	0,03
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	0,16	0,17	0,14	0,15	0,21	0,17
A	1308,06	1311,70	1297,65	1317,20	1317,03	1286,11
a	0,81	0,82	0,79	0,80	0,85	0,87
GDE	23,31	21,58	11,11	6,57	19,43	19,42
CRD	1,00	1,60	8,65	10,82	15,79	5,59
Kappa	100	99,57	98,55	97,91	99,93	99,93
Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Modelo	Esférico	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano
C <sub>0</sub>	0,04	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	0,16	0,19	0,20	0,18	0,18	0,19
A	1207,34	1210,59	1211,05	1146,73	1167,10	1206,33
a	0,83	0,85	0,84	0,85	0,84	0,91
GDE	32,52	38,30	37,93	34,59	23,61	25,83
CRD	11,36	14,16	14,70	14,20	14,90	15,99
Kappa	100	100	100	100	100	100

(C<sub>0</sub>) – Efeito pepita; (C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>) – Patamar; (A) – Alcance (m); (a) - Coeficiente angular, validação cruzada; (GDE) - Grau de Dependência Espacial; (CDR) – Coeficiente de desvio relativo. \*\* Significativo pelo teste z a nível de significância de 1%.

Pelos dados do GDE (Quadro 5) pode-se verificar que nas grades de 1:1, todos tiveram GDE forte e nas grades de 1:4 apenas as com 10 de pontos adicionais tiveram GDE forte (CAMPARDELLA et al., 1994).

Quanto aos valores do coeficiente Kappa (Quadro 5) verifica-se que as grades apresentaram valores próximos de 100, o que indica alta concordância (ALBA et al., 2022) com o mapa padrão que foi a grade 1:1 com 50% de pontos adicionais.

A classificação temática dos mapas (Figura 9 e 10) que seguiu os critérios técnicos indicou a mesma classe em quase a totalidade da área de estudos. Este fato decorre de que pela intensa fertilização em área total, taxa fixa no local de estudo e houve aumento dos teores de K em toda a área para alto e em alguns poucos pontos com valores adequados (SOUZA e LOBATO, 2004).

Para fins de recomendação verifica-se que o potássio está em nível alto em toda a área na grade de 1:4 (Figura 9) e aprecem alguns pontos como adequado na grade de 1:1 (Figura 10). Mas para todos os efeitos as recomendações de adubação com potássio são apenas quando as áreas apresentam níveis baixos e médios. Dessa forma, essa área teria taxa zero (0), não havendo necessidade de aplicação de potássio, baseado nos teores disponíveis no solo.

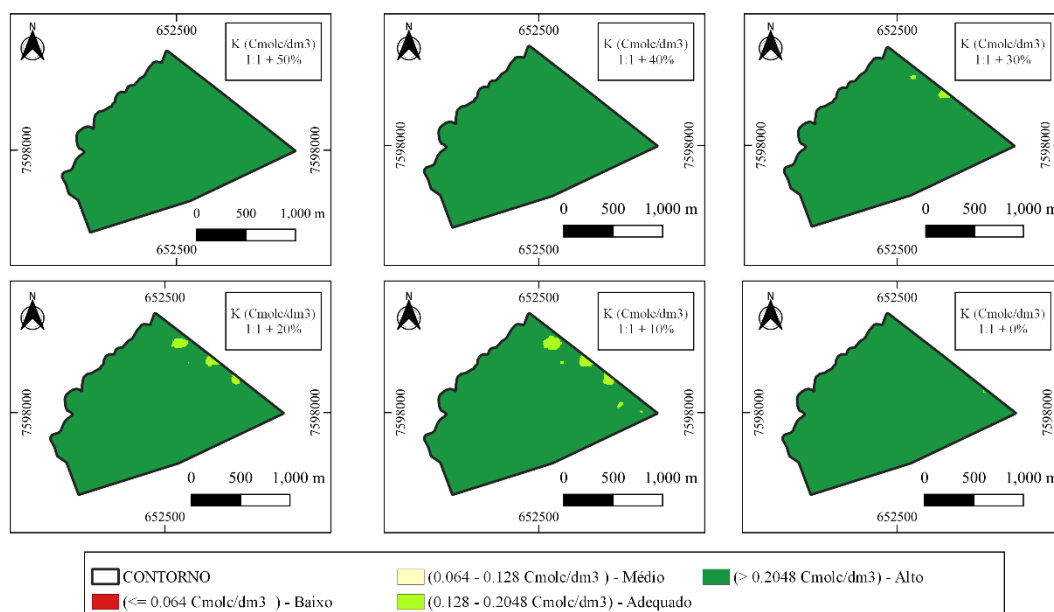


FIGURA 9. Mapas temáticos do potássio K (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na grade 1:1e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

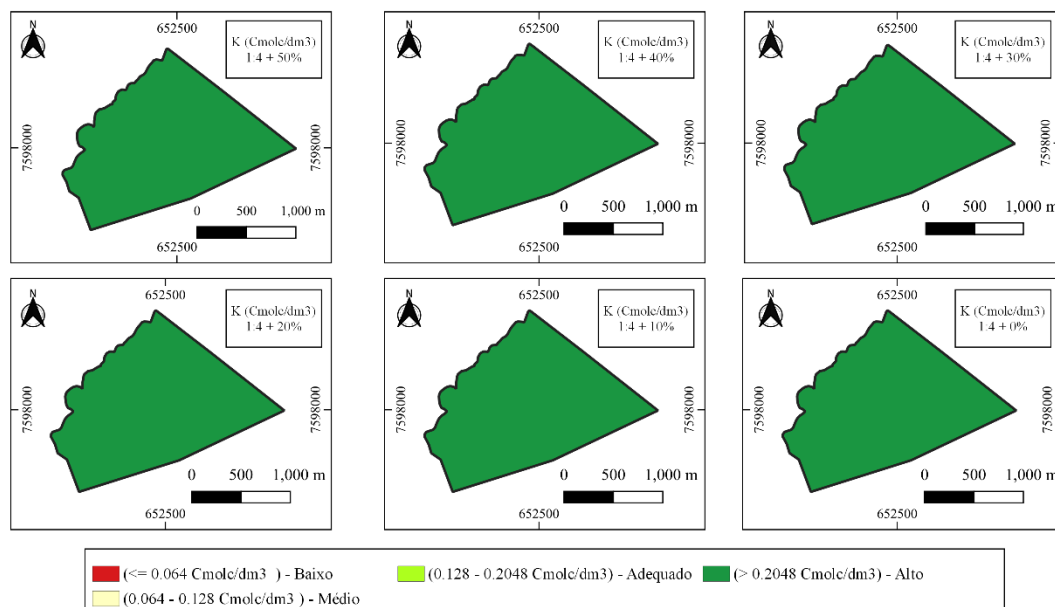


FIGURA 10. Mapas temáticos do potássio K (cmolc dm<sup>-3</sup>) na grade 1:4 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

Portanto, áreas com teores altos de potássio no solo podem ser amostradas com grades mais espaçadas, como 1:4, pois a concordância de similaridades com mapas de alta densidade amostral foi elevada.

Morato et al (2021) estudando variabilidade espacial de atributos químicos do solo obtiveram resultado semelhante. Esses autores dirigiram sua pesquisa em regiões de 3 classes diferentes de solo, Cambissolo Háplico (HX), Latossolo Vermelho (LV) e Neossolo Regolítico (RR), em malhas de 1:4 obtiveram o alcance de 1.207,34. Este valor próximo ao obtido em todas as malhas amostrais (QUADRO 5).

Souza et al. (2014), seus resultados indicam que densidades amostrais que sejam eficientes na caracterização da variabilidade espacial do K e P podem ser utilizadas para aplicação de taxa variada plena. Estas afirmações corroboram com os resultados apresentados de P, quando há a presença de outras classes de níveis do elemento no solo de acordo com o critério objetivo utilizado.

### 4.3 Saturação por Bases (V%)

Os valores médios de saturação por bases são considerados adequados para a área pois encontram-se na faixa de 36 a 60%, conforme Souza e Lobato (2004).

Os valores de CV para a saturação por bases apresentaram na faixa de 23,2 a 24,86% (QUADRO 6). Estes valores de CV são considerados médios conforme e Warrick e Nielsen (1980), e não houve grandes variações quanto aos arranjos amostrais.

QUADRO 6. Estatística descritiva do V (%) disponível nas grades 1:1 e 1:4.

<b>Grade 1:1</b>						
<b>Parâmetros</b>	<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>30%</b>	<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0</b>
Média	50,51	50,30	50,12	50,08	49,80	49,50
DP <sup>1</sup>	12,14	12,08	11,93	11,91	11,88	12,31
CV (%) <sup>2</sup>	24,11	24,12	23,92	23,89	23,98	24,86
<b>Grade 1:4</b>						
<b>Parâmetros</b>	<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>30%</b>	<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0</b>
Média	50,97	50,55	50,08	49,62	49,42	49,17
DP <sup>1</sup>	11,77	11,64	11,57	11,34	11,64	11,97
CV (%) <sup>2</sup>	23,26	23,20	23,32	23,07	23,80	24,35

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Com relação aos parâmetros geoestatísticos (Quadro 7), o modelo foi gaussiano para todas as grades, indicando variações mais acentuadas na microescala. O ajuste adequado dos modelos pode ser verificado pelo coeficiente angular da reta (a), que foi próximo a 1,0 para todas as grades. Segundo Coelho et al. (2012), valores do coeficiente angular da reta (a) próximos a 1,0 indicando relação próxima de equivalência entre os valores real e estimado.

Com relação ao alcance, que de acordo com Resende et al. (2014) representa a distância de correlação espacial dentre os pontos conhecidos, pode-se reiterar algumas conclusões. Pois os valores de alcance encontrados estão acima de 1.000,0 m, que difere de Resende et al. (2014), Cavalcante et al. (2007), Caon e Genu (2013) que pode estar associado a estratégia de amostragem guiada, de acordo com as recomendações de Molin et al. (2015).

QUADRO 7. Parâmetros geoestatísticos, coeficiente de desvio relativo e Kappa do V%.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano
C <sub>0</sub>	23,32	20,07	20,06	18,65	18,34	14,78
(C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub> )	224,82	228,94	219,25	228,21	230,41	221,99
A	1308,05	1311,70	1297,66	1317,15	1317,00	1286,12
a	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00
GDE	11,58	9,61	10,07	8,90	8,65	7,12
CRD (%)	1	0,61	0,85	1,10	1,26	1,69
Kappa	100	96,19**	94,31**	93,14**	92,05**	89,70**

Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano
C <sub>0</sub>	31,09	26,58	25,61	21,31	15,60	18,26
(C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub> )	195,50	193,31	194,37	172,46	183,14	194,62
A	1137,43	1210,59	1211,05	1147,49	1168,61	1206,33
a	1,00	1,02	1,02	0,98	0,95	0,94
GDE	18,91	15,94	15,18	14,10	9,31	10,35
CRD (%)	3,49	3,49	3,30	3,28	3,38	3,55
Kappa	76,79**	76,15**	77,71**	77,85**	78,40**	76,66**

(C<sub>0</sub>) – Efeito pepita; (C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>) – Patamar; (A) – Alcance (m); (a) - Coeficiente angular, validação cruzada; (GDE) - Grau de Dependência Espacial; (CDR) – Coeficiente de desvio relativo. \*\* Significativo pelo teste z a nível de significância de 1%.

Apesar dos valores de GDE, terem sido abaixo de 25% indicando, forte grau de dependência espacial. Segundo Resende et al. (2014) ainda se menciona que nas grades amostrais de 1:1 valores ainda menores, podendo ser explicada pela maior variação determinada por fatores extrínsecos relacionada aos fatores de formação do solo. O coeficiente Kappa e o CRD (Quadro 7) para o V%, demonstram que as grades 1:1 variaram dentro da faixa do excelente segundo a classificação de Landis e Koch (1977). Bem como quanto ao CRD, houve variações baixas dentre os arranjos amostrais.

Nas Figuras 11 e 12 pode-se observar a espacialização do V%. No Quadro 6 foi verificado o valor médio próximo de 50% para a área de estudo, mas ao fazer a análise espacial verifica-se áreas com valores altos e médios em regiões bem distintas. As regiões com menores valores de V%, considerados médios, coincidem com os valores médios de matéria orgânica (Figura 2b) e pH (Figura 2c). Como que os maiores valores de V% coincidem com a área mais baixa do relevo (Figura 1).

Quanto aos arranjos amostrais das grades 1:4, pode-se relatar que os resultados foram semelhantes quanto a média, CV e DP (Quadro 6). Quanto aos parâmetros geoestatísticos, o A manteve-se semelhante, acima de 1.000,00 m, resultado que como



visto mencionado por Lemos Filho et al (2008), mostra-se adequado quanto ao planejamento de densidade amostral. Disto decorre, sobretudo pela validação do método dos variogramas, visto que o coeficiente angular em todos os esquemas amostrais se manteve próximo a 1, (Quadro 7).

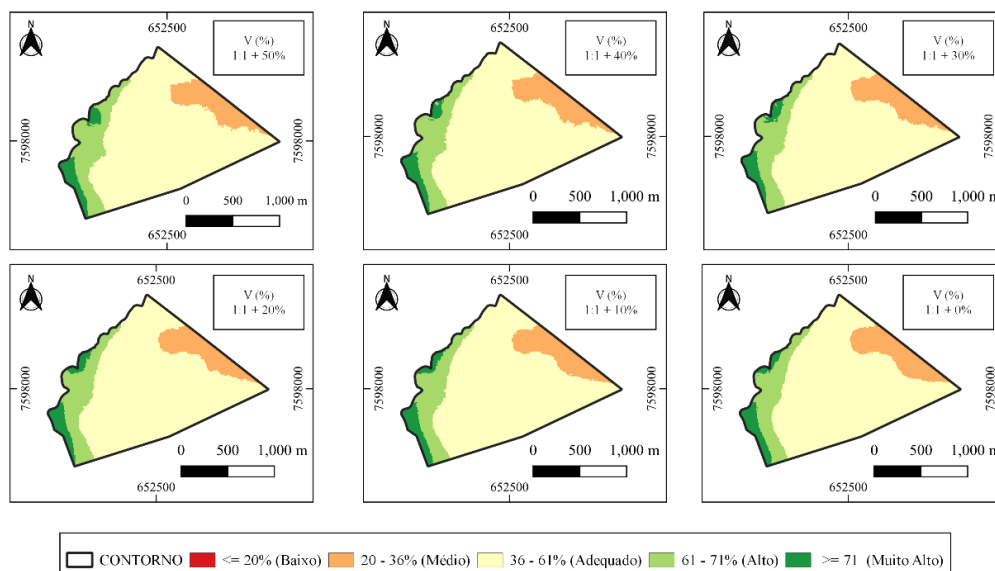


FIGURA 11. Mapas temáticos do saturação de bases (V%) interpolado na grade 1:1 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

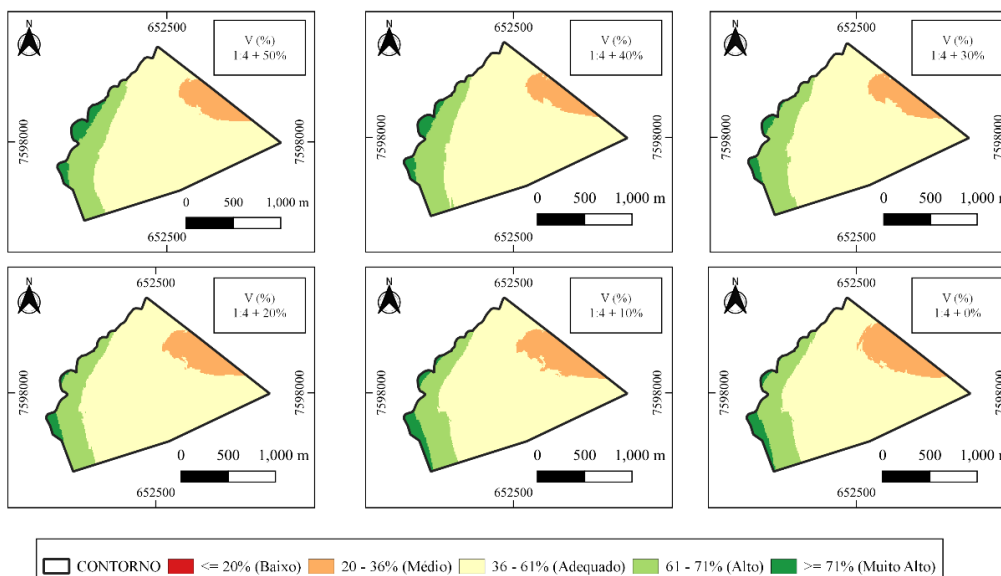


FIGURA 12. Mapas temáticos do saturação de bases (V%) interpolado na grade 1:4 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

#### 4.4 Capacidade Troca Catiônica (CTC)

Os valores médios de CTC da área (Quadro 8) podem ser considerados adequados conforme Souza e Lobato (2004), por estarem na faixa de 12,1 a 18,0  $\text{Cmol}_c \text{dm}^{-3}$  para solos com textura muito argilosa.

Com base nos valores de CV para a CTC (Quadro 8) em todas as grades houve uma faixa de 14 a 15,77%, resultados semelhantes encontrados por Cavalcante et al. (2007).

QUADRO 8. Estatística descritiva da Capacidade de troca de Cátions (CTC) a pH 7,0 nas grades 1:1 e 1:4.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Média	13,98	13,99	13,99	14,00	14,01	14,04
DP <sup>1</sup>	2,16	2,14	2,12	2,02	1,97	2,01
CV (%) <sup>2</sup>	15,68	15,57	15,37	14,69	14,37	14,58
Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Média	13,95	13,93	13,86	13,80	13,82	13,86
DP <sup>1</sup>	2,17	2,16	2,15	2,11	2,14	2,01
CV (%) <sup>2</sup>	15,77	15,71	15,66	15,43	15,66	14,63

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Com relação aos parâmetros geoestatísticos, evidenciam-se que o modelo do semivariograma foi o gaussiano (Quadro 9). Segundo Bottega et al. (2013), os modelos variogramas gaussiano representam de maneira geral para atributos do solo, aqueles que possuem elevada continuidade espacial. Nesse sentido analisando o GDE, em todas as malhas houve a constatação de forte dependência espacial, porém em todas as malhas observou-se ótimo ajuste dos modelos semivariogramas com coeficiente angular próximo a 1.

Com relação ao coeficiente Kappa e CRD, pode-se determinar que em todas as malhas amostrais houve alta concordância (Quadro 9). Segundo a classificação de Fonseca et al. (2000), todas as malhas apresentaram concordância excelente.

Os mapas de CTC (Figuras 13 e 14) indicam valores adequados na maior parte da área. No entanto na região mais ao norte verifica-se classe média de CTC que coincidem com os valores médios de matéria orgânica (Figura 2b) e pH (Figura 2c), pois quanto menor o teor de MOS, menor a geração de cargas negativas e menor será a CTC. (Batista et al., 2018)

Este resultado pode ser explicitado pela presença maior presença de matéria orgânica do solo. Resende et al. (2021) relatam que com maiores quantidades de matéria orgânica do solo, representa acréscimo na reserva de disponibilidade de nutrientes. Ciotta et al. (2003) apresentaram que um Latossolo, sob sistema de plantio direto, houve acréscimo da MOS do solo em conjunto com a CTC.

QUADRO 9. Parâmetros geoestatísticos, coeficiente de desvio relativo e Kappa da CTC

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
	Gauss.	Gauss.	Gauss.	Gauss.	Gauss.	Gauss.
Modelo						
C <sub>0</sub>	0,54	0,48	0,51	0,47	0,49	0,39
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	7,29	7,32	7,11	6,70	6,34	6,32
A	1315,43	1322,40	1307,15	1317,15	1316,89	1292,23
a	0,90	0,92	0,91	0,91	0,92	0,91
GDE	8,03	7,07	7,75	7,58	8,36	6,72
CRD	--	0,33	0,48	0,71	0,92	1,01
Kappa	--	98,53**	97,84**	96,18**	95,51**	93,68**
Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
	Gauss.	Gauss.	Gauss.	Gauss.	Gauss.	Gauss.
Modelo						
C <sub>0</sub>	0,89	0,83	0,95	0,41	0,20	0,47
C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	6,67	6,39	6,44	6,01	6,19	5,41
A	1141,60	1210,88	1211,41	1146,64	1166,73	1206,53
a	0,92	0,93	0,93	0,91	0,92	0,96
GDE	15,57	14,98	17,34	7,38	3,42	9,55
CRD	2,19	2,49	2,59	2,70	3,10	3,48
Kappa	88,72**	87,66**	87,36**	87,97**	87,14**	85,12**

(C<sub>0</sub>) – Efeito pepita; (C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub>) – Patamar; (A) – Alcance (m); (a) - Coeficiente angular, validação cruzada; (GDE) - Grau de Dependência Espacial; (CDR) – Coeficiente de desvio relativo. \*\* Significativo pelo teste z a nível de significância de 1%.

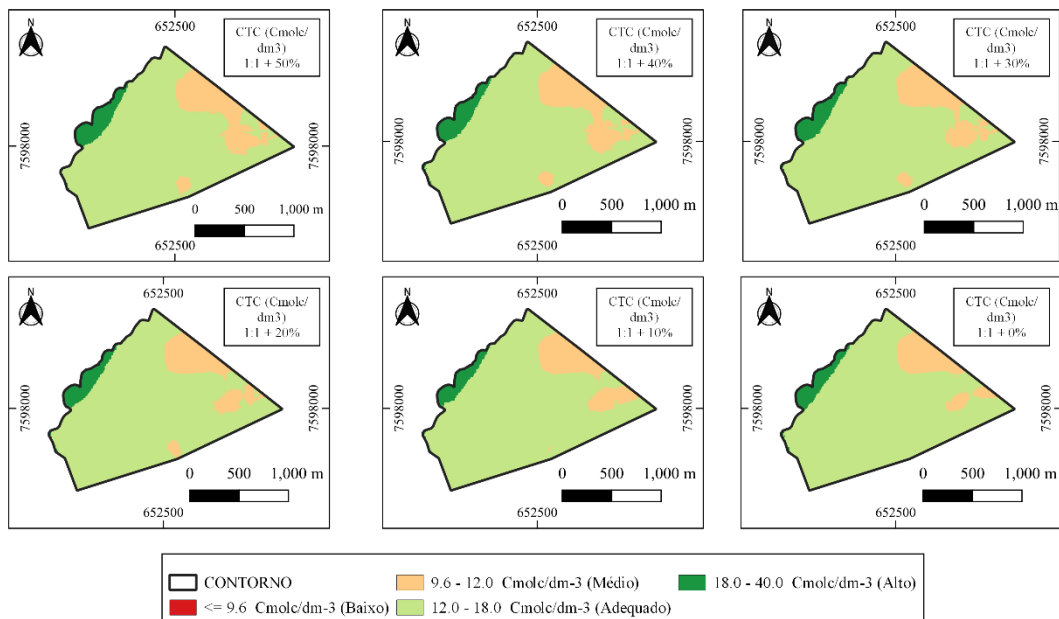


FIGURA 13. Mapas temáticos de CTC ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) na grade 1:1 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

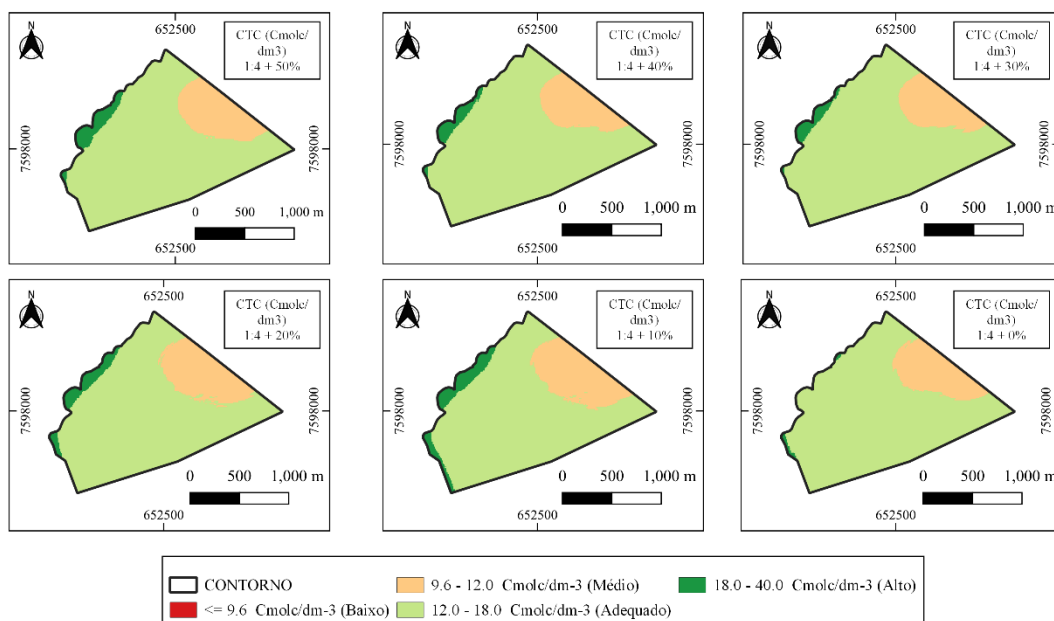


FIGURA 14. Mapas temáticos de CTC ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) na grade 1:4 e classificado de acordo com Sousa e Lobato (2004).

## 4.5 Recomendações

### 4.5.1 Calcário

Pode-se observar que as recomendações de calcário na área de estudo variaram de áreas com taxa zero até valores superiores a 4 Mg ha<sup>-1</sup> (Figuras 15 e 16). As maiores recomendações foram verificadas na área mais ao nordeste que coincidem com os valores médios de matéria orgânica (Figura 2b) e pH (Figura 2c). Essa região mais ao norte é a área mais baixa do relevo (Figura 1).

Por consequência do método de determinação da necessidade de calagem escolhido, a qual, imputem-se no cálculo as variáveis CTC (Figuras 13 e 14) e V% (Figuras 11 e 12), observa-se o comportamento semelhante quanto aos mapas temáticos das variáveis com mapa temático da recomendação de calagem. Estas variáveis por sua vez estão em relação com pH do solo. Segundo Brignoli et al. (2020), os solos ácidos possuem maior proporção de Al<sup>3+</sup>, e menor saturação de bases (V%) e baixa disponibilidade de P (CAZOTTI et al., 2019; FAGERIA, 2011).

Na grade de 1:1 e demais variações de pontos adicionais, visualmente na Figura 15, não se observa grandes diferenças. Ao analisar o Quadro 10, para a grade 1:1 verifica-se que as áreas foram muito próximas e que o coeficiente Kappa foi maior 0,90 para 30% de pontos adicionais, já a assertividade foi maior que 90% já com 20% de pontos adicionais, sendo caracterizados como quase perfeita (COHEN, 1960). Assim, em grade mais adensadas recomenda-se trabalhar no mínimo com 20% de pontos amostrais. Para as grades pouco adensadas, como a 1:4 os valores de Kappa e assertividade ficaram estagnados na ordem de 0,70-0,8 e 70-80%, respectivamente, e não houve melhoras com a inclusão de pontos adicionais, sendo caracterizados como forte. Em grades pouco adensadas a inclusão de pontos adicionais não melhorou a estimativa de recomendação de calcário.

Com relação a quantidade total de calcário exigida dentre as densidades amostrais não houve diferenças maior que 10% dentre as grades e grade referência 1:1+ 50%. Esta grade exigiu um montante de 405,5613 Mg de calcário, enquanto as diferenças com relação as grades 1:1 não ultrapassaram 1%, com exceção da grade 1:1 + 0% que obteve uma diferença da referência na ordem de 2,51 %. Assim como Ragagnin et al (2010), concluíram que pela baixa diferença dentre as 3 grades amostrais (154, 78 e 36) em uma área de 725,9 ha, e pela redução de custos é possível optar pela menor densidade amostral.

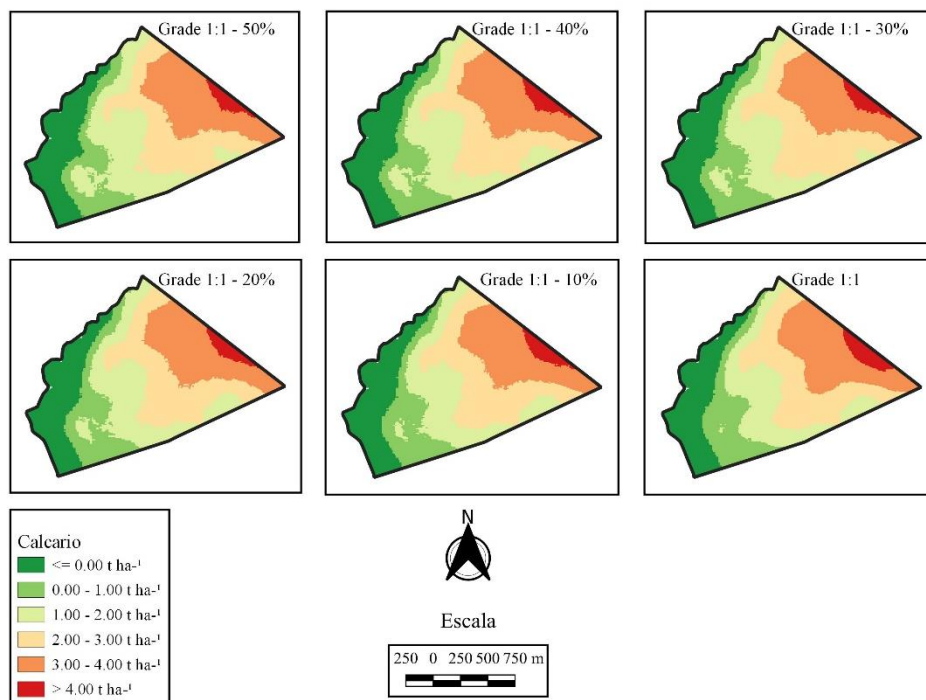


FIGURA 15. Mapas temáticos de recomendação de calcário na grade 1:1. Unidade em  $\text{t ha}^{-1}$  e não  $\text{Mg ha}^{-1}$  como está no texto.

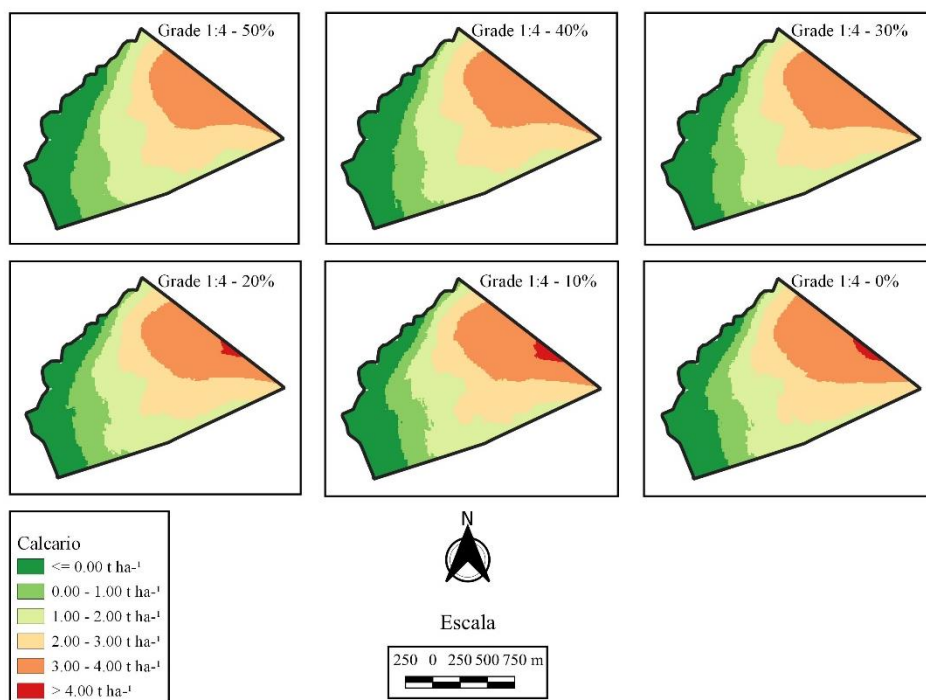


FIGURA 16. Mapas temáticos de recomendação de calcário na grade 1:4.

QUADRO 10. Dados de área (ha) para recomendação de calcário.

<b>Grade 1:1</b>						
Recomendação Mg ha <sup>-1</sup>	<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>30%</b>	<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0</b>
< = 0	39,96	39,73	39,44	39,58	39,83	38,76
0 a 1,0	26,10	28,74	30,39	30,41	31,40	31,76
1,0 a 2,0	56,76	54,57	48,14	52,14	49,30	47,51
2,0 a 3,0 0	50,39	50,08	56,53	52,62	53,18	51,69
3,0 a 4,0 0	46,05	45,36	44,30	44,28	44,77	57,56
> 4,0 Mg	4,94	5,72	5,40	5,17	5,72	6,92
Kappa	1,0	0,94	0,91	0,89	0,87	0,83
Acertos (%)	100	95,10	93,47	91,62	89,60	86,38
<b>Grade 1:4</b>						
Recomendação Mg ha <sup>-1</sup>	<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>30%</b>	<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0</b>
< = 0	45,29	45,66	44,56	39,60	43,35	43,54
0 a 1,0	31,50	27,98	28,25	30,74	28,46	27,55
1,0 a 2,0	54,97	54,99	55,76	54,18	51,20	47,98
2,0 a 3,0 0	52,35	55,52	53,93	54,09	53,52	54,41
3,0 a 4,0 0	40,08	40,05	41,64	44,12	44,97	48,69
> 4,0	0,01	0,00	0,06	1,47	2,70	2,03
Kappa	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72	0,71
Acertos (%)	76,98	76,87	77,45	77,42	77,73	76,69

#### 4.5.2 Fósforo (P)

Pode-se observar que as recomendações de fósforo na área de estudo variaram de áreas com taxa zero até valores de 70 a 280 kg ha<sup>-1</sup> (Figuras 17 e 18). As maiores recomendações foram verificadas na área mais ao norte que coincidem com os valores médios de matéria orgânica (Figura 2b) e pH (Figura 2c). Essa região mais ao norte é a área mais baixa do relevo (Figura 1) que pode conter acúmulos de água em períodos mais intensos de chuva.

Desta maneira, conforme os mapas temáticos de P (Figuras 17 e 18), observou-se comportamento semelhante ao da recomendação de calagem. Conforme explicitado, por Cazotti et al. (2019), onde há maior acidez do solo, há menor disponibilidade de P para a forma trocável, por essa região, onde determinou-se os menores valores de pH (Figura 2) e os valores médios de MOS. Melo e Mendonça (2019) reiteram que além do papel de estabilizador de agregados, a MOS é importante para o aumento da capacidade de troca de cátions do solo.

Na grade de 1:1 e demais variações de pontos adicionais, visualmente na Figura 17, observa-se diferença para a grade com 40% de pontos adicionais. Ao analisar o

Quadro 10, para a grade 1:1 verifica-se que as áreas foram muito próximas e que o coeficiente Kappa foi maior 0,90 para 10, 20 e 30% de pontos adicionais sendo caracterizados como quase perfeita (COHEN, 1960). Já a assertividade na grade 1:1 foi maior que 90% para todas as grades. Assim, em grade mais adensadas recomenda-se trabalhar no mínimo com 10% de pontos amostrais para o fósforo.

Na grade de 1:4 (uma amostra para 4 hectares), Figura 18, os valores de dose foram de 70 a 140 kg ha<sup>-1</sup>, deixando de apresentar pontos que necessitavam de 280 kg ha<sup>-1</sup>. No Quadro 10 os valores de Kappa e assertividade ficaram estagnados na ordem de 0,40-0,6, sendo caracterizados como moderado (COHEN, 1960), e 80-90%, respectivamente, e observou-se melhoras na estimativa com a inclusão de 50% pontos adicionais. Apesar que com 10% e 40% foi possível estabelecer áreas de adubação que não foi visto com 0, 20 e 50%. Em grades pouco adensadas a inclusão de pontos adicionais melhorou a estimativa.

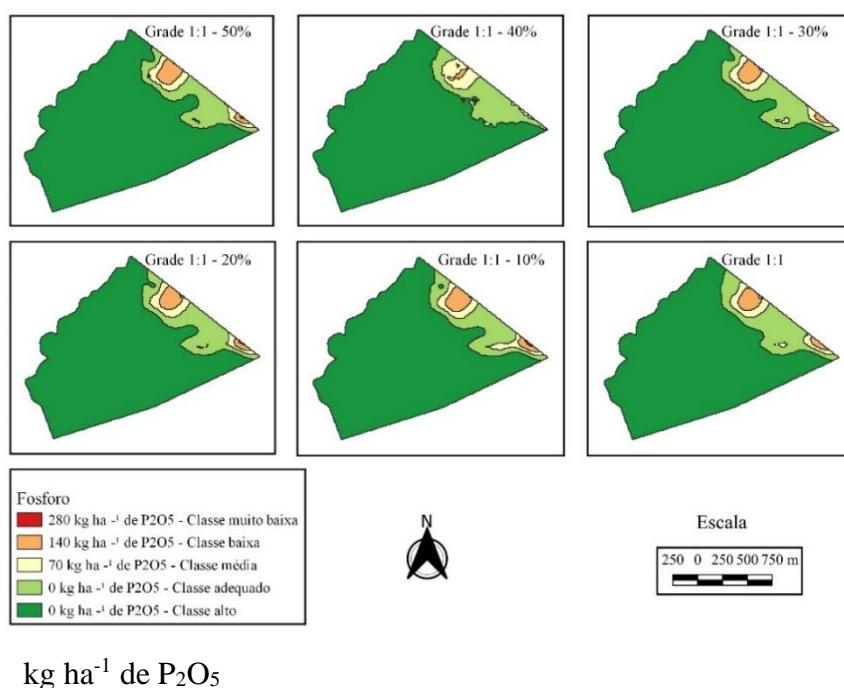


FIGURA 17. Mapas temáticos de recomendação de fósforo na grade 1:1.



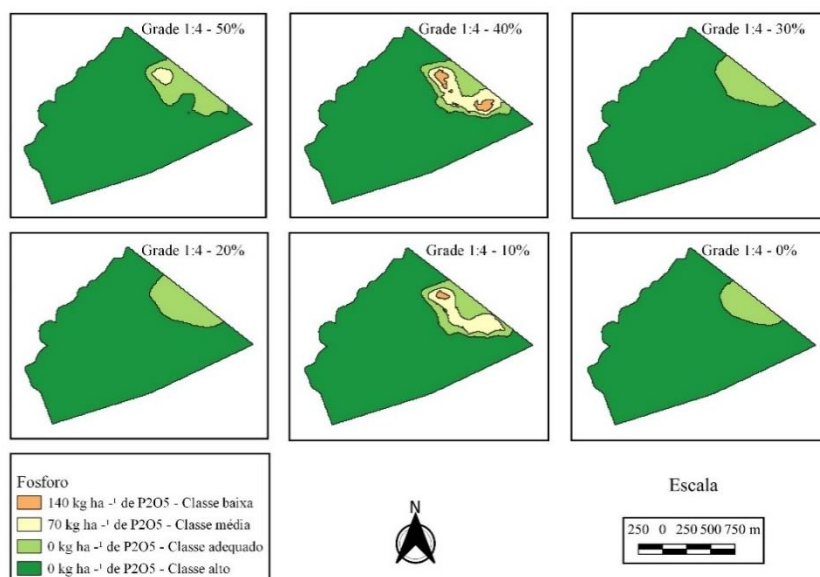


FIGURA 18. Mapas temáticos de recomendação de fósforo na grade 1:4.

QUADRO 11. Dados de área (ha) para cada classe de interpretação de fósforo.

Classe	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Muito baixa	0,06	0	0	0,08	0,15	0
Baixa	4,90	0,86	4,45	4,61	5,52	4,70
Média	5,90	7,18	6,35	6,11	6,92	6,36
Adequado	22,34	23,99	23,14	23,95	23,40	25,55
Alto	191,45	192,63	190,72	189,91	188,67	188,05
Kappa	1,0	0,76	0,94	0,94	0,90	0,87
Acertos (%)	100	93,86	98,41	98,38	97,31	96,42
Classe	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
Muito baixa	0	0	0	0	0	0
Baixa	0	3,80	0	0	0,73	0
Média	2,54	12,72	0	0	12,47	0
Adequado	20,52	14,88	18,57	20,09	17,21	15,36
Alto	201,60	193,97	206,09	204,57	194,24	209,30
Kappa	0,57	0,48	0,45	0,48	0,51	0,41
Acertos (%)	90,31	86,80	88,46	88,77	87,69	88,27

#### 4.6 NDVI da cultura da soja e correlações

Os dados descritivos de NDVI da cultura da soja de 2021/2022 indicam uma evolução dos valores médios até a data de 18/01/2023 (Quadro 12), estando por volta de estágio R6. Pois na data de 23/01/2022 já ocorre diminuição do índice com indicativo do início da maturação estando em estágio R7.

QUADRO 12. Estatística descritiva do NDVI.

Parâmetros	Datas				
	04/11/2021	04/12/2021	18/01/2022	23/01/2022	07/02/2022
Média	0,17	0,64	0,71	0,58	0,32
DP <sup>1</sup>	0,05	0,10	0,10	0,15	0,14
Mínimo	0,04	0,15	0,23	0,25	0,14
Máximo	0,85	0,88	0,93	0,92	0,89
CV <sup>2</sup> (%)	29,41	15,62	14,08	25,86	43,75

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Os valores de coeficientes de variação (CV) são considerados médios, conforme Pimentel-Gomes e Garcia (2002), para as datas de 04/12/2021 e 18/01/2022, altos para as datas de 04/11/2021 e 23/01/2022 e muito alto para 07/02/2022.

A distribuição do NDVI na área (Figura 19) demonstra que mesmo com a semeadura em 10-12/10/2021, na primeira imagem (04/11/2021) ainda não foi possível observar de maneira expressiva na área a cultura da soja. Mas em 04/12/2022, quase dois meses pós a semeadura, já foi possível verificar o desenvolvimento da cultura chegando em 18/01/2022 com o maior grau de expressão do índice. A partir dessa data já se observa a diminuição dos valores dos índices nas áreas mais a sudoeste, noroeste e norte, devido ser a área mais alta (Figura 1) e menor valor de argila (Figura 2a) para a área.

Trindade et al. (2019), estudando correlação de atributos químicos do solo com produtividade da cultura da soja, encontraram que o NDVI obteve correlação elevada para predição de produtividade de grãos no estágio fenológico R2 da cultura. Bredemeier et al. (2013) relataram que a banda do infravermelho próximo, utilizada no cálculo do NDVI, tende a estimar o grau de acúmulo de biomassa, pode relacionar mais com a componente da produtividade de grãos da cultura.

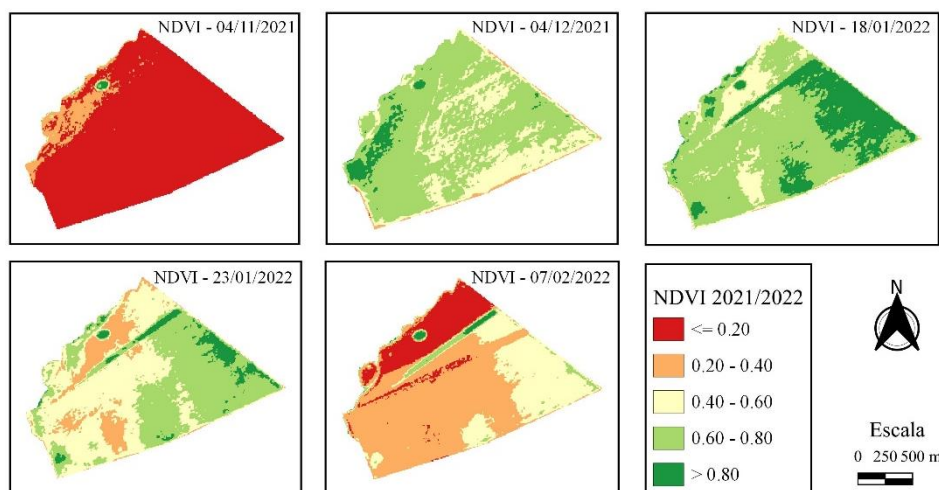


FIGURA 19. NDVI da cultura da soja nas datas de 04/11/2021, 04/12/2021, 18/01/2022, 23/01/2022 e 07/02/2022.

Cabe relatar que na safra 2021/2022 a cultura da soja submeteu-se a um período de baixo índice pluviométrico em dezembro (Figura 20) que fez com grande parte da área o índice de vegetação (Figura 19) não chegasse ao nível de saturação ( $>0,8$ ). Segundo Seixas et al. (2020), quando há baixa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura as lavouras de soja não conseguem expressar o seu máximo potencial produtivo.

Sampaio et al. (2021), analisando o NDVI na cultura da soja, observaram que em regiões onde havia irrigação, o valor do índice mantinha-se elevado, levando aos autores afirmarem a maior atividade fotossintética da cultura. Rosa et al. (2020) relatam que o estresse hídrico na fase reprodutiva da cultura da soja pode acarretar dentre outras consequências, a senescência foliar e diminuir a produtividade da cultura.

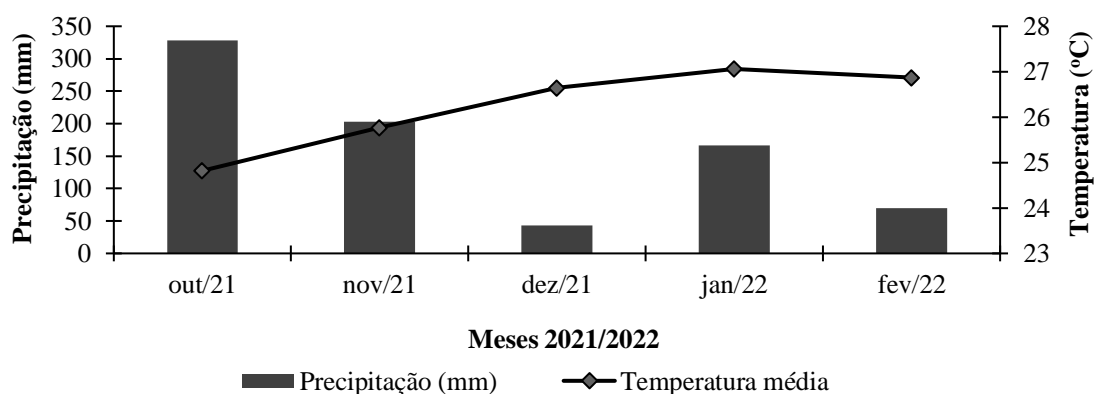


FIGURA 20. Gráfico de precipitação acumulada e temperatura média para meses de 2021/2022. Fonte: Agritempo (2023).

QUADRO 13. Correlação linear do NDVI da cultura da soja com os atributos químicos do solo.

Parâmetros	Grade 1:1					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
P	0,12**	0,15**	0,11**	0,11**	0,11**	0,09**
K	0,35**	0,35**	0,33**	0,34**	0,33**	0,36**
V%	0,45**	0,45**	0,45**	0,45**	0,43**	0,42**
CTC	0,54**	0,55**	0,54**	0,55**	0,55**	0,55**
Parâmetros	Grade 1:4					
	50%	40%	30%	20%	10%	0
P	0,05**	0,03**	0,07**	0,08**	0,10**	0,12**
K	0,36**	0,37**	0,35**	0,30**	0,29**	0,26**
V%	0,47**	0,48**	0,46**	0,43**	0,43**	0,44**
CTC	0,56**	0,58**	0,58**	0,55**	0,53**	0,54**

\*\* Significativo a 1% pelo teste p ( $p > 0,01$ )

As correlações observadas de P em relação aos valores de NDVI do dia 04/12/2022 da cultura da soja foram significativas, mas muito fraca (QUADRO 13), tanto na grade de 1:1 quanto 1:4. Esse fator deve-se pela alta concentração do elemento no solo devido a adubação localizada. Zanzarini et al. (2013), não encontram correlação dentre o atributo P e o NDVI na cultura da cana-de-açúcar.

Com relação ao K, CTC e V% (Quadro 13) houve correlação significativa em todas os arranjos amostrais. Para o K a correlação foi fraca, para CTC e V% a correlação foi moderada, segundo classificação de Ferreira (2018). Santos et al. (2021) avaliaram a correlação dentre NDVI e atributos químicos da cultura da soja e obtiveram resultado semelhante quanto a saturação de bases (V%) e quanto ao P e CTC e K, o coeficiente de correlação linear foi não significativo.

## 5 CONCLUSÕES

As grades 1:4 foram satisfatórias para determinar a variabilidade espacial da CTC e V e recomendação de calagem e recomendação de P, com destaque na malha 1:4 + 50% para CTC e 1:4 + 10% no mínimo para recomendação de P.

As grades 1:1 são necessárias para determinar a variabilidade do P e K, com destaque de na malha 1:1 + 30% para P e 1:1 + 40% para K.

A correlação de NDVI com P foi muito fraca, fraca para K e moderada para CTC e V.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRITEMPO. **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/> Acesso em: 03 de jan. 2023.

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, p.246-254, 2014.

ALBA, E.; DE SOUZA ALEXANDRE, M. L.; MARCHESAN, J.; DE SOUZA, L. S. B.; BEZERRA, A. C.; ARA, E. S. Comparação entre Algoritmos de Aprendizado de Máquina para a Identificação de Floresta Tropical Sazonalmente Seca. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, 2022.

AMADO, T. J. C.; PES L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 831-843, 2009.

ARAÚJO, C. A. D. S.; RUIZ, H. A.; SILVA, D. J.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ V, V. H.; BAHIA FILHO, A. F. D. C. Eluição de fósforo em relação ao tempo de difusão em colunas com agregados de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 24-30, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AGRICULTURA DE PRECISÃO (AsBraAP). Comissão brasileira de agricultura de precisão Disponível em: <http://www.asbraap.org/index.php?page=ap#:~:text=Agricultura%20de%20Precis%C3%A3o%20C3%A9%20uma,de%20recursos%2C%20produtividade%2C%20qualidade%2C>. Acesso em: 01 de fev. 2023.

BATISTA, M.A.; INOUE, T.T.; ESPER NETO, M.; e MUNIZ, A.S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., e GOTO, R., **comps. Hortaliças-fruto** [online]. Maringá: EDUEM, p. 113-161, 2018.

BEZERRA, U. A.; DE OLIVEIRA, L. M. M.; CANDEIAS, A. L. B.; DA SILVA, B. B.; DE SOUSA LEITE, A. C. L.; DE SOUZA SILVA, L. T. M. Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI – Satélite Sentinel-2 em Região Semiárida. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ** I. v. 41, p. 167–177, 2018.

BOLTON, D. K.; FRIEDL, M. A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.173, p. 74-84, 2013.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n.1, p. 1 – 9, 2013.

BREDEMEIER, C., VARIANI, C., ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial

produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v. 43, p. 1147-1154, 2013.

BRIGNOLI, F. M.; de SOUZA JUNIOR, A. A.; GRANDO, D. L.; MUMBACH, G. L.; PAJARA, F. F. D. Atributos biométricos da soja influenciados pelo nível de pH do solo. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 2, p. 13-28, 2020.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CARNEIRO, J. S. S.; DOS SANTOS, A. C. M.; FIDELIS, R. R., DA SILVA NETO, S. P.; DOS SANTOS, A. C.; DA SILVA, R. R. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 14, n. 2, 2016.

CAVALINI, P. F.; SEVILHA, A.; CRUZ, R. M. S. D.; & ALBERTON, O. Resposta Da Soja À Épocas De Aplicação De Potássio Em Cobertura. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR**, v. 21, n. 1, p.23-28, 2018.

CAVALCANTE, E. G. S; ALVES, M. C.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, v. 37, p. 394-400, 2007.

CAZOTTI, M. M., COSTA, L. M. da; CECON, P. R. Biogenic, sedimentary, and metamorphic limestone: a comparative characterization of soil amendment. **Revista Ceres**, v. 66, n., pp. 63-71, 2019.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, p. 1161-1164, 2003.

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

COELHO, E. C.; SOUZA, E. G. D.; URIBE-OPAZO, M. A.; PINHEIRO NETO, R. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009.

COELHO, D. S., CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 755-764, 2012.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and psychological measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960.

CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; TECCHIO, M. A. Aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 43, n. 9, p. 1209–1219, 2008.

COSTA, J. P.; BARROS, N. F. D.; ALBUQUERQUE, A. W. D.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828–835, 2006.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Elementos requeridos a nutrição de plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 3, p. 96-99.

DALCHIAVON, F. C.; RODRIGUES, A. R.; DE LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; MONTANARI, R. Spatial variability of chemical attributes of soil cropped with soybean under no-tillage. **Revista de Ciências Agroveterinarias**, v. 16, n. 2, p. 144–154, 2017.

DE OLIVEIRA, L. C. A.; CARNEIRO, M. D. A.; LITTER, F. A.; DE CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; CAIONE, G. Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1-15, 2021

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A. D.; CASSOL, P. C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 393-401, 2007.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 36, p. 1419-1424, 2001.

FERREIRA, P. V. Regressão e correlação. In: FERREIRA, P. V. **Estatística Experimental aplicada às ciências agrárias**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2018. p. 189 - 217.

FERRAZ, G. A.; SILVA, F. M. D.; OLIVEIRA, M. S. D.; CUSTÓDIO, A. A. P., FERRAZ, P. F. P. Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira1. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, p. 81-91, 2017.

FONSECA, L. M. G. Processamento digital de imagens. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**, 2000. 105p.

GUARÇONI M, A.; ALVAREZ V, V. H.; NOVAIS, R. F.; CANTARUTTI, R. B.; LEITE, H. G; FREIRE, F. M. Definição da dimensão do indivíduo solo e determinação do número de amostras simples necessário à sua representação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 943–954, 2006.

GUEDES, L. P.; BASTIANI, F. D.; URIBE-OPAZO, M. A. Comparação de mapas temáticos de diferentes grades amostrais para a produtividade da soja. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 4, p. 733–743, 2015.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura



de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, Embrapa, cap. 5, p. 74-83, 2014.

NASCIMENTO, R. J. A.; DE OLIVEIRA, F. P.; SANTOS, D.; BEIRIGO, R. M.; FRANCISCO, P. R. M.; DE ALMEIDA NASCIMENTO, R. R. Selamento superficial e formação de crosta em solos representativos do Estado da Paraíba. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n. 3, p. 79–93, 2019.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**. v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LANGE, A. et al. Adubação Potássica E Seu Efeito Residual No Sistema Soja-Milho Safrinha Em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 2, p. 192–205, 2019.

LEMOS FILHO, L. C. A.; OLIVEIRA, E. L. DE; FARIA, M. A. DE; ANDRADE, L. A. DE B. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*saccharum officinarum* l.). **Revista ciência agrônômica**, v.39, p.193-202, 2008.

LOBATO, E.; SOUSA, D. M. G. Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004., 2004.

LOPES, J. S L.; AGUIAR, K. A. S; OLIVEIRA, F. I.; DANTAS, J. S. Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo amarelo distrocoeso em diferentes densidades de amostragem. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 2, p. 29-42, 2020.

MAPA. Principais conceitos e expressões utilizados na agricultura de precisão - ap. n. 61, p. 1, 2017.

MATOS, C. H. L.; MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; NASCIMENTO, P. P. R. R.; PEREIRA, R. A. Phosphorus adsorption in soils under forest and savanna from Northern Amazon, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 5, p. 2909–2919, 2017.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva Mineral do Solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações. 1ed. Viçosa-MG: **Sociedade brasileira de ciências do solo** (sbcs). 2019. V.p. 283-285

MELO, F. M. de; MENDONÇA, L. P. C. de. Avaliação da disponibilidade de fósforo em solo argiloso com diferentes teores de matéria orgânica. **Humanidades e Tecnologia (FINOM)**, v. 18, n. 1, p. 52-67, 2019.

MENEZES, A.A; SOUZA JUNIOR, J.O.; SODRÉ, G.A.; SANTOS, J.A.G.; SOUZA, L.S. avaliação de métodos para estimativas da necessidade de calagem em solos do estado da Bahia, Brasil. **Agrotropica**, v. 31, n.3, p. 197-204, 2019.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2015. 238

MORATO, L. X. DE O.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, V. A. Variabilidade espacial de atributos químicos da fertilidade do solo da fazenda Varginha / Variabilidade espacial de atributos químicos da fertilidade do solo da fazenda Varginha. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 119119–119135, 2021.

MOTOMIYA, A. V. de A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 485-496, 2006.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação Solo-Planta. In: NOVAIS, R. F.; ALAVAREZ, V H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do Solo. 1 ed. Viçosa-MG: **Sociedade brasileira de ciências do solo** (sbcs), 2007. VIII, p.153.

OLIVEIRA, R. B. DE.; LIMA, J. S. DE S.; XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; SILVA, S. DE A., & SILVA, A. F. DA. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 176-186, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000100018>

OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 439–445, 2004.

PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.d.; COELHO, A.L.d.F.; COSTA, M.M.; Grift, T. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. **Agronomy** 2022, 12, 1350.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

PINHEIRO, J. B.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; MOREIRA, A. D. S.; ALVES, M. C. Severidade da ferrugem da soja em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 43–50, 2011.

QGIS.org. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. Disponível em: <http://www.qgis.org> Acesso em: 10 fev. 2022.

RAGAGNIN, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G. D.; SILVEIRA NETO, A. N. D. Recomendação de calagem a taxa variada sob diferentes intensidades de amostragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 600-607, 2010

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo: **Agropecuária Ceres**, 1991. 343 p.

RESENDE, J.M.A; JUNIOR MARQUES, J; MARTINS, M.V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p.1077-1090, 2014

RESENDE, A. V.; GIEHL, J.; SIMÃO, E. D. P.; ABREU, S. C.; FERREIRA, A. D. B.; BORIN, A. D. C.; MARRIEL, I. E.; MELLO, I.G.; MARQUES, L. S; GONTIJO NETO, M. M. Créditos de nutrientes e matéria orgânica no solo pela inserção do capim braquiária em sistemas de culturas anuais. Sete Lagoas: Embrapa, 2021. (**Circular técnica 277, Embrapa**)

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENUÍ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703–1713, 2015.

ROSA, V. do R.; SILVA, A. A. da.; BRITO, D. S.; PEREIRA JÚNIOR, J. D.; SILVA, C. O.; DAL-BIANCO, M.; OLIVEIRA, J. A. de.; RIEIRO, C. Estresse hídrico durante a fase reprodutiva de duas linhagens de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, 2020.

PEREIRA, L. M.; SANTOS, S. C. C. C.; NASCIMENTO, J. M.; SECRETTI, M. L. Correlação Da Produtividade Da Soja Com Os Atributos Químicos Do Solo E O Ndvi, 2021. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 430-438, 2021.

SAMPAIO, M. I. R.; KUNZ, A.; HILLEBRAND, F. L.; ZAMBERLAN, J. F.; IDALINO, F. D. Análise dos índices de vegetação NDVI e NDRE em imagens obtidas por meio de sensor embarcado em um RPAS para as culturas da soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) irrigados. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 9, n. 4, p. 350-362, 2021.

SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 347 p.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. D. C.; DUCATI, J. R.; DE OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. D. F. Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. DE C. (Ed.). **Agricultura de Precisão: Resultados de um novo olhar**. 2. ed. Brasília: [s.n.]. p. 596.

SILVA NETO Silva, V. L.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ALVES, M V. G; SILVA, D D.; PEREIRA, S. B. Mapeamento de Chuvas Intensas para o Estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Meteorologia [online]**. 2020, v. 35, n. 1 [Acessado 15 dezembro 2022], pp. 1-11. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-7786351017>>. Epub 27 Abr 2020.

SILVA, S. R.; DE BARROS, N. F.; DE SOUZA, C. M. Fluxo difusivo de fósforo e zinco influenciado pela compactação de dois Latossolos. **Ceres**, v. 55, n. 6, 2015.

SOUSA, D. M. G; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALAVAREZ, V H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do Solo.1 ed. Viçosa-MG: **Sociedade brasileira de ciências do solo (sbcs)**, 2007. VIII, p.153.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: **Correção do solo e adubação**. (2ª ed.).

Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

SOUZA, Z.M. de; SOUZA, G.S. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, v.44, p.261-268, 2014.

TISSI, J. A.; CAIRES; E. F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semedura direta de milho. **Bragantia**, v. 63, p. 405-413, 2004.

TRINDADE, F. S.; ALVES, M. C., NOETZOLD, R.; ANDRADE, I. C. de; POZZA, A. A. A. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, 2019.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução À Agricultura De Precisão: Conceitos E Vantagens. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 159–163, 2002.

VALENTE, I. Q. M.; FONTENELLI, J.; BRASCO, T. L. A. F.; e AMARAL, L. R. Eficiência da amostragem em grade para a caracterização da disponibilidade de potássio no solo. In: **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão–ConBAP**. 2018.

VIAN, A. L., BREDEMEIER, C., DA SILVA, P. R. F., SANTI, A. L., DA SILVA, C. P. G., & DOS SANTOS, F. L. Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 1, p. 91-100, 2018

VINHA, A. P. C.; CARRARA, B. H.; SOUZA, E. F. S.; DOS SANTOS, J. A. F.; ARANTES, S. A. C. M. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais Phosphorus adsorption in soils of tropical regions. **Nativa - Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 9, p. 30–35, 2021.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic. p. 319-344, 1980.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C.; BRANDÃO, F. J.; TEIXEIRA, D. D. Spatial correlation of the vegetation index (NDVI) of a Landsat/ETM+ images with soil attributes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.