

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM
LATOSSOLO VERMELHO SOB CANA-DE-AÇÚCAR EM
CERES (GO)

Autora: Isabela Larissa Alves Silva
Orientador: Prof. Dr. Roriz Luciano Machado
Coorientador: Dr. Ariel Muncio Compagnon

CERES - GO
Agosto – 2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM
LATOSSOLO VERMELHO SOB CANA-DE-AÇÚCAR EM CERES
(GO)

Autora: Isabela Larissa Alves Silva
Orientador: Prof. Dr. Roriz Luciano Machado
Coorientador: Dr. Ariel Muncio Compagnon

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO, ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação no Cerrado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres – Área de concentração Tecnologias de Irrigação.

CERES – GO
Agosto – 2021



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Formulário 43/2021 - DREPG-CE/NPG-CE/GPPI/CMPCE/IFGOIANO

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

**MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM LATOSSOLO VERMELHO
SOB CANA-DE-AÇÚCAR EM CERES (GO)**

Autora: Isabela Larissa Alves Silva

Orientador: Prof. Dr. Roriz Luciano Machado

TITULAÇÃO: Mestre em Irrigação no Cerrado – Área de Concentração:
Irrigação

APROVADO em: 31 de agosto de 2021.

Prof. Dr. Wilk Sampaio de Almeida

Prof. Dr. Joaquim José Frazão

Avaliador externo

IF Rondônia – Campus Ariquemes

Avaliador externo

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Roriz Luciano Machado

Presidente da banca

IF Goiano - Campus Ceres

Documento assinado eletronicamente por:

- **Wilk Sampaio de Almeida, Wilk Sampaio de Almeida - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Rondônia (1)**, em 31/08/2021 18:12:20.
- **Joaquim José Frazão, Joaquim José Frazão - Professor Avaliador de Banca - Ufma (06279103000119)**, em 31/08/2021 18:12:17.
- **Roriz Luciano Machado, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 31/08/2021 18:10:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 301600

Código de Autenticação: 1d57c5a61b



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Ceres

Rodovia GO-154, Km.03, Zona Rural, None, CERES / GO, CEP 76300-000

(62) 3307-7100

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Isabela Larissa Alves Silva

Matrícula: 2019103330640143

Título do Trabalho: MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM LATOSSOLO VERMELHO SOB CANA-DE-AÇÚCAR EM CERES (GO)

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: __/__/__

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

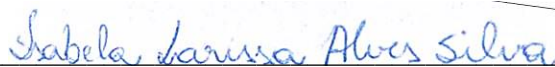
DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

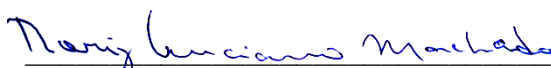
Ceres – GO ,
Local

18 / 01 / 2022.
Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 31/2021 - DREPG-CE/NPG-CE/GPPI/CMPCE/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 31 dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte um, realizou-se a Defesa de Dissertação da acadêmica **Isabela Larissa Alves Silva**, do Curso de Mestrado Profissional em Irrigação no Cerrado, número de defesa 046, matrícula 2019103330640143, RG 6054293 SSP-GO, CPF: 018.668.761-39, cuja dissertação intitula-se "**Mapeamento de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres (GO)**". A defesa iniciou-se às 13 horas e 30 minutos, finalizando-se às 17 horas e 33 minutos, onde a banca examinadora considerou o trabalho Aprovado, estando apto para fins de conclusão da Dissertação, devendo o acadêmico apresentar no prazo de sessenta (60) dias a versão final corrigida conforme considerações da banca, encadernada em capa dura e em formato digital (PDF) gravado em CD, acompanhado do termo de autorização para publicação eletrônica (devidamente assinado pelo autor), para posterior inserção no Sistema de Gerenciamento do Acervo e acesso ao usuário via internet. Os integrantes da banca examinadora assinam a presente ata.

Prof. Dr. Roriz Luciano Machado

(Presidente da Banca- IF Goiano - Campus Ceres)

Prof. Dr. Wilk Sampaio de Almeida

(Avaliador externo - IF Rondônia - Campus Ariquemes)

Prof. Dr. Joaquim José Frazão
(Avaliador externo - Universidade Estadual do Maranhão)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Wilk Sampaio de Almeida, Wilk Sampaio de Almeida - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Rondônia (1)**, em 31/08/2021 17:39:54.
- **Joaquim José Frazão, Joaquim José Frazão - Professor Avaliador de Banca - Ufma (06279103000119)**, em 31/08/2021 17:38:04.
- **Roriz Luciano Machado, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 31/08/2021 17:36:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 301622

Código de Autenticação: f5799212b8



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Ceres
Rodovia GO-154, Km.03, Zona Rural, None, CERES / GO, CEP 76300-000
(62) 3307-7100

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e
profissional,
OFEREÇO

À minha família, pelo incentivo e apoio a minhas conquistas,
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria, coragem e saúde para enfrentar esse desafio e não me deixar desistir nos momentos em que as dificuldades pareciam maiores que minha força.

Aos meus pais Maria das Graças Silva e Gilberto Alves Teixeira e a minha irmã Isadora Letícia Alves Silva, pelo apoio e conselhos que sempre me levaram a boas decisões.

Aos meus amigos Rui Vieira da Silva Junior e Jaqueline Costa de Souza, por sempre estarem ao meu lado, incentivando minhas conquistas.

Ao meu orientador, professor Dr. Roriz Luciano Machado, pelo incentivo e orientação durante a execução desta pesquisa.

Ao meu coorientador, Dr. Ariel Muncio Compagnon, pelo suporte oferecido e ensinamentos que resultaram na conclusão do trabalho.

Aos membros da banca, pela colaboração e engrandecimento desse trabalho.

Ao bolsista Patriky Rangel Leal Santana, pelo auxílio, companheirismo e comprometimento, de fundamental importância para a realização da pesquisa.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Ceres e seus colaboradores, por terem proporcionado todo o suporte para a realização do experimento.

Aos professores do Programa de Mestrado em Irrigação no Cerrado, pela experiência, paciência e ensinamentos compartilhados, fundamentais à minha formação.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação, meus sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Isabela Larissa Alves Silva, filha de Maria das Graças Silva e Gilberto Alves Teixeira, nascida na cidade de Goianésia, Goiás, em 27 de março de 1996. Ingressou na Universidade Estadual de Goiás em 2013, onde obteve o título de Bacharel em Engenharia Civil no ano de 2017. Em 2018, realizou uma pós-graduação em Gestão Ambiental na mesma Universidade. Em 2019, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Irrigação no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, na área de concentração Tecnologias de Irrigação, concluindo em agosto de 2021.

RESUMO

SILVA, ISABELA LARISSA ALVES. Instituto Federal Goiano – Campus Ceres – GO, Agosto de 2021. **Mapeamento de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres (GO)**. Orientador: Dr. Roriz Luciano Machado, Coorientador: Dr. Ariel Muncio Compagnon.

O mapeamento de características físico-hídricas do solo pode contribuir para irrigação de precisão na cultura da cana-açúcar na região do Vale de São Patrício. O objetivo desse trabalho foi determinar e espacializar atributos físico-hídricos em área de cana-de-açúcar na Unidade de Pesquisa em Cana-de-Açúcar em Ceres (GO). O experimento compreendeu uma área de 285 x 60 m com malha amostral de 15 m, na qual foi realizada amostragem deformada e indeformada de solo de janeiro de 2020 a janeiro de 2021. Os atributos avaliados foram argila (ARG), areia (ARE), silte (SIL), densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), porosidade total (PT), macroporosidade (macro), microporosidade (micro), retenção de água na capacidade de campo (CC), retenção de água no ponto de murcha permanente (PMP) e disponibilidade total de água (DTA). Foram aplicadas as estatísticas descritivas média, desvio padrão, variância, moda, mediana, máximo e mínimo, curtose e normalidade, além da correlação de Pearson. Para obtenção dos semivariogramas, os dados foram ajustados a modelos teóricos, sendo selecionado o melhor modelo e aplicada a técnica de validação cruzada. As variáveis com variabilidade espacial foram interpoladas por krigagem ordinária e, em seguida, feitos os mapas de iso-ocorrência. A análise exploratória mostrou que a argila variou de 367,1 a 578,3 g kg⁻¹, com média de 490,2 g kg⁻¹, sendo o solo classificado como argiloso. DTA variou de 0,15 a 1,14, com média de 0,53 mm cm⁻¹. Macroporosidade apresentou altos valores de coeficiente de variação (%CV), enquanto Dp, areia, CC, Ds e microporosidade foram baixas. Todos os atributos físicos mostraram moderada a forte dependência espacial, com ajustes

predominantemente aos modelos gaussiano para granulometria e exponencial e esférico para as demais, com alcances variando de 15,4 a 191,9 m. Dp apresentou pouca diferença nas profundidades nos mapas. Os atributos Ds, silte, micro e PT apresentaram maior homogeneidade na área. A geoestatística é a técnica adequada na interpolação e mapeamento de características físico-hídricas, auxiliando também na amostragem de solo na área em futuros estudos. Os resultados de variabilidade espacial de DTA permitem definir duas unidades de manejo e evidenciam que o solo em estudo apresenta baixa retenção de água na faixa da água disponível. O estudo fornece informações que possibilitam tomadas de decisão no manejo de irrigação e descompactação do solo.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*. Água no solo. Física do solo. Variabilidade espacial.

ABSTRACT

SILVA, ISABELA LARISSA ALVES. Instituto Federal Goiano (Goiano Federal Institute), Ceres Campus, Goiás State (GO), Brazil, August 2021. **Mapping of physical-water attributes in an Oxisol under sugarcane cultivation in Ceres municipality, Goiás State (GO), Brazil.** Advisor: Prof. Dr. Machado, Roriz Luciano. Coorientador Co-advisor: Prof. Dr. Compagnon, Ariel Muncio.

The mapping of soil physical and water characteristics can contribute to precision irrigation in sugarcane cultivation in the São Patrício valley region, Ceres Municipality, Goiás State (GO) Brazil. This paper aimed to determine and spatialize physical-hydric attributes in the sugarcane area at the Sugarcane Research Unit in Ceres (GO). The experiment comprised an area of 285 x 60 m with a 15 m sampling grid, in which a deformed and undisturbed soil sampling was carried out from January 2020 to January 2021. The evaluated attributes were: (a) clay (ARG); (b) sand (ARE); (c) silt (SiL); (d) soil density (Ds); (e) particle density (Dp); (f) total porosity (Pt); (g) macroporosity (macro); (h) microporosity (micro); (i) water retention in field capacity (FC); (j) water retention in the permanent wilting point (PWP); and (k) total water availability (TWA). Descriptive statistics were applied (mean, standard deviation, variance, mode, median, maximum, minimum, kurtosis, and normality) in addition to the Pearson correlation. The data were adjusted to theoretical models to obtain the semivariograms, selecting the best model, and the cross-validation technique was applied. Variables with spatial variability were interpolated by ordinary kriging and then iso-occurrence maps were made. The exploratory analysis showed that clay ranged from 367.1 to 578.3 g kg⁻¹ with an average of 490.2 g kg⁻¹, and the soil was classified as clayey. TWA ranged from 0.15 to 1.14 with a mean of 0.53 mm cm⁻¹. Macroporosity showed high coefficients of variation (%CV), while Dp, sand, FC, Ds, and microporosity were low. All physical attributes showed moderate to strong spatial dependence

with adjustments to Gaussian models predominantly for granulometry and exponential, and spherical for the others, ranging from 15.4 to 191.9 m. Dp showed little difference in depths on maps. The Ds, SiL, micro, and Pt attributes showed greater homogeneity in the area. Geostatistics is an appropriate technique in the interpolation and mapping of physical-water characteristics, also assisting in the area soil sampling in future studies. Results of TWA spatial variability allow defining two management units and show that the soil under study has low water retention in the available water range. This study provides information that enables decision-making in irrigation management and soil decompaction.

Keywords: *Saccharum officinarum*. Soil physics. Soil water. Spatial variability.

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Expectativa de produtividade de cana-de-açúcar (média de quatro cortes), em toneladas de colmo por hectare (TCH), nos ambientes de produção.....	5
Tabela 2 - Estatística descritiva para atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar na Unidade de Pesquisa em Cana-de-Açúcar (Usina CRV/IF Goiano – Campus Ceres) em Ceres – GO.....	20
Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as propriedades de um Latossolo Vermelho, nas profundidades de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m, em área de cana-de-açúcar em Ceres - GO.....	22
Tabela 4 - Parâmetros do ajuste experimental e do teste de validação para atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO.....	24

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Esquema de conteúdo de água no solo, com as quatro faixas de conteúdo de água e seus limites (FERREIRA, M., 2010)	9
Figura 2 - Modelo de semivariograma experimental ajustado (LUNDGREN, W.; SOUZA, I.; LUNDGREN, G., 2017)	13
Figura 3 - Localização do experimento pelo Google Earth (2019), com modificações	15
Figura 4 - Croqui do experimento, arquivo pessoal (2019)	16
Figura 5 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar argila (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,2 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO	25
Figura 6 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar silte (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO.....	26
Figura 7 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar areia (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,2 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO	26
Figura 8 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar densidade das partículas (kg dm^{-3}) nas camadas de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO	27
Figura 9 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar densidade do solo (kg dm^{-3}) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres – GO	28
Figura 10 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO	28

- Figura 11 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO 29
- Figura 12 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO 29
- Figura 13 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas condições de ponto de murcha permanente (a) e capacidade de campo (b), na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres – GO.. 30
- Figura 14 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar disponibilidade total de água (mm cm^{-1}) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO 31

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo /Sigla	Significado	Unidade de Medida
%	Porcentagem	
°C	Grau Celsius	
µm	Micrômetro	
CV	Coeficiente de variação	
dm	Decímetro	
kPa	Quilopascal	
NaOH	Hidróxido de Sódio	mol.L ⁻¹ .
mg	Miligrama	
g	Grama	
kg	Quilograma	
m	Metro	
h	Hora	
cm	Centímetro	
dm	Decímetro	
mm	Milímetro	

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Irrigação de Precisão	4
2.2 Caracterização de Ambientes para Irrigação de Cana-de-Açúcar	5
2.3 Água no Solo	6
2.3.1 Fatores relacionados à retenção e fluxo de água no solo: características físico-hídricas..	7
2.3.2 Potencial hídrico e potencial matricial de água no solo	8
2.3.3 Disponibilidade e capacidade de água no solo	9
2.4 Espacialização de Características Físico-Hídricas do Solo.....	10
2.5 Aspectos Gerais da Geoestatística	11
2.5.1 Ajuste, seleção e validação de semivariogramas	12
2.5.2 Dependência espacial	13
2.5.3 Interpolação geoestatística.....	14
2.5.4 Elaboração de mapas de iso-ocorrência	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1 Estatística Descritiva.....	19
4.2 Análise dos semivariogramas ajustados.....	23
4.3 Mapas de iso-ocorrência	25
5 CONCLUSÕES.....	32
6 REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os 10 países com maior extensão territorial irrigada no mundo. Cerca de 80% da área irrigada brasileira se concentra em Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Bahia. Em Goiás, a principal tecnologia implantada para irrigação, segundo AQUASTAT-FAO (2019), é o pivô central, entretanto, também são encontrados outros sistemas por aspersão, incluindo aspersão convencional e autopropelido.

As lavouras irrigadas se caracterizam pela intensificação dos cultivos, fato que acarreta acentuada utilização do solo. Desse modo, fazem-se necessários cuidados especiais no manejo do solo, das culturas e da água da irrigação, para que a qualidade do solo se mantenha, não modificando negativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas a ponto de reduzir a produtividade do solo (MICHELON *et al.*, 2009).

Atualmente, a aplicação de novas tecnologias no setor agrícola vem auxiliando a intensificação sustentável das culturas. Segundo Sanches, Graziano Magalhães e Junqueira Franco (2019), a agricultura de precisão trata a área de plantio levando em consideração a variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo. Para tanto, o uso de sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global aerofotogrametria, topografia, entre outros, compreende geotecnologias empregadas para a correta análise da variação dos atributos do solo.

Araújo, R., Goedert e Lacerda (2007) estudaram a qualidade de solos do cerrado sob diferentes usos e verificaram que o uso intensivo do solo é um contribuinte da redução na sua qualidade, tendo os indicadores físicos se mostrado os mais acertados para representar essa diferença.

A variabilidade espacial das propriedades físicas do solo dentro ou entre campos agrícolas é inerente à natureza, ocorrendo devido a fatores geológicos e pedológicos de formação do solo, assim como parte da variabilidade pode ser induzida pelo tipo de lavoura e das práticas de manejo adotadas (OLIVEIRA, I. *et al.*, 2015).

A caracterização dos solos quanto a seus aspectos físico-hídricos, segundo Fonsêca *et*

al. (2007), é fundamental para o entendimento das inter-relações solo/água/planta/atmosfera, que se apresentam como fatores imprescindíveis para o desenvolvimento adequado das plantas e para a elaboração de projetos de irrigação compatíveis com o meio ambiente.

O manejo da água no solo requer estudos mais aprofundados, que, para Gonçalves, Folegatti e Mata (2001), produzem estimativas mais confiáveis das propriedades hidráulicas do solo, sendo que as variabilidades das propriedades físicas do solo, tais como conteúdo de areia, argila e silte, densidade do solo, resultam em elevada variabilidade na retenção de água pelo solo.

O estudo das variações do solo de uma região, segundo Webster (1985), acontece há vários anos. A agricultura tem mostrado crescente incremento do uso de GPS (Global Positioning System), que, associado às técnicas de geoestatística, vem auxiliando a realização do mapeamento dos atributos qualitativos e quantitativos das características do solo, os quais estão ligados à produtividade das culturas (BOTTEGA, E. *et al.*, 2011). Dessa forma, as técnicas de geoestatística permitem quantificar a existência de variações espaciais dos diversos atributos físicos do solo, tais como a densidade do solo, umidade, porosidade e resistência à penetração, possibilitando uma descrição detalhada destas propriedades no tempo e no espaço (CAMPINAS *et al.*, 2013).

O conhecimento da variabilidade espacial de atributos físicos do solo em cultivos como o da cana-de-açúcar, que se apresentam fortemente tecnificados, é imprescindível no que tange à redução dos custos atrelados aos sistemas de produção (SOUZA, Z.; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, G., 2004).

O mapeamento dos atributos físicos do solo é necessário para um planejamento sustentável, de modo a poder serem avaliados os mecanismos de retenção e movimentação de água no solo, para o desenvolvimento de técnicas e manejos que promovam sua maior permeabilidade bem como o armazenamento da água no solo por mais tempo possível (GOMES, N. *et al.*, 2007).

Estudos dos atributos do solo vêm sendo desenvolvidos há muito tempo, incluindo o trabalho de Miranda, Lanças e Silva, R. (2007), que, ao estudarem as propriedades referentes à compactação do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, verificaram a necessidade do desenvolvimento de pesquisas nesse campo de modo a realizar o planejamento de práticas de manejo corretas e programas de amostragem eficientes.

Com base no exposto, o estudo da variabilidade dos atributos do solo em pequenas áreas auxilia na determinação do alcance das variações, permitindo, assim, que a geoestatística possa ser aplicada em grandes campos agrícolas de modo a fornecer parâmetros físico-hídricos

necessários para o manejo da irrigação e o bom desenvolvimento da cultura.

Este trabalho teve como hipótese que a área de estudo não se apresenta homogênea em todos os atributos físicos e que a determinação da variabilidade espacial e o mapeamento dos atributos podem contribuir para a tomada de decisão no manejo de irrigação do solo. Para verificar esta hipótese, o trabalho teve como objetivos analisar os atributos físico-hídricos, caracterizar a estrutura de dependência espacial e realizar a espacialização dos atributos avaliados na área de estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação de Precisão

O incremento da produção agrícola é verificado principalmente pelos avanços nas pesquisas acadêmicas bem como pelo desenvolvimento de novas tecnologias agrícolas. Entretanto, os riscos de mercado, as mudanças climáticas e os problemas hídricos de abastecimento tornam o mercado cada vez mais instável (LOPES, 2017).

Dessa forma, o planejamento na agricultura irrigada aborda a necessidade de atingir a eficiência global no uso de água para este fim, uma vez que 80% da água doce é direcionada para o suporte a mais de um terço da produção mundial de alimentos. Assim, a escassez de água doce é um dos principais desafios para o século XXI (HEDLEY *et al.*, 2013).

A irrigação de precisão é entendida como a prática de prover água às plantas em quantidade suficiente para proporcionar incremento na quantidade e na qualidade da produção, diminuindo os danos ao meio ambiente (OLIVEIRA, P., 2018), levando em consideração a variabilidade do solo e as necessidades específicas das culturas.

A utilização da agricultura de precisão vem sendo estudada de forma mais especializada em trabalhos como o de Fernández *et al.* (2018), trazendo o potencial de emprego dessa tecnologia em olivais, que responderam de forma positiva, em razão dos fatores limitantes de produção. Para tanto, deve-se fazer a escolha correta do sistema, método, estratégia e programação da irrigação, além do registro das exigências de cultivo da oliveira e das condições climáticas.

Em trabalhos em que foi comparado o uso de técnicas de irrigação convencional em relação à irrigação de precisão, verificou-se, segundo González Perea *et al.* (2018), que as simulações desenvolvidas demonstraram que a irrigação com taxa de aplicação variável, considerando uma metodologia de precisão, se mostrou bastante útil no manejo da irrigação,

pois, além de economizar água, reduziu as perdas por percolação profunda. Não obstante, o controle da água no solo na zona radicular proporcionou aumento no rendimento das culturas, principalmente durante a estação seca.

Atualmente, alternativas para diminuir os custos de implantação dessas tecnologias foram eficientemente utilizadas principalmente quanto aos custos de energia diminuídos pelo uso da energia solar. Quando são considerados os custos de implantação, a estimativa é de que estes podem ser satisfeitos em três períodos de colheitas. O sistema pode ser operado com o uso de celulares inteligentes, o que o torna acessível para operação remota. Por fim, com o auxílio do sistema de irrigação de precisão, a força de trabalho necessária pode ser reduzida em até 60 % em relação a outros sistemas (IŞIK *et al.*, 2017).

2.2 Caracterização de Ambientes para Irrigação de Cana-de-Açúcar

A produtividade da cana-de-açúcar é determinada pela combinação dos fatores clima, solo, variedades, manejo, tratos culturais, entre outros. Em relação ao solo, as melhores produtividades são alcançadas quando a variedade indicada ao seu ambiente de cultivo é utilizada em conjunto com um solo com propriedades físicas, químicas e biológicas adequadas (SANTIAGO; ROSSETTO, 2009).

Os levantamentos pedológicos conduzidos por produtores rurais até 1993 serviram como base para que Joaquim *et al.* (1994) definissem o termo ambiente de produção como a interação que ocorre entre as condições climáticas de uma região, principalmente precipitação, evapotranspiração e déficit hídrico, e as condições de solo da área de cultivo, tais como textura, profundidade e fertilidade. Dessa forma, as zonas de manejo são determinadas de maneira específica em função das características de cada ambiente (JOAQUIM *et al.*, 1994; PRADO, H. *et al.*, 2008).

Com base no trabalho de Joaquim *et al.* (1994), o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), utilizando de dados de mais de 10 anos, classificou os ambientes de produção de cana-de-açúcar em A, B, C, D e E, verificando a relação entre os diferentes tipos de solo e suas respectivas produtividades (BERTOLANI; JOAQUIM; DONZELLI, 2015). O potencial para o desenvolvimento e o rendimento da cana-de-açúcar decresce (Tabela 1).

Tabela 1 - Expectativa de produtividade de cana-de-açúcar (média de quatro cortes), em toneladas de colmo por hectare (TCH), nos ambientes de produção

(Continua...)

Tabela 1 - Expectativa de produtividade de cana-de-açúcar (média de quatro cortes), em toneladas de colmo por hectare (TCH), nos ambientes de produção

(Conclusão)

Ambiente de produção	Potencial de produtividade	TCH
A	Alto	≥ 95
B	Médio/Alto	90 – 95
C	Médio	85 – 90
D	Médio/Baixo	80 – 85
E	Baixo	≤ 80

Fonte: Bertolani, Joaquim e Donzelli (2015).

Um estudo de destaque em ambientes de produção, segundo Cavalcante e Prado, H. (2010), se refere ao conteúdo de água no solo, que, quando insuficiente, reduz de forma relevante a produtividade da cana-de-açúcar até mesmo em solos mais férteis, sendo um fator chave para a melhoria em solos com baixo potencial químico.

A irrigação é fator determinante para a melhoria do ambiente de produção no cenário agrícola atual, que, segundo Prado, H. *et al.* (2015), consegue tornar ambientes antes desfavoráveis em favoráveis de acordo com o atendimento da demanda hídrica e a ampliação da longevidade da cana-de-açúcar para 10 ou mais cortes.

2.3 Água no Solo

Um dos indicadores elementares de atributos físicos do solo é sua estrutura. Nesta perspectiva, são relacionados fatores como retenção e movimentação de água, desenvolvimento de raízes, difusão de gás e exigências da biota do solo. Todos os pontos citados fazem alusão ao sistema poroso do solo, já que os sistemas de preparo utilizados influenciam na sua qualidade (PIRES *et al.*, 2017).

A parte sólida dos solos, segundo Sampaio, E. (2011), é formada por uma fração mineral e uma orgânica. Segundo o autor, a parte mineral tem diferentes dimensões, diretamente relacionadas à granulometria, mineralogia e ao comportamento químico do solo. A mineralogia também é uma ferramenta de conhecimento e avaliação da gênese, do comportamento físico e químico do solo.

A movimentação e o conteúdo de água no solo são dependentes, em sua maioria, do tipo de argila e da sua textura, podendo variar em extremos: a areia apresentando partículas de até 2 mm e grandes espaços porosos e a argila com dimensões menores que 2 μm de diâmetro e pequenos espaços entre as partículas (KLEIN, C.; KLEIN, V., 2015).

O comportamento de alguns solos argilosos se assemelha aos arenosos em razão da sua estrutura forte, pequena e granular. Segundo Carvalho Júnior (2000), a maioria dos solos do bioma Cerrado é caracterizada pela presença de óxidos de ferro e caulinita, como os Latossolos férricos, que têm baixa retenção de água, colaborando para um comportamento semelhante ao dos solos arenosos.

Em solos irrigados, a água percola por gravidade através dos canais e poros, deslocando-os, podendo aprisionar ar nessas passagens. De acordo com a textura, a capacidade de retenção de água no solo pode variar em cerca de 25% (TAIZ *et al.*, 2017).

2.3.1 Fatores relacionados à retenção e fluxo de água no solo: características físico-hídricas

A compreensão das propriedades físico-hídricas de um solo é imprescindível para o entendimento do comportamento da água no solo, pois o preparo do campo para a implantação de uma cultura pode gerar alterações em razão do intenso revolvimento causado pelos tratamentos culturais (BRUNING *et al.*, 2017).

Também é de notável relevância que a caracterização dos aspectos físicos e hídricos do solo, segundo Fonsêca *et al.* (2007), é de fundamental importância para a compreensão das inter-relações solo/água/planta/atmosfera, importantes para o bom desenvolvimento das plantas, assim como o adequado planejamento da irrigação.

A retenção de água no solo se baseia na relação entre sucção e umidade volumétrica, representando a capacidade de armazenamento de água que tem o solo. Essa propriedade permite prever o provável comportamento do solo ainda não saturado quando submetido ao secamento, aumentando suas forças matriciais. Este atributo é verificado em função da estrutura, dos baixos valores potenciais definidos pela frequência de macro e microporos, granulometria e mineralogia das partículas nas altas tensões (SILVEIRA *et al.*, 2009).

O Manual de Métodos de Análise de Solo, de Teixeira, P. *et al.* (2017), define que os potenciais da água no solo que podem ser aplicados por sucção são usualmente 0 kPa, 1 kPa, 6 kPa, 10 kPa, 33 kPa, 100 kPa, 500 kPa e 1.500 kPa. Relacionando o potencial e a umidade, podem ser obtidas curvas características de retenção de umidade no solo e, assim, estabelecer a quantidade de água disponível.

Teixeira, P. *et al.* (2017) ainda citam que o ponto de murcha permanente (PMP) corresponde àquela umidade no potencial de 1500 kPa, e a capacidade de campo (CC) encontra-

se no potencial de 10 kPa ou 33 kPa. A água disponível (AD) para as plantas é dada pelo teor de água na CC menos o PMP.

A direção e a taxa de movimentação da água no solo e nas plantas dependem majoritariamente de diferença de níveis de energia entre dois locais ou condições. Por exemplo, solos úmidos têm a maior parte da água retida nos poros maiores ou como filmes espessos de água envolvendo as partículas. Dessa forma, a maioria das moléculas de água tem certa liberdade de movimento por não estarem firmemente retidas pela massa de solo. Em solos secos, a água está presente nos microporos e, por essa razão, tende a ter pouca liberdade de movimento, de modo que sua movimentação é menor por se encontrar em um estado de menor energia. Se colocada em contato, a água tende a ir de um estado de maior para um menor de energia, movendo-se da parte úmida para a seca (SPOSITO, 2008).

2.3.2 Potencial hídrico e potencial matricial de água no solo

O potencial hídrico (ou químico) da água, segundo Taiz *et al.* (2017), é a energia livre das moléculas de água no solo, o que rege seu fluxo no solo. Os três principais fatores que influenciam o potencial hídrico são a concentração, a pressão e a gravidade. Dessa forma, esse potencial é formado de acordo com a Equação (1):

$$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_g \quad (1)$$

Em que:

ψ - potencial hídrico;

ψ_s – potencial de soluto ou osmótico;

ψ_p – potencial de pressão; e

ψ_g – potencial gravitacional.

O potencial osmótico é o efeito dos solutos sobre o potencial hídrico, pois estes solutos reduzem a energia livre das partículas de água, diluindo-as. Seu valor é zero quando a água é pura e quase sempre tem valor negativo. Já o potencial de pressão é o efeito da pressão hidrostática sobre a energia livre da água. A pressão pode ser positiva, como em células túrgidas (pressão de turgescência), e alcançar valores negativos, comumente encontrados nos vasos do xilema de plantas transpirando. O potencial gravitacional é definido como a força de mesma intensidade, porém, de direção oposta, requerida para manter a água suspensa, apesar do efeito da gravidade (TAIZ *et al.*, 2017).

Quando são considerados os solos secos, podem ser encontrados referenciais ao potencial mátrico ou matricial. Nessas condições, a água é encontrada em uma película bem fina, ligada a superfícies sólidas por interações eletrostáticas.

2.3.3 Disponibilidade e capacidade de água no solo

O desenvolvimento e a produtividade das culturas são fortemente influenciados pela retenção e disponibilidade de água no solo. Em áreas não irrigadas, a água disponível no solo depende majoritariamente da distribuição da precipitação, práticas de manejo, além da sua capacidade de reter e disponibilizar água para a cultura de maneira adequada (REICHERT, J. *et al.*, 2011).

As características singulares de armazenamento de água no solo, segundo Marouelli *et al.* (2011), dependem do tamanho e da natureza das partículas, da quantidade de matéria orgânica, além da porosidade proporcionada pela disposição dos elementos estruturais. Entretanto, a água presente nos macro e microporos do solo não está totalmente disponível para as plantas, de modo que alguns parâmetros como a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a umidade do solo devem ser considerados.

De acordo com Ferreira, M. (2010), o conteúdo de água relaciona-se diretamente com a condutividade hidráulica, potencial matricial e drenabilidade do solo. Assim, o autor define quatro faixas de disponibilidade de água no solo (Figura 1).

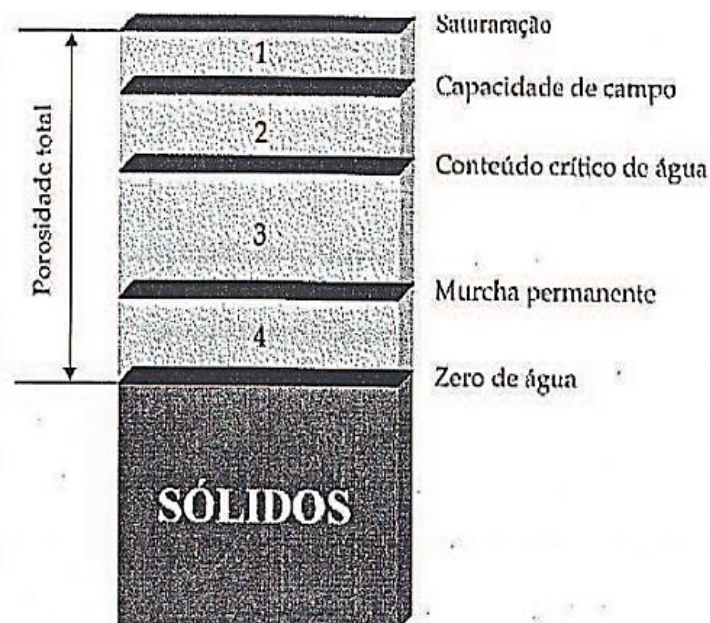


Figura 1 - Esquema de conteúdo de água no solo, com as quatro faixas de conteúdo de água e seus limites (FERREIRA, M., 2010)

Dessa forma, quando o conteúdo de água ultrapassa a capacidade de campo, apesar da alta disponibilidade de água para as plantas, esta tende a drenar muito rapidamente, reduzindo seu tempo para utilização na zona radicular. Com o solo úmido (entre CC e conteúdo crítico de água), o processo de drenagem se torna mais lento de modo que as plantas conseguem absorver a água de forma eficiente. A partir do conteúdo crítico de água até o PMP, a condutividade hidráulica torna-se limitante na extração de água pela planta. Nesse ponto, o solo está seco e a planta começa a fechar os estômatos, limitando seu desenvolvimento. Em gradientes muito altos de potencial, abaixo do PMP, o solo é muito seco e a sucção é insuportável para a planta (FERREIRA, M., 2010).

Além da estrutura e da natureza das partículas de solo, um atributo bastante relevante para determinar a capacidade de armazenamento de água é sua textura. Para a quantificação da umidade do solo comprovada em laboratório, as tensões matriciais variam em tensões matriciais da ordem de 5 kPa para solos de textura grossa e de 10 kPa para solos de textura fina (REICHARDT, 1988).

A estrutura do solo é descrita como o arranjo das partículas do solo que pode resultar na formação de agregados, sendo dividido em macroestrutura, caracterizada conforme o tipo, grau e classe de estrutura (IBGE, 2007). Já no que concerne à microestrutura, ela se refere aos processos genéticos e à avaliação do intemperismo do solo, objeto de estudo da micromorfologia.

O comportamento físico-hídrico do solo é vinculado à distribuição dos poros no solo (RIBEIRO, K. *et al.*, 2007). Isso porque essa característica está relacionada com o volume de solo que pode ser ocupado pela água ou pelo ar, sendo importante fator para o estudo da movimentação e retenção de sólidos, solutos e ar no solo, conforme citado por Teixeira, P. *et al.* (2017).

A resistência à penetração e a densidade do solo (D_s) já foram estudadas por autores como Fernandes *et al.* (2018), que verificaram sua influência no espaço poroso, gerando consequências no crescimento e no rendimento das produções agrícolas. Os autores verificaram que em áreas de preparo intensivo do solo ocorreu degradação estrutural, aumentando a D_s e a resistência à penetração. Esse fato é corroborado por Novak, E. *et al.* (2017), que demonstram que o intenso uso do solo é um dos fatores limitantes para sua qualidade física, uma vez que a compactação gera perda da estabilidade estrutural.

2.4 Espacialização de Características Físico-Hídricas do Solo

Um dos métodos fundamentais para que a exploração das aptidões do solo ocorra da melhor forma possível é pelo levantamento e pela análise da espacialização dos atributos do solo. As tecnologias que vêm sendo utilizadas para essa finalidade visam a facilitar esse mapeamento de modo que possam ser implantados manejos e usos adequados aos atributos do solo (BERNINI, 2016).

Dessa forma, Oliveira Júnior (2016) cita que o uso sustentável e a preservação dos recursos naturais são positivamente influenciados pelo estudo dos atributos do solo, sendo, para a compreensão da dinâmica do solo, utilizados estudos estatísticos, com enfoque principal na geoestatística.

2.5 Aspectos Gerais da Geoestatística

Desde o início do século passado, pesquisadores têm mostrado preocupação na análise da variabilidade espacial dos atributos do solo. Anteriormente, a principal ferramenta utilizada era a estatística clássica, mas, para isso, havia necessidade de uma vasta quantidade de dados amostrais que fossem capazes de representar de maneira correta a porção do solo (PEREIRA, W., 2011). Posteriormente, descobriu-se a geoestatística como ferramenta mais eficiente, que leva em conta fatores como a distribuição espacial das amostras, se mostrando como ferramenta de análise principalmente para definir a correlação espacial das amostras (DE ASSIS CAROLINO *et al.*, 2019).

O surgimento da geoestatística se deu na África do Sul, cujo trabalho apresentado por Krige (1951) mostrou as etapas fundamentais para sua aplicação. Como as áreas de mineração têm diferentes concentrações de minérios, ao compilar os dados encontrados sobre ouro, verificou que, para que as variâncias nas concentrações fizessem sentido, deveria ser considerado o espaçamento amostral, verificando assim que a localização geográfica do ponto amostrado pode se relacionar à dependência espacial.

A geoestatística é compreendida, portanto, segundo Tolosana-Delgado *et al.* (2019), como um conjunto de ferramentas e de conceitos para a análise de dados que verifica a dependência ou independência dos atributos em relação à sua distribuição espacial da amostragem.

Assim, a caracterização do padrão espacial de atributos do solo é proporcionada por esse campo estatístico por meio de ferramentas descritivas como os semivariogramas. A krigagem, uma das técnicas de interpolação, viabiliza a correlação espacial entre os pontos

amostrados para estimar os valores que seriam encontrados em locais não amostrados. No geral, a geoestatística consegue avaliar a incerteza sobre a área não amostrada, geralmente resultando em mapas de probabilidade de ultrapassagem de valores críticos como critérios de qualidade do solo. Os mapas podem resultar no gerenciamento de áreas específicas do solo, o que contribui para a tomada de decisão quanto ao manejo adotado (GOOVAERTS, 1999).

2.5.1 Ajuste, seleção e validação de semivariogramas

A dependência espacial de atributos do solo é verificada pela geoestatística, em que, caso pontos geográficos próximos tenham valores similares, a dependência é comprovada (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Um fator de relevante importância para a correta representação da dependência espacial é a escolha do modelo de semivariograma adequado à situação, para que ele mostre a confiabilidade dos resultados advindos do processo de krigagem (VENDRUSCULO; CARVALHO, J., 2004).

O semivariograma mostra a correlação entre os parâmetros estudados, sendo, portanto, um componente imprescindível na estatística espacial. Dessa forma, a semivariância experimental é descrita conforme Equação 2 (TOLOSANA-DELGADO *et al.*, 2019).

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

Em que:

$\gamma(h)$ = semivariância amostral;

H = distância entre dois pontos x_i ;

x_i = ponto no plano cartesiano (X, Y) ;

z_{x_i} = valor do atributo no ponto x_i ;

x_{i+h} = ponto distanciado do ponto x_i pela distância h;

$Z_{x_{i+h}}$ = valor do atributo no ponto com distância h do ponto x_i ; e

$n(h)$ = número de pares de pontos com a distância h entre eles.

Para a confecção de semivariogramas experimentais (Figura 2) são necessárias amostragens em malha regular para que os valores encontrados sejam analisados em direções previamente estabelecidas. Dessa forma, uma vez encontrados os valores, verifica-se o modelo matemático que melhor se ajuste ao arranjo calculado. Os principais modelos utilizados são

aqueles incrementados conforme a distância amostral se estenda, até que atinja um patamar, ou seja, um valor médio onde se estabilizam os valores experimentais. Os principais modelos empregados são aqueles que têm “patamar” e podem ser reunidos em três funções - esférica, exponencial e gaussiana (CARNEIRO, 2018).

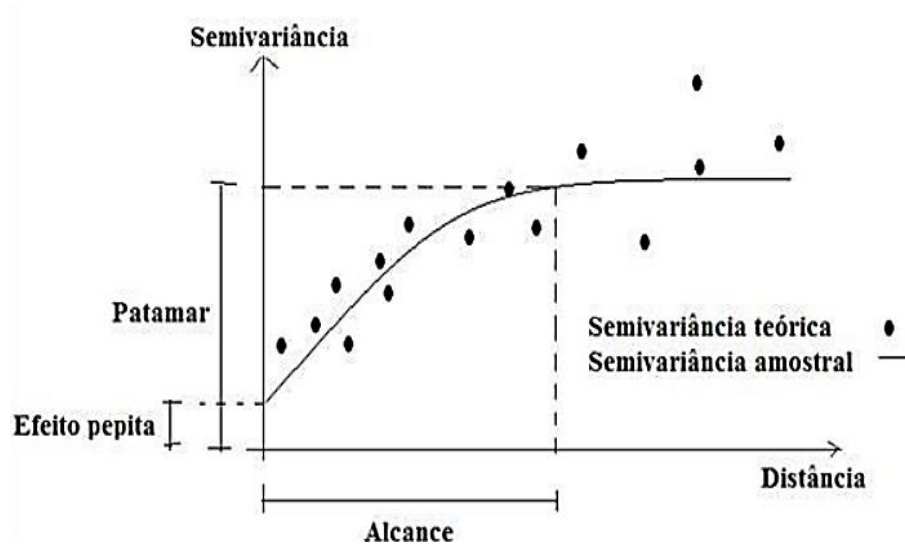


Figura 2 - Modelo de semivariograma experimental ajustado (LUNDGREN, W.; SOUZA, I.; LUNDGREN, G., 2017)

Após a realização do ajuste do semivariograma, são obtidos três parâmetros principais: o efeito pepita (C_0), que representa o valor da semivariância quando a distância entre os pontos é nula; o patamar (P), que equivale ao ponto de estabilidade da semivariância; e o alcance (A), que corresponde a distância até a qual pode se verificar a dependência espacial.

2.5.2 Dependência espacial

Um dos maiores pontos de atenção referentes à experimentação agrônômica é a avaliação das diferenças entre diversos tratamentos, feita geralmente por meio da estatística clássica. Muitas vezes o grau de variabilidade se mostra tão alto que pode acabar mascarando a análise estatística do experimento. Como o solo é usualmente considerado homogêneo, isso pode acarretar uma maior variabilidade. Entretanto, o coeficiente de variação não considera a coordenada geográfica do ponto amostrado, e para a análise com esse fator integrado, é relevante o uso da geoestatística (CARVALHO, J.; VIEIRA, S.; GREGO, 2009).

Dessa forma, o alcance da dependência espacial é muito importante na temática dos semivariogramas, sendo que, a partir da aplicação da krigagem ordinária, é possível criar mapas

de isso-ocorrência (SILVA, F. *et al.*, 2017).

2.5.3 Interpolação geoestatística

Ao analisar dados espaciais, um dos fatores problemáticos constantemente encontrados é a interpolação necessária para estimar os valores dos locais não amostrados. Os principais métodos de interpolação se baseiam em procedimentos básicos como o ponto mais próximo, ou métodos mais robustos, por meio de inferências estatísticas com o método da krigagem (BÁRDOSSY; LI, 2008).

Os interpoladores utilizados pela geoestatística são ferramentas eficientes, principalmente na estimativa de valores em pontos não amostrados. Com este instrumento, é possível estabelecer os resíduos dos erros e, assim, gerar superfícies interpoladas com precisão. Dessa forma, deve-se então garantir que as variáveis cumpram as exigências requeridas de uma “variável regionalizada”, que, entre os quesitos, são verificadas a necessidade de estacionaridade estatística de segunda ordem e a dependência espacial entre os pontos amostrados por meio das funções semivariográficas (SALGUEIRO; MONTENEGRO, 2008).

2.5.4 Elaboração de mapas de iso-ocorrência

Considerando os valores encontrados com a interpolação dos dados utilizando os semivariogramas, podem ser criados os mapas de iso-ocorrência, que são mapas de contorno que permitem a análise do comportamento do atributo até mesmo das partes não amostradas (KESTRING, 2011).

Souza *et al.* (2010) fizeram o mapeamento de atributos físicos e da matéria orgânica em Latossolos Vermelhos sob cana-de-açúcar e concluíram que os solos em estudo apresentavam características físicas de densidade do solo, resistência do solo à penetração e macroporosidade acima do ideal.

Gomes, J. *et al.* (2008), estudando a variabilidade espacial, o mapeamento de granulometria e as características químicas em solos com predomínio da classe dos Latossolos, puderam definir duas unidades de manejo para a área de estudo com base nos teores de argila e nos atributos químicos, que poderão ter práticas distintas de manejo da água e do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada se localiza no município de Ceres (GO) na Unidade de Pesquisa em Cana-de-Açúcar do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, e está compreendida entre as coordenadas geográficas 15°20'42``S e 49°36'19``W com 561 m de altitude, pertencendo à formação geológica Complexo Barro Alto. O clima do local é Aw de acordo com a classificação de Köppen e Geiger (1928), sendo caracterizado por inverno ameno e seco e verão quente e chuvoso. O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS, H. *et al.*, 2018).

A cultura de cana-de-açúcar foi implantada (reforma) em abril de 2018 com manejo convencional do solo, sendo utilizadas as cultivares RB92579 e SP 801816. O experimento teve como dimensões 285 x 60 m na cultura implantada, totalizando 1,71 ha (Figura 3). A área recebeu “irrigação de salvamento”, fornecida por autopropelido, com aplicação de 60 mm de água.

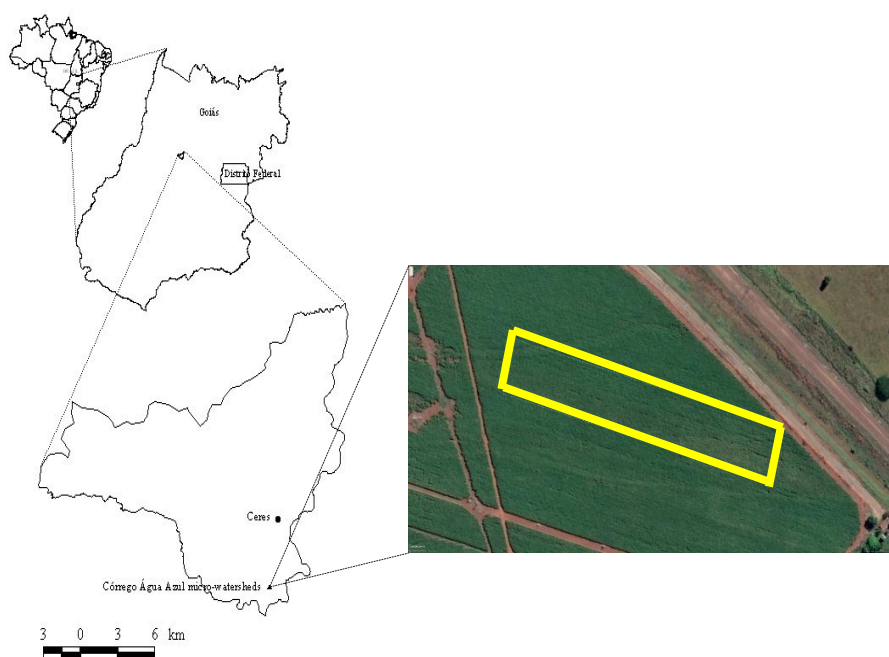


Figura 3 - Localização do experimento pelo Google Earth (2019), com modificações
Para a amostragem do solo, utilizou-se malha amostral com espaçamento entre os

pontos de 15 x 15 m, totalizando 100 pontos amostrais, conforme croqui da Figura 4. Foram georreferenciados alguns pontos na área com o auxílio de um GPS de precisão e transpostas as coordenadas de precisão para os demais pontos. As coordenadas foram determinadas no Sistema Universal Transverse Mercator (UTM) para a realização das medidas lineares.

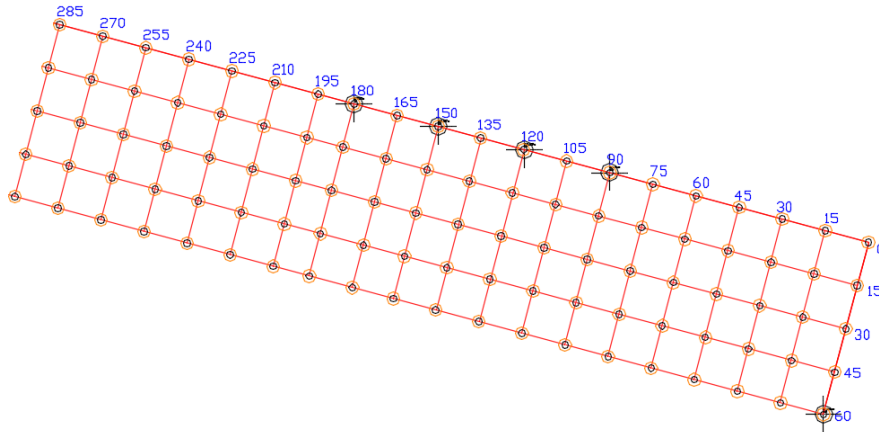


Figura 4 - Croqui do experimento, arquivo pessoal (2019)

Em relação à amostragem propriamente dita, foram coletadas amostras com estruturas deformadas e indeformadas nas profundidades de 0-0,2 m (deformadas e indeformadas) e 0,2-0,4 m (deformadas) em cada um dos 100 pontos amostrais da malha. As características físico-hídricas determinadas foram granulometria (areia, silte e argila), densidade do solo (D_s), densidade das partículas (D_p), porosidade total (PT), macroporosidade, microporosidade (6 kPa), retenção de água na capacidade de campo (33 kPa), retenção de água no ponto de murcha permanente (1500 kPa) e disponibilidade total de água (DTA).

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta, com dispersão de solo em hidróxido de sódio $0,1 \text{ mol L}^{-1}$. A análise de D_s foi feita pelo método do anel volumétrico e D_p pelo método do balão volumétrico, analisados de acordo com metodologia descrita por Teixeira, P. *et al.* (2017).

Macro, microporosidade, umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente foram feitas em câmara de Richards, da marca *soil moisture*, em amostras indeformadas coletadas em duplicata com anel volumétrico. O cálculo da porosidade total, macro, micro e DTA foi feito de acordo com Teixeira, P. *et al.* (2017)

Após a coleta, análise laboratorial e tabulação dos dados, aplicou-se a estatística descritiva com o cálculo de média, desvio padrão, variância, moda, mediana, máximo e mínimo, curtose e normalidade, com o uso do software SISVAR (FERREIRA, D., 2011). Com as

coordenadas geográficas de cada ponto, foi feita uma planilha contendo os valores de cada atributo físico-hídrico encontrados.

Com o uso de técnicas de geoestatística para a avaliação da variabilidade espacial e a confecção de mapas de ocorrência de manchas de solo, foi analisada a dependência espacial dos pontos por meio da semivariância ($\gamma(h)$), equação 3, conforme recomendação de Vieira, S. e Lombardi Netto (1995). Para tanto, utilizou-se o software *Gamma Design Software 7.0 – GS+* (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2012), sendo testados os modelos linear, gaussiano, exponencial, esférico e efeito pepita puro [Equação (3)].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Em que:

$\gamma(h)$: semivariância estimada a uma distância h ;

$N(h)$: número de pares de valores $[Z(x_1), Z(x_1 + h)]$ separados por um vetor h ;

x_i : posição espacial da variável Z ; e

Z : $Z(x_i)$ o valor da propriedade Z na localização x_i , no espaço.

Na determinação do modelo que melhor se adequasse aos dados, foram utilizados como parâmetros a menor soma de quadrado dos resíduos (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R^2). Antes, porém, foram testadas as condições de anisotropia/isotropia para verificar se melhoraria o ajuste do semivariograma para a variável em questão. Nos semivariogramas ajustados, foram definidos os seguintes parâmetros: patamar ($C_0 + C$), alcance da dependência espacial (a) e efeito pepita (C_0). Os modelos dos semivariogramas ajustados foram validados pelo processo de validação cruzada, conforme recomendação de Isaaks e Srivastava (1989).

Após a obtenção dos semivariogramas experimentais com melhor ajuste aos dados, avaliou-se o grau de dependência espacial (GDE) utilizando, para isso, a Equação (4), apresentada por Cambardella *et al.* (1994). Esse índice se refere à razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C), dado em porcentagem, que classifica o resultado em dependência espacial forte ($GDE < 25\%$), moderada ($25\% < GDE < 75\%$) e fraca ($GDE > 75\%$).

$$GDE = \frac{C_0}{C_0 + C} \quad (4)$$

Com o auxílio da krigagem ordinária, foi feita a interpolação de dados para pontos não amostrados, utilizando 64 vizinhos. De posse dos dados interpolados por krigagem das variáveis físico-hídricas estudadas, foi feita a confecção de mapas de iso-ocorrência na área de estudo, utilizando também o software *Gamma Design Software 7.0 – GS+* (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatística Descritiva

A Tabela 2 mostra a análise estatística descritiva dos dados coletados. Nela são apresentados os parâmetros de medidas de tendência central, de dispersão, de assimetria assim como o teste de normalidade.

Observa-se que os valores de média e mediana (medidas de tendência central) encontrados para todos os atributos são relativamente próximos, podendo inferir, portanto, que ocorreu baixa dispersão dos dados. Esse fato também se configura como indicativo de distribuição normal, em que as medidas não são fortemente influenciadas por valores atípicos na distribuição. Assim, os dados obtidos são adequados à geoestatística (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

O coeficiente de variação é utilizado para determinação da variabilidade dos dados. Gülser *et al.* (2016) classificam essa medida em $CV < 12\%$ como baixa, $12\% < CV < 60\%$ como média e $CV > 60\%$ como alta. Dessa forma, os atributos argila e densidade das partículas em ambas as camadas, areia de 0,20 a 0,40 m, umidade na capacidade de campo, densidade do solo e microporosidade apresentaram coeficiente de variação baixo. Por outro lado, o silte e a areia de 0 a 0,20 m, a porosidade total, a umidade no ponto de murcha permanente, a disponibilidade total de água e o silte de 0,20 a 0,40 m mostraram médio coeficiente de variação. Por fim, verificou-se que a macroporosidade apresentou alto coeficiente de variação.

Em casos em que a variável apresenta coeficiente de variação maior que 65%, ela é considerada muito heterogênea, e a média não tem relevância (VANNI, 1998) Esse caso pode ser visto no atributo de macroporosidade.

Os coeficientes de curtose e assimetria são caracterizados por sua proximidade ao valor zero, e este fato indica distribuição simétrica dos dados. Entretanto, ainda que os valores se distanciem de zero, como pode ser visto para alguns atributos, indicando uma distribuição assimétrica dos dados, isto não é empecilho à análise geoestatística (OLIVEIRA, I *et al.*, 2015).

Tabela 2 - Estatística descritiva para atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar na Unidade de Pesquisa em Cana-de-Açúcar (Usina CRV/IF Goiano – Campus Ceres) em Ceres – GO

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	Curtose	Assimetria	CV	Kolmogorov-Smirnov*
0 a 0,20 m									
Argila ⁽¹⁾	367,10	578,30	490,20	494,50	47,97	-0,13	-0,39	9,78	0,068 < 0,725 ^N
Silte ⁽¹⁾	85,90	300,00	176,63	173,55	40,19	1,21	0,87	22,75	0,100 < 0,248 ^N
Areia ⁽¹⁾	239,20	457,10	333,17	328,35	41,81	0,32	0,42	12,55	0,067 < 0,749 ^N
Ds ⁽²⁾	1,00	1,74	1,45	1,48	0,16	0,19	-0,87	11,38	0,134 < 0,050 ^A
Dp ⁽²⁾	2,38	2,78	2,62	2,63	0,09	-0,02	-0,36	3,31	0,109 < 0,175 ^N
Micro ⁽³⁾	0,29	0,51	0,36	0,37	0,03	4,18	0,62	8,67	0,096 < 0,306 ^N
Macro ⁽³⁾	-0,07	0,32	0,08	0,05	0,08	0,49	0,95	103,25	0,133 < 0,054 ^A
PT ⁽³⁾	0,30	0,61	0,44	0,43	0,06	0,22	0,69	14,13	0,090 < 0,380 ^N
θ CC ⁽³⁾	0,25	0,46	0,33	0,33	0,03	1,94	0,26	10,28	0,088 < 0,407 ^N
θ PMP ⁽³⁾	0,18	0,42	0,28	0,28	0,04	1,65	0,43	13,58	0,087 < 0,426 ^N
DTA ⁽⁴⁾	0,15	1,14	0,53	0,53	0,15	1,39	0,44	30,13	0,057 < 0,897 ^N
0,20 – 0,40 m									
Argila ⁽¹⁾	411,70	628,80	523,16	534,50	50,51	-0,64	-0,34	9,66	0,099 < 0,261 ^N
Silte ⁽¹⁾	95,70	288,30	171,77	160,35	43,12	-0,29	0,50	25,10	0,122 < 0,091 ^A
Areia ⁽¹⁾	220,60	377,00	305,08	304,95	31,46	0,16	-0,36	10,31	0,078 < 0,566 ^N
Dp ⁽²⁾	2,06	2,78	2,63	2,63	0,10	8,59	-1,96	3,86	0,159 – 0,011 ^A

DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ds – densidade do solo; Dp – densidade das partículas; Micro - microporosidade; Macro – macroporosidade; PT – porosidade total; θ – umidade volumétrica; CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente; DTA – disponibilidade total de água no solo. * Teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade; A: Distribuição assimétrica; N: Distribuição normal; (1): g kg⁻¹; (2): kg dm⁻³; (3): m³ m⁻³; (4): mm cm⁻¹

Ao avaliar os teores de argila, silte e areia, percebe-se, pelas médias obtidas, acréscimo no teor de argila da camada de 0 a 0,20 m (490,20 g kg⁻¹) para a de 0,20 a 0,40 m (523,16 g kg⁻¹). Os valores encontrados para silte diminuiram levemente, enquanto os de areia diminuiram em relação à camada de 0 a 0,20 m. Do ponto de vista pedológico, a diferença não indica ser significativa, o que poderia caracterizar gradiente textural e resultar em solo diferente de Latossolo. Com base nesses valores, a textura do solo foi classificada como argilosa em ambas as camadas, conforme Santos, H. *et al.* (2018).

Os resultados do presente estudo corroboram os obtidos por Carvalho Filho *et al.* (2009), que, ao estudar um Latossolo Vermelho acriférico sob cultivo de cana-de-açúcar, verificaram aumento de cerca de 25% no teor de argila nos 40 cm superficiais do solo.

A densidade do solo variou de 1,0 a 1,74, com média de 1,45 kg dm⁻³ (Tabela 2). Dias (2014) cita em seu trabalho que para solos argilosos como o caso do solo em estudo, valores entre 1,25 e 1,35 kg dm⁻³ em culturas anuais já podem ser considerados restritivos ao crescimento de raízes. Dessa forma, o valor encontrado na área de estudo mostra densidade acima do valor crítico, o que pode ser indicativo da necessidade de alguma medida de

intervenção na área em momento oportuno.

Em relação à densidade das partículas, Tabela 2, observa-se que houve pouca variação entre as camadas avaliadas, com valor médio de $2,62 \text{ kg dm}^{-3}$. Reichert, Suzuki e Reinert (2007) afirmam que este atributo está relacionado à composição solo (mineral e orgânica), e seu valor médio varia entre 2,3 e $2,9 \text{ kg dm}^{-3}$.

Quanto à micro e macroporosidade do solo, foram encontrados valores médios de 0,36 e $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente (Tabela 2). Em solos argilosos é comum a quantidade de microporos ser superior à de macroporos (ROSA, H. *et al.*, 2012), fato verificado nos resultados encontrados. Para a variável porosidade total do solo, os resultados tiveram dispersão de 0,30 a 0,61, com média de $0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

De acordo com Kiehl (1979), solo considerado ideal para produção agrícola deve apresentar porosidade total de aproximadamente $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, divididos em 34% de macroporos e 66% de microporos. Os valores encontrados no presente estudo com proporção de microporos de aproximadamente 82% e macroporos de 18% em relação à PT estão fora do considerado ideal, tendo como referência o autor supracitado.

Analisando os atributos físico-hídricos de umidade no ponto de murcha permanente e capacidade de campo (camada de 0 a 0,20 m), foram obtidas médias de $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

Observa-se que os valores de ponto de murcha permanente (1500 kPa) foram altos em comparação com a capacidade de campo. Isso indica elevado conteúdo de água retido na tensão de 1500 kPa e, conseqüentemente, menor diferença no conteúdo entre as tensões de 1500 e 33 kPa, ou seja, no conteúdo de água disponível às plantas. Podem ser atribuídos valores maiores de PMP em solos argilosos à maior retenção de água nos microporos (FARIAS, J.; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2005).

Lobato (2019), ao estudar a umidade de capacidade de campo em solos argilosos por diversos métodos, verificou média de $0,27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, constatando, portanto, que o solo em estudo apresenta média ligeiramente superior. Entretanto, Rosa, S. *et al.* (2018), ao estudarem a retenção de água em Latossolos Argilosos, verificaram que eles apresentaram CC e PMP com valores de 0,39 e $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, com faixa de variação de $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Diferentemente do referido trabalho, o solo deste estudo apresentou intervalo médio de retenção de $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, caracterizando menor retenção de água na faixa de água disponível.

A porosidade do solo é influenciada pela sua textura e estrutura (ADÁMÓLI *et al.*, 1985). Solos do cerrado, argilosos, ricos em óxidos e com estrutura granular, podem apresentar características próximas à de solos de textura mais grossa, de modo a não terem grande retenção

de água. Presença de óxidos de ferro livres no solo gera diminuição no intervalo de retenção encontrado no solo e na faixa de água disponível, sendo que no presente estudo e no desenvolvido por Freire (1975), percebem-se comportamentos semelhantes.

A disponibilidade total de água no solo (DTA) variou de 0,15 a 1,14 e na média foi de 0,53 mm cm⁻¹. Amaral *et al.* (2017), estudando este aspecto para Latossolo Vermelho em camada de 0,0 – 0,10 m, encontraram valor médio de 1,30 mm cm⁻¹, indicando que os resultados do presente estudo estão cerca de 60% abaixo do esperado.

A DTA tem relação direta com a densidade do solo, uma vez que solos com densidade elevada tendem a apresentar menor quantidade de poros para armazenamento e disponibilização de água e de ar às plantas (AMARAL *et al.*, 2017).

A correlação de Pearson (p') é utilizada para determinar a interdependência entre duas variáveis. Ela atua como método de verificação do grau de correlação. Para valores mais próximos de zero, a correlação se mostra neutra, enquanto valores próximos de 1 e -1 são correlações mais fortes (ARAÚJO, J.; DOS SANTOS, M.; GOMES, C., 2019). Ela pode ser classificada conforme preconizado por Callegari-Jacques (2003) em fraca para valores 0,00 < p' < 0,30 e forte para valores entre 0,60 ≤ p' < 0,90.

Dessa forma, a maioria das correlações não foi significativa (Tabela 3). Entretanto, as correlações que mostraram significância apresentaram correlação média e forte. Destaca-se nessa análise que a Ds se correlacionou de forma negativa e com altos valores com a PT e macroporosidade, e de forma positiva, com a microporosidade. Isso mostra o efeito da compactação do solo, que é prejudicial para as propriedades do solo que dependam de maior presença de macroporos, casos da aeração e da velocidade de infiltração de água no solo (SILVA, F.; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014).

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as propriedades de um Latossolo Vermelho, nas profundidades de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m, em área de cana-de-açúcar em Ceres - GO

VARIÁVEL	Argila 0-0,2 m	Silte 0-0,2 m	Areia 0-0,2 m	Argila 0,2-0,4 m	Silte 0,2-0,4 m	Areia 20-40 m	Dp 0-0,2 m	Dp 0,2-0,4 m	Uv CC	Uv PMP	Ds	Micro	Macro	Pt	DTA	VIB
Argila 0-0,2 m	1,00															
Silte 0-0,2 m	-0,56**	1,00														
Areia 0-0,2 m	-0,61**	-0,32**	1,00													
Argila 0,2-0,4 m	0,34**	-0,21*	-0,19 ^{ns}	1,00												
Silte 0,2-0,4 m	-0,25**	0,29**	-0,02 ^{ns}	-0,79**	1,00											
Areia 0,2-0,4 m	-0,19 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,28**	-0,53**	-0,11 ^{ns}	1,00										

(continua...)

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as propriedades de um Latossolo Vermelho, nas profundidades de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m, em área de cana-de-açúcar em Ceres - GO

(Conclusão)

Dp 0-0,2 m	-0,05 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1,00										
Dp 0,2-0,4 m	-0,09 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,22 [*]	-0,20 [*]	0,11 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,41 ^{**}	1,00									
Uv CC	-0,08 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,06 ^{ns}	1,00								
Uv PMP	-0,09 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,91 ^{**}	1,00							
Ds	0,76 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,21 [*]	0,07 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,20 [*]	0,56 ^{**}	0,57 ^{**}	1,00						
Micro	-0,01 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,20 [*]	-0,06 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,82 ^{**}	0,73 ^{**}	0,49 ^{**}	1,00					
Macro	-0,07 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,72 ^{**}	-0,68 ^{**}	-0,91 ^{**}	-0,76 ^{**}	1,00				
Pt	-0,10 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,24 [*]	-0,05 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,54 ^{**}	-0,53 ^{**}	-0,96 ^{**}	-0,51 ^{**}	0,95 ^{**}	1,00			
DTA	0,03 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,26 ^{**}	-0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,44 ^{**}	-0,16 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,11 ^{ns}	1,00		

**Correlação significativa a 1% de probabilidade; *Correlação significativa a 5% de probabilidade; ^{ns} Não significativo.

4.2 Análise dos semivariogramas ajustados

A Tabela 4 apresenta os ajustes dos modelos e parâmetros de semivariogramas para os atributos estudados. Nos atributos referentes à granulometria do solo (argila, silte e areia), a dependência espacial para argila e areia foi classificada como forte, e para silte, moderada, em ambas as profundidades.

Para esses atributos na camada de 0-0,20 m, o modelo ajustado para argila foi o gaussiano, enquanto para os demais foi o exponencial. Para a profundidade de 0,20-0,40 m, o modelo exponencial se ajustou aos atributos granulométricos. O alcance variou de 23,35 m (argila) a 191,90 m (silte) e significa que quanto menor o alcance mais desuniforme é o solo e mais próximos devem ficar os pontos de amostragem com base no parâmetro argila de 0-0,20 m, limitando-se na distância do alcance.

A densidade do solo se ajustou ao modelo esférico com alcance de 155,50 m e GDE de 49,76%, o que configura grau de dependência espacial moderada. Mendes, Jorge e Almeida (2017), ao estudarem esse atributo em um Latossolo Vermelho sob cultivo agrícola com de café, em camadas de 0,10 a 0,20 m, obtiveram também ajuste ao modelo esférico e alcance de 159,10 m, concordando com o presente trabalho.

Para densidade das partículas, foram encontrados graus de dependência espacial menores que 25%, classificando assim o atributo como fortemente dependente. Para esse parâmetro, o modelo gaussiano foi o que melhor se adequou aos dados de ambas as camadas. O menor alcance atingido por essa variável foi de 25,29 m. O modelo de ajuste divergiu dos trabalhos de Amaro Filho *et al.* (2007), que encontraram, para este atributo, modelo

exponencial, entretanto, o alcance foi semelhante, ficando na faixa dos 30 m.

Em relação à porosidade do solo, os dados se ajustaram aos modelos esférico, exponencial e gaussiano, com alcances de 54,30 m, 42,00 m e 158,31 m, respectivamente, para microporosidade, macroporosidade e porosidade total. Esses ajustes reforçam o de outros estudos como o de Silva, L. *et al.* (2020), que, ao estudarem macro e microporosidade do solo, obtiveram melhor ajuste ao modelo exponencial, com alcance de 45 m.

Quanto à retenção de água no solo no ponto de murcha permanente e na capacidade de campo, o grau de dependência espacial foi forte para ambos os atributos, com ajuste aos modelos esférico e gaussiano, com alcances de 15,40 e 21,82 m, respectivamente. De forma geral, os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos foram altos, com exceção para θ PMP.

Ao estudar a retenção de água em um Latossolo Vermelho na profundidade de 0,0 a 0,15 m, Grego e Vieira, S. (2005) encontraram ajustes ao modelo esférico para ambas as situações de umidade e disponibilidade total de água no solo. O alcance verificado foi de aproximadamente 10 m para a capacidade de campo e ponto de murcha permanente, enquanto para DTA, o alcance atingiu 19 m. Os resultados de alcance do presente estudo ficaram relativamente próximos do referido estudo para PMP e CC e distantes para DTA.

Tabela 4 - Parâmetros do ajuste experimental e do teste de validação para atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho solo sob cana-de-açúcar em Ceres – GO

Atributo	Prof. (m)	Modelo	AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMA							VALIDAÇÃO CRUZADA		
			C0	C0 + C	Alcance	R ²	SQR	GDE	DE	SE	R ²	CR
Argila	0 – 0,2	GAU	277,00	1690,00	23,38	0,70	6,08E ⁴	16,39	Forte	0,20	0,19	0,94
	0,2 – 0,4	EXP	592,00	2662,00	67,20	0,93	1,03E ⁵	22,24	Forte	0,18	0,31	1,00
Silte	0 – 0,2	ESF	722,00	1540,00	191,90	0,90	6,85E ⁴	46,88	Moderado	0,22	0,20	1,04
	0,2 – 0,4	EXP	1054,00	3100,00	150,00	0,91	4,07E ⁶	34,00	Moderado	0,18	0,30	0,97
Areia	0 - 0,2	ESF	307,00	1468,00	55,00	0,83	1,18E ⁵	20,91	Forte	0,12	0,35	0,73
	0,2 – 0,4	EXP	81,00	934,00	57,60	0,91	1,74E ⁴	8,67	Forte	0,23	0,26	1,12
Ds	0 – 0,2	ESF	0,01	0,02	155,50	0,86	1,66E ⁻⁵	49,76	Moderado	0,23	0,16	0,95
Dp	0 – 0,2	GAU	0,00	0,01	28,06	0,85	1,02E ⁻⁶	17,23	Forte	0,16	0,16	0,68
	0,2 – 0,4	GAU	0,00	0,01	25,29	0,62	3,51E ⁻⁶	1,49	Forte	0,14	0,21	0,69
Micro	0 – 0,2	ESF	0,00	0,00	54,30	0,85	1,14E ⁻⁸	39,07	Moderado	0,21	0,32	1,19
Macro	0 – 0,2	EXP	0,00	0,01	42,00	0,63	2,14E ⁻⁶	12,93	Forte	0,33	0,11	0,97
PT	0 – 0,2	GAU	0,00	0,00	158,31	0,93	3,30E ⁻⁷	49,87	Moderado	0,23	0,22	1,00
θ PMP	0 – 0,2	ESF	0,00	0,00	15,40	0,00	4,27E ⁻⁸	1,06	Forte	0,52	0,11	1,51
θ CC	0 – 0,2	GAU	0,00	0,00	21,82	0,57	2,42E ⁻⁸	8,29	Forte	0,25	0,20	1,18
DTA	0 - 20	ESF	0,01	0,03	73,90	0,78	6,63E ⁻⁵	31,01	Moderado	0,34	0,22	1,51

Prof. - Profundidade; C0 - efeito-pepita; C0+C – patamar; R² - Coeficiente de determinação; SQR - Soma de quadrados dos resíduos; GDE - Grau de dependência espacial (%); DE - Dependência espacial; GAU - Gaussiano; EXP - Exponencial; ESF -Esférico; CR - Coeficiente de regressão; SE - Erro padrão.

A Tabela 4 apresenta a validação cruzada com os parâmetros dos modelos teóricos, ajustados para a área amostrada. Em relação aos coeficientes de determinação (R^2) da validação, observa-se que não foram altos. Os valores de CR ficaram mais distantes de 1 para θ PMP e DTA, que resultaram em maiores valores de SE.

Analisando o erro padrão (SE), quanto menor esse índice dos ajustes mais precisa é a resposta estimada para pontos não amostrados, sendo tal índice uma estimativa mais precisa que os coeficientes de determinação (R^2). Os atributos avaliados apresentaram erro padrão (SE) próximo de zero, que, juntamente com os outros parâmetros, indicam que os modelos ajustados tiveram precisão aceitável na estimativa de valores em locais não amostrados.

4.3 Mapas de iso-ocorrência

Os mapas de iso-ocorrência são uma ferramenta útil para a visualização da variabilidade dos atributos na área de estudo (LIMA, F. *et al.*, 2015). Dessa forma, é possível entender a distribuição da variação dos atributos e até mesmo compará-los a diferentes profundidades.

Para o atributo argila, na camada de 0 a 0,20 (Figura 5a) a classe 460 a 510 g kg^{-1} predomina, seguida de várias manchas da classe 510 a 560, e em menor quantidade, de manchas de 410 a 460 g kg^{-1} ao longo de toda a área do estudo. Na camada de 0,20 a 0,40 m, Figura 5b, a classe 510 a 560 abrange quase a totalidade da área com manchas centrais de 560 a 410 g kg^{-1} e manchas de 460 a 510 g kg^{-1} , principalmente na porção oeste. Em todos os casos a textura da área de estudo está dentro da classe argilosa em ambas as camadas.

Em razão da maior área da classe 510 a 560 g kg^{-1} na camada 0,20-0,40 m, observa-se pequeno incremento do conteúdo de argila em profundidade. Isso foi também verificado por Prado, R. e Natale (2003), o que foi atribuído à influência de fatores ligados à gênese do solo.

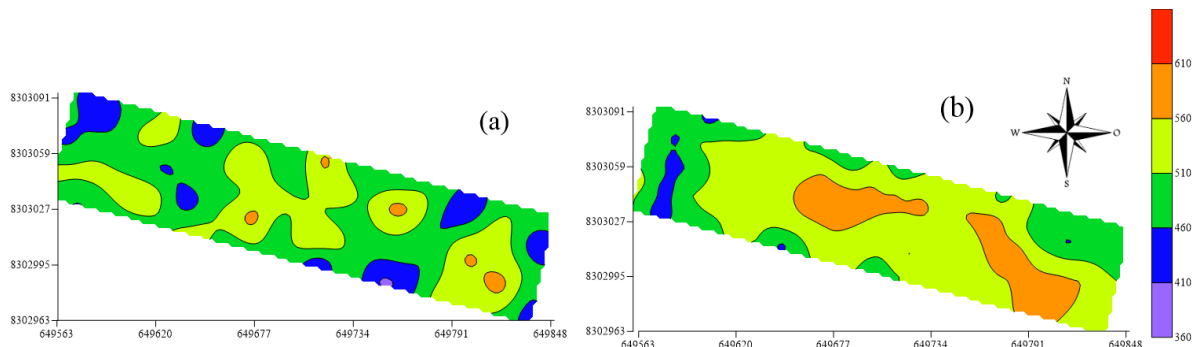


Figura 5 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar argila (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,2 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

Ao analisar o atributo silte apresentado na Figura 6, as áreas se mostraram mais homogêneas que argila, principalmente na camada 0-0,20 m, onde a classe 160 a 200 g kg^{-1} ocorre em quase toda a área. Na parte central da camada de 0,20-0,40 m, os teores de silte se revelaram mais baixos, o que já era esperado considerando a maior proporção de argila na composição da textura do solo.

Em razão da intensa intemperização dos latossolos do cerrado, são esperados teores de silte mais baixos nesse tipo de solo, conforme visto na área de estudo e também mostrado no trabalho de Effgen (2006).

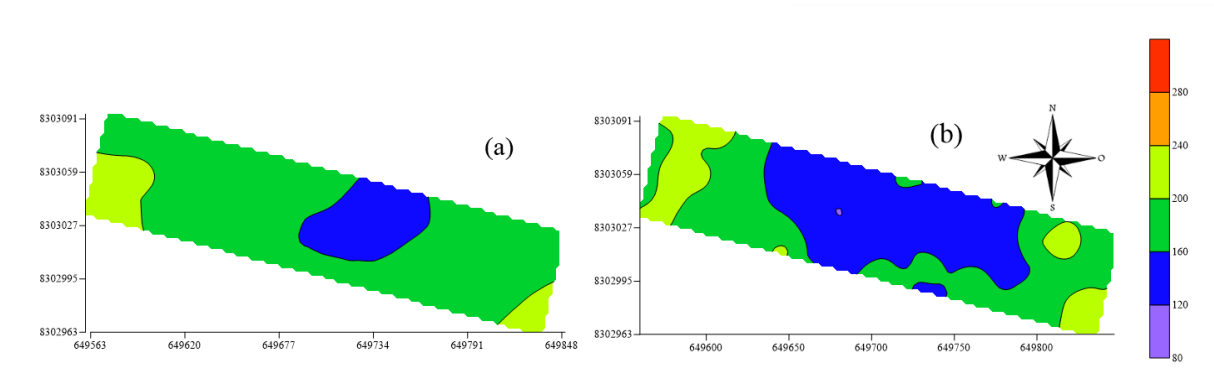


Figura 6 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar silte (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

De forma inversa ao atributo argila, onde os valores tenderam a aumentar em profundidade, a areia apresentou valores menores na camada de 0,20-0,40 m (Figuras 7a e 7b). Ocorreram basicamente três classes de valores, mas predominando as classes 310 a 355 g kg^{-1} e 265 a 310 g kg^{-1} nas camadas 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente, evidenciando o comportamento esperado de que os latossolos argilosos tendem a não apresentar grandes variações nas quantidades de silte.

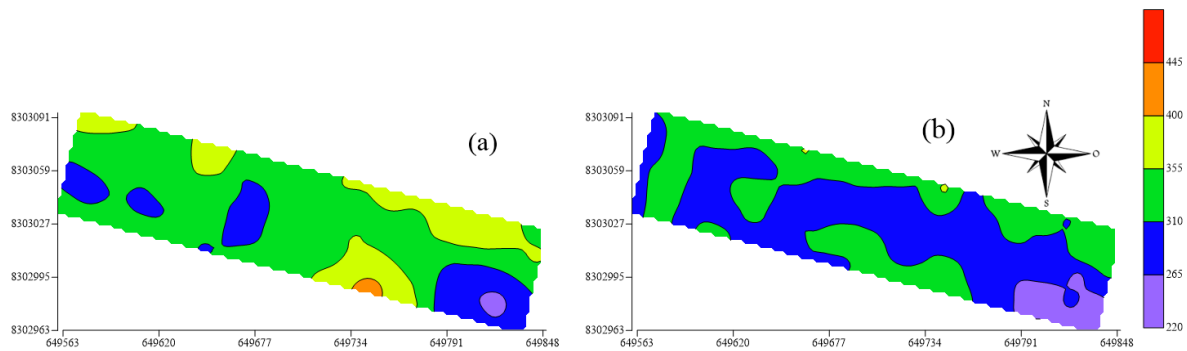


Figura 7 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar areia (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,2 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

Conforme Figuras 8a e 8b, observa-se que a densidade das partículas apresentou certa

similaridade entre as profundidades, predominando com maior distribuição espacial duas classes de valores, variando de 2,48 a 2,76 kg dm⁻³. Esses valores foram coerentes com aqueles encontrados para solos brasileiros altamente intemperizados e ricos em óxidos, que, de acordo com Curi (1993), estão em torno de 2,65 kg dm⁻³.

Segundo Rühlmann, Körschens e Graefe (2006), esse atributo tem mais relação com a rocha originária do solo no local do que com o manejo, razão de tender a não divergir fortemente em profundidade.

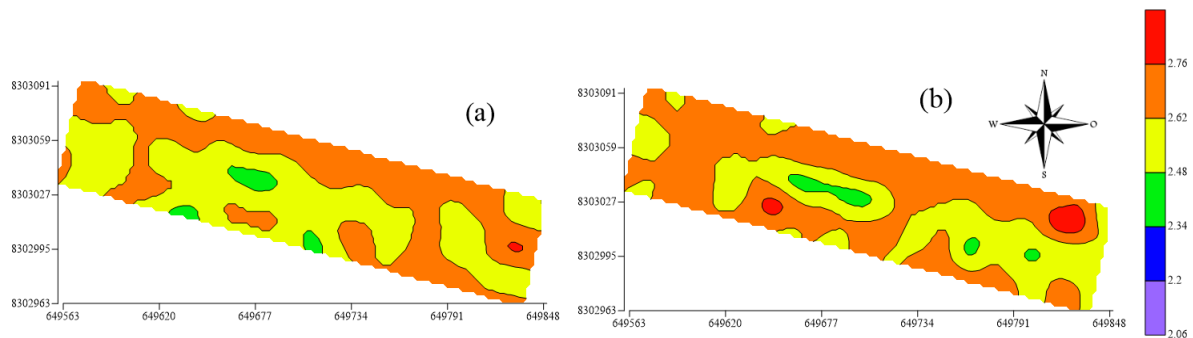


Figura 8 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar densidade das partículas (kg dm⁻³) nas camadas de 0-0,20 (a) e 0,20-0,40 m (b) em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

A Figura 9 apresenta a distribuição espacial da variável densidade do solo (Ds). Observa-se que esse atributo apresentou variação espacial de forma mais uniforme, com três classes de valores, mas uma com pequena área a leste. A parte central da área mostrou valores mais altos, no entanto, nos dois casos, a Ds está acima do nível crítico, de 1,30 kg dm⁻³ para solos argilosos, conforme Dias (2014).

Em geral, culturas anuais que se desenvolvem em áreas com solos argilosos e com densidade média maior que o nível crítico podem ter dificuldades no crescimento radicular. Nessas condições, Kaiser *et al.* (2009) verificaram que em um Latossolo a aeração já se constitui como um fator físico limitante quando a densidade do solo é maior que 1,32 g cm⁻³.

Isso evidencia trânsito de máquinas nas operações de tratos culturais e colheita em condição de umidade inadequada, o que está contribuindo para a degradação da qualidade física do solo da área (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

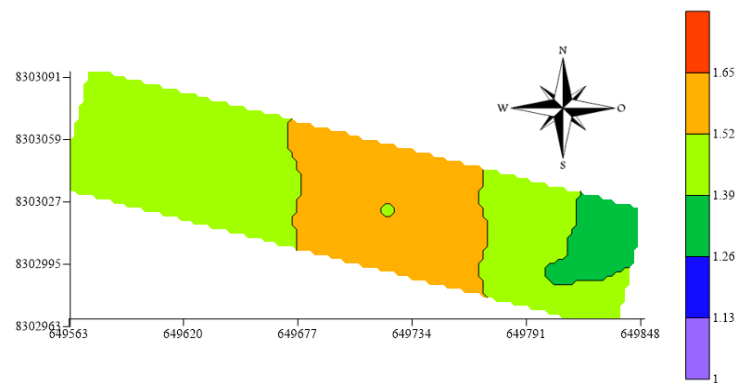


Figura 9 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar densidade do solo (kg dm^{-3}) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

Na investigação da microporosidade, verificou-se que na grande maioria da área experimental os valores estão entre 0,33 (sul) e 0,41 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (norte) (Figura 10). Esses valores se mostraram mais altos que os considerados ideais (0,33 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) de acordo com Kiehl (1979). Isso indica histórico de compactação do solo da área, o que vem contribuindo para a redução de macroporos em detrimento do aumento de microporos em função da quebra de agregados.

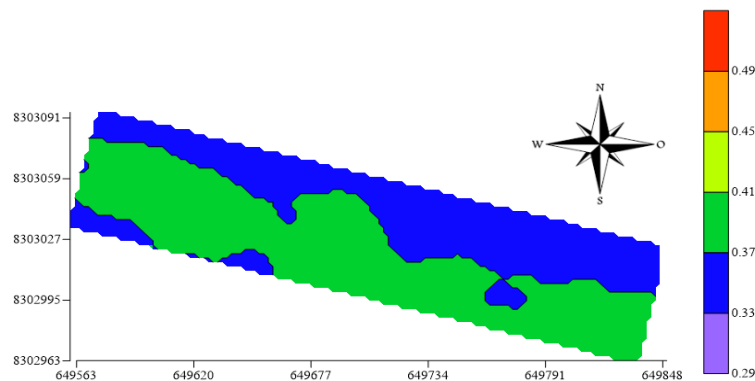


Figura 10 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

A macroporosidade, por sua vez, apresentou duas áreas de distribuição espacial predominantes, sendo de 0 a 0,07 e 0,07 a 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. De acordo com Kiehl (1979), o ideal para solos argilosos como o do estudo é que a macroporosidade se situe em torno de 0,17 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Macroporosidade baixa juntamente com densidade do solo alta, como ocorre na área de estudo, indicam condições de compactação do solo avançadas, uma vez que a tendência é que isso seja resultado da quebra de macroporos em microporos (KIEHL, 1979).

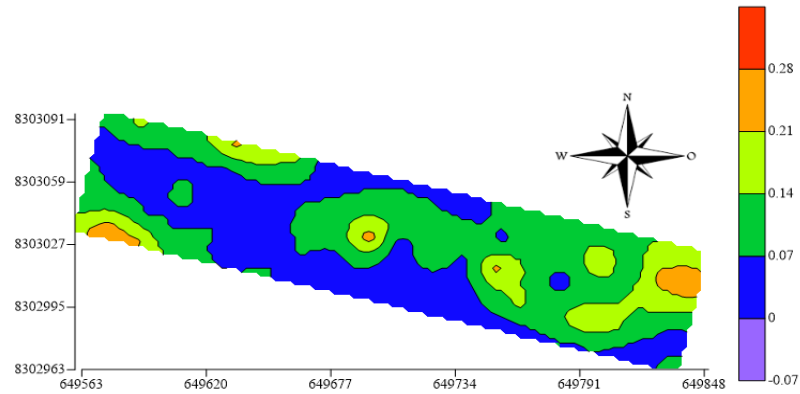


Figura 11 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

A Figura 12 apresenta a distribuição espacial da porosidade total. O comportamento desse atributo se assemelha ao atributo densidade do solo, o qual tem relação na determinação. A porosidade total ideal para solos argilosos fica entre 0,5 e 0,65 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ de acordo com Freitas *et al.* (2014). A região central da área de estudo apresentou valores de 0,36 a 0,42 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e no restante da área predominou a faixa de 0,42 a 0,48 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Dessa forma, os resultados desse atributo são inferiores ao ideal, reforçando um indicativo de compactação do solo.

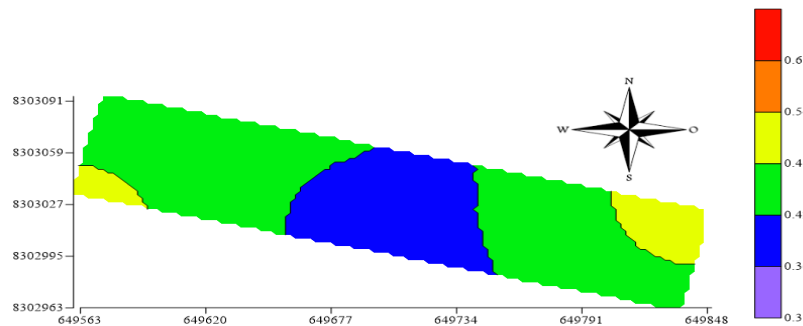


Figura 12 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

Para a variável ponto de murcha permanente (tensão 1500 KPa), verifica-se ocorrência basicamente de duas classes de valores, de 0,23 a 0,28 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (predominante) e de 0,28 a 0,33 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Figura 13a), que têm manchas por toda a extensão na área de estudo. Áreas sob essa última classe implicarão menor turno de rega, ou seja, reposição de água de forma mais frequente, pelo fato de a diferença entre o ponto de murcha e a capacidade de campo ter sido menor, conforme discutido anteriormente.

Quanto à umidade na capacidade de campo (Figura 13b) verifica-se que o comportamento da distribuição espacial se assemelha ao atributo ponto de murcha permanente.

Predomina a classe 0,33 a 0,38 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, seguida por manchas 0,28 a 0,33 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ por toda a extensão do território, sem um local definido de predominância. Andrade, R. e Stone (2011), ao estudarem essa variável em Latossolos, encontraram valores de 0,35 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, comprovando, dessa forma, que os resultados encontrados estão condizentes com os esperados.

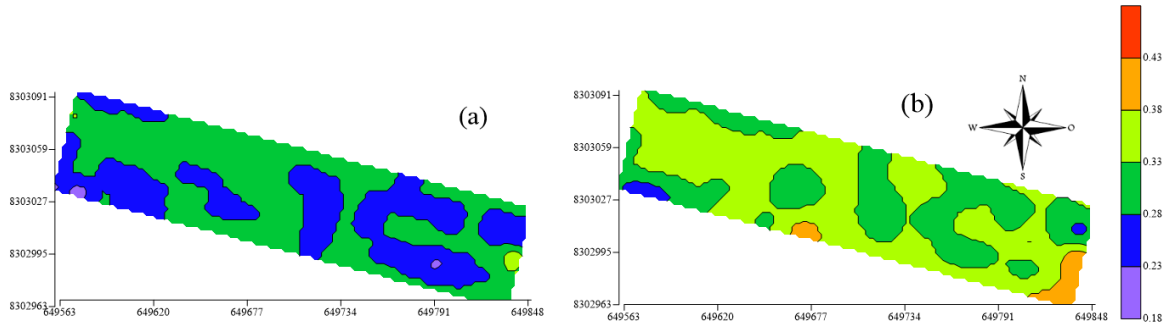


Figura 13 - Mapas usando interpolação por krigagem para caracterizar umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas condições de ponto de murcha permanente (a) e capacidade de campo (b), na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres – GO

É perceptível que a diferença volumétrica de umidade entre os dois pontos de umidade não é grande e isso pode estar relacionado principalmente à mineralogia do solo, no caso, caulínica/oxídica, indicando menor retenção de água na capacidade de campo que solos com argila 2:1, o que implica reposição de água mais frequente para manter a água disponível.

Com as informações dos mapas é possível planejar de forma mais precisa a reposição e o turno de rega da área, contribuindo para o manejo da irrigação de forma mais racional, com maior eficiência de uso da água.

A Figura 14 mostra o mapa de interpolação do atributo relacionado à disponibilidade total de água no solo (DTA). Há predominância da faixa 0,45 a 0,6 mm cm^{-1} na maior dimensão da área (leste a oeste), voltada para o norte. Verifica-se que somente na região sul os valores encontrados ficaram acima de 0,60 mm cm^{-1} . Em geral, os valores referentes à DTA, segundo Bernardo (2006), devem se situar entre 0,6 e 1,0 mm, ficando o solo em estudo abaixo da faixa do desejado.

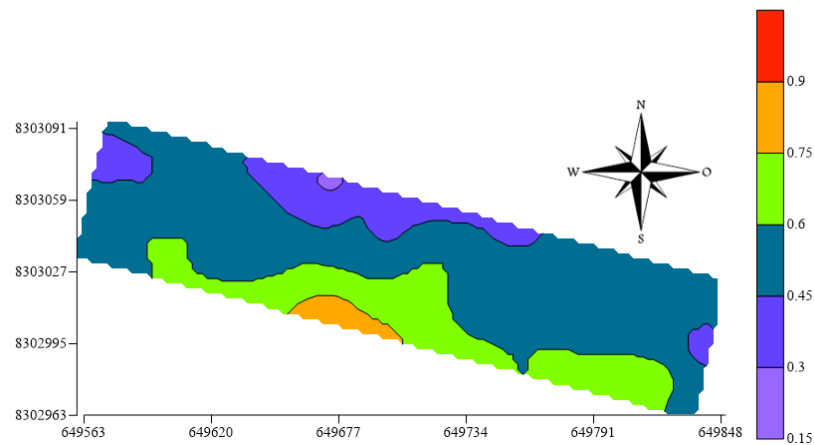


Figura 14 - Mapa usando interpolação por krigagem para caracterizar disponibilidade total de água (mm cm^{-1}) na camada de 0-0,20 em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar em Ceres - GO

Desse modo, considerando os valores determinados para a água disponível (DTA) do solo, é possível definir turnos de rega necessários para o suprimento adequado de água para as plantas e, assim, definir o melhor método de irrigação a ser utilizado.

Da mesma forma, com os resultados encontrados, é possível auxiliar trabalhos voltados para a agricultura de precisão (LOVERA *et al.*, 2018) em solos com características semelhantes às deste estudo, sobretudo dentro do alcance da dependência espacial, como o planejamento da amostragem de atributos físicos, tomada de decisões relacionadas à irrigação e manejo de solo.

5 CONCLUSÕES

A análise dos semivariogramas mostrou que os atributos físico-hídricos avaliados apresentam dependência espacial com 40% moderado e 60% de grau forte, indicando que a interpolação geoestatística é adequada para gerar mapas de variabilidade espacial.

A área de estudo apresenta maior variabilidade espacial para os atributos ARG, ARE, Dp, macroporosidade, CC, PMP e DTA, segundo os mapas de isso-ocorrência.

Com base nos alcances obtidos, é possível determinar a grade amostral ótima para cada atributo, sendo que o *grid* amostral previamente utilizado no estudo foi adequado.

A umidade média da CC e PMP da área é de 0,33 e 0,28 m³ m⁻³ nas condições do estudo, possibilitando cálculo de lâmina de irrigação e turno de rega.

Os resultados baixos de DTA evidenciam que o Latossolo Vermelho distrófico em estudo apresenta baixa retenção de água na faixa da água disponível, permitindo inferir que a irrigação ideal para esse solo é aquela que proporciona a ele turnos de rega mais próximos.

A variabilidade espacial dos valores de DTA na área de estudo possibilita a definição de duas unidades de manejo (leste a oeste e voltado para norte), o que irá envolver lâminas de irrigação diferentes.

Os resultados de densidade do solo e macroporosidade indicam que a área de estudo apresenta compactação do solo, provavelmente causada por operações mecanizadas em teores de umidade acima do adequado, requerendo medidas preventivas e corretivas.

6 REFERÊNCIAS

ADÂMÓLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos Cerrados. *In: GOEDERT, W. J. Solos dos cerrados*. Tecnologias e estratégias de manejo. Brasília, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, p.33-74, 1985. Disponível em: Biblioteca física da Universidade Federal de Goiás Acesso em: 12 set. 2020.

AMARAL, K. F. S.; ROSA, H. A.; GIESE, V.; MONTIEL, C. B.; BRONDANI, S. T.; SECCO, D. Propriedades Físico-Hídricas de um Latossolo Argiloso após Compactação Induzida Mecanicamente. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, São Paulo, Brasil, v. 11, n. 3, p. 308-316, 2017. Tupã, São Paulo, Brazil, v. 11, n. 3, p. 308–316, 2017. DOI: 10.18011/bioeng2017v11n3p308-316. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/553>. Acesso em: 14 jan. 2022.

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D. de; ASSIS JÚNIOR, R. N. de; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 415-422, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300001>
Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/G97ZVzGfj6Xr6D6RzrWnKkP/?lang=pt>
Acesso em: 20 set. 2020.

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.111- 116, 2011, Campina Grande, PB, UAEEA/UFCG. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/3m63gPBHPPhGb9HFxG6C7rYz/?lang=pt> Acesso em: 10 jan. 2021.

AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm> Acesso em: 20 nov. 2019.

ARAÚJO, J. V. G. A.; DOS SANTOS, M.; GOMES, C. F. S. Desenvolvimento de um código em Python para geração de Matrizes de Correlação de Pearson com laços a partir de “n” variáveis tomadas duas a duas. **Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335796808_Desenvolvimento_de_um_codigo_em_Python_para_geracao_de_Matrizes_de_Correlacao_de_Pearson_com_lacos_a_partir_de_n_variaveis_tomadas_duas_a_duas Acesso em: 13 out. 2020.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, out. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500025>

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/cYKyvFQzN3YBTCHqtDd6JFr/abstract/?lang=pt> Acesso em: 21 nov. 2019.

BÁRDOSSY, A.; LI, J. Geostatistical interpolation using copulas. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, jul. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007WR006115> Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007WR006115> Acesso em: 3 jan. 2020.

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. Palestra no XVI CONIRD. Goiânia-GO. 11p., 2006. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3j1wle6b8.pdf Acesso em: 24 set. 2010.

BERNINI, T. A. **Utilização de imagens ALOS/PALSAR no mapeamento digital de atributos físicos dos solos**, 101f., 2016. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, Recursos Naturais e Proteção Ambiental), Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016. <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/2317> Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/2317> Acesso em: 19 e30. 2019.

BERTOLANI, F. C.; JOAQUIM, A. C.; DONZELLI, J. L. Sistema de classificação edafoclimática para a cultura da cana-de-açúcar. *In: Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos*, 1.ed. Brasília, Embrapa. p.363-373, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284173368_Sistema_de_producao_mecanizada_da_cana-de-acucar_integrada_a_producao_de_energia_e_alimentos_Mechanized_System_for_Sugarcane_Production_integrated_with_Energy_and_Food_Production. Acesso em: 12 dez. 2019.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. de A.; QUEIROZ, D. M. de; SOUZA, C. M. A. de; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n.2, p. 331-336, 2011. DOI:10.5039/agraria.v6i2a882 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/290964506_Variabilidade_espacial_da_resistencia_do_solo_a_penetracao_em_um_Latossolo_Vermelho_distroferrico Acesso em: 23 nov. 2019.

BRUNING, J.; BOSCAINI, R.; CHAIBEN NETO, M.; ROBAINA, A. D.; TAPAHUASCO, W. F. C.; PEITER, M. X. Caracterização Físico-Hídrica de Solos Cultivados com Arroz na Região de Alegrete-RS. **Anais do 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNIPAMPA: Salão de Pesquisa-Pôster**, v. 9, n. 2, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/98676> Acesso em: 15 dez. 2019.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre:Artemed, 255p, 2003.

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 Sci. Soc. Am. J.**, n.58, n.5, p.1501-1511, set.-out. 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x> Disponível em: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

Acesso em: 20 dez. 2019.

CAMPINAS, D. do S. N.; FARIAS, P. R. da S.; LIMA, H. V. de; OLIVEIRA, F. J. de. Variabilidade espacial dos atributos físicos de solos em dois sistemas de manejo na Amazônia Oriental. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v.24, n.2, p.78-87, dez. 2013. Disponível em: <https://docplayer.com.br/111338638-Variabilidade-espacial-dos-atributos-fisicos-de-solos-em-dois-sistemas-de-manejo-na-amazonia-oriental.html> Acesso em: 23 nov. 2019.

CARNEIRO, M. de F. Ajuste automático de semivariograma no GeoLeap com modelos esférico, gaussiano e exponencial, 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro de Petróleo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/39496> Acesso em: 10 jan. 2020.

CARVALHO FILHO, A.; CIRILO CARVALHO, L. C.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; CORTEZ, J. W.; RIBON, A. A. Qualidade física de um Latossolo Vermelho férrico sob sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, MG, v. 25, n. 6, p. 43-51, 2009. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7003> Acesso em: 25 out. 2020.

CARVALHO, J. R. P. de; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. Meteorologia e Climatologia Agrícola, **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v. 13, n. 4, p. 443-448, ago. 2009. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG – <http://www.agriambi.com.br> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/QKZ7hM4YBKmG8vWhPk8mbzF/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 11 jan. 2020.

CARVALHO JÚNIOR, I. A. de. **Influência da mineralogia e da matéria orgânica na agregação, cor e radiometria de solos altamente intemperizados do estado de Minas Gerais**, 184 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2000. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/10727> Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/10727> Acesso em: 14 dez. 2019.

CAVALCANTE, E. P.; PRADO, H. do. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de Latossolos da região de Araxá–MG. **Nucleus**, v. 7, n. 2, 2010. DOI: 10.3738/1982.2278-353 Dispo nível em: <https://www.nucleus.feituverava.com.br/index.php/nucleus/article/view/353> Acesso em: 14 dez. 2019.

CURI, N. (coord.). Vocabulário de Ciência do Solo. Campinas: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 88p., 1993. Disponível em: [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=329535&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22CURI,%20N.%20\(Coord.\).%22&qFacets=autoria:%22CURI,%20N.%20\(Coord.\).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=329535&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22CURI,%20N.%20(Coord.).%22&qFacets=autoria:%22CURI,%20N.%20(Coord.).%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1) Acesso em: 22 fev. 2020.

DE ASSIS CAROLINO, J.; GUERRA, O. C.; ARAÚJO, W. P.; SOUSA, J. Y. B. de; ALMEIDA, É. S. A. B. de; BARRETO, H. T. S. Geoestatística aplicada ao estudo da salinidade do solo, Sumé-Paraíba. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n. 2, p. 72-81, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v13i2.669> Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/669> Acesso em: 19 dez. 2019.

DIAS, P. P. **Variáveis Fenométricas e Rendimento de Grãos do Crambe Associado a Níveis de Compactação de um Latossolo Argiloso**, 51f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Universidade Estadual do Oeste do Parana, Cascavel, 2014. Disponível em: URI: <http://tede.unioeste.br:8080/tede/handle/tede/781> Acesso em: 19 dez. 2019.

EFFGEN, T. A. M. Soil attributes in function of management in crops of conilon coffee in the South of the Espírito Santo State. 104f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/6597> Acesso em: 14 dez. 2019.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Água em solos arenosos: estabelecimento de déficit hídrico em culturas. In: **XXVII Reunião de Pesquisas de Soja da Região Central do Brasil**, 27, 2005. Cornélio Procópio: EMBRAPA SOJA, p.147-155, 2005. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Doc+265+-+Farias0001_000ge7384r302wx5ok0ylax2lqmbd7ek.pdf Acesso em: 3 jan. 2020.

FERNANDES, Y. A. D.; SILVA, M. T. de O.; PORTELA, J. C.; FARIAS, P. K. P.; SANTOS, S. T. dos; GONDIM, J. E. F. Densidade do Solo e Resistência Mecânica à Penetração de Cambissolos em Agroecossistemas no Semiárido Potiguar. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, CE, ISSN: 1982-7679, v. 12, n. 3, p. 2673, 2018. Disponível em: <https://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/851> Acesso em: 19 dez. 2019.

FERNÁNDEZ, J. E.; DIAZ-ESPEJO, A.; ROMERO, R.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; GARCÍA, J. M.; PADILLA-DÍAZ, C. M.; CUEVAS, M. V. Precision irrigation in olive (*Olea europaea* L.) tree orchards. In: TEJERO, I. F. G.; ZUAZO, V. H. D. **Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment**. Academic Press, p. 179-217, 2018. ISBN: 9780128131640 Disponível em: URL: <https://www.sciencedirect.com/science...> Acesso em: 10 dez. 2019.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciênc. agrotec.**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001> Acesso em: 10 dez. 2019.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. de J. van (ed.) Física do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 298p, il., ISBN: 978-85-86504-06-8 2010. Disponível em: https://www.sbcs.org.br/loja/index.php?route=product/product&product_id=53 Acesso em: 17 dez. 2019.

FONSÊCA, M. H.; GUERRA, H. O.; LACERDA, R. D. D.; BARRETO, A. N. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos Tabuleiros Costeiros, Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 368-373, ago. 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000400004> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/DtfMpM8v4HGjQgrCMj9Gfjf/?lang=pt> Acesso em: 21 nov. 2019.

FREIRE, J. C. **Retenção de umidade em perfil Oxissol do município de Lavras, Minas Gerais**. USP-ESALQ, 76p., 1975. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Reten%C3%A7%C3%A3o_de_umidade_em_perfil_oxissol.html?id=Dlv0ZwEACAAJ&redir_esc=y Acesso em: 3 jan. 2020.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, V.; OLIVEIRA, I.; MORETI, T. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas sob vegetação nativa. **Enciclopédia Biosfera**, [S.l.], v. 10, n. 18, 2014. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2683>. Acesso em: 12 jan. 2020.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA, 2012. Disponível em: <http://www.gammadesign.com/> Acesso em: 20 dez. 2019.

GOMES, J. B. V.; BOLFE, E. L.; CURI, N.; FONTES, H. R.; BARRETO, A. C.; VIANA, R. D. Variabilidade espacial de atributos de solos em unidades de manejo em área piloto de produção integrada de coco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.6, p.2471-2482, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600024> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/h5f4zfJBRXnvWHFzP88YNVn/?lang=pt> Acesso em: 23 nov. 2019.

GOMES, N. M.; FARIA, M. A. de; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007. Campina Grande, PB, UAEAg/UFCG, 2007. <http://www.agriambi.com.br> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/m6L4FQJwcNm3zRdF538BPFw/?lang=pt&format=pdf> Acesso em: 8 dez. 2019.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. de D. V. da. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um argissolo vermelho. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001. DOI:<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v23i0.2570> Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2570> Acesso em: 22 nov. 2019.

GONZÁLEZ PEREA, R.; DACCACHE, A.; RODRÍGUEZ DÍAZ, J. A.; CAMACHO POYATO, E.; KNOX, J. W. Modelling impacts of precision irrigation on crop yield and in-field water management. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 3, p. 497-512, 2018. URI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-017-9533-6> Disponível em: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/12504> Acesso em: 20 jul. 2020.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, v. 89, n. 1-2, p. 1-45, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001670619800078> Acesso em: 20 dez. 2019.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 169-177, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/tKgsKVT4V4kJd3LJVzZVJvk/?lang=pt&format=pdf> Acesso em: 22 set. 2020.

GÜLSER, C.; EKBERLI, I.; CANDEMIR, F.; DEMIR, Z. Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field. *Eurasian J Soil Sci*, v.5, n.3, p.192-200, 2016. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/222129> Acesso em: 12 dez. 2019.

HEDLEY, C. B.; ROUDIER, P.; YULE, I. J.; EKANAYAKE, J.; BRADBURY, S. Soil water status and water table depth modelling using electromagnetic surveys for precision irrigation scheduling. **Geoderma**, v. 199, p. 22-29, 2013. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.07.018 Disponível em: <https://in.booksc.me/book/21262582/dc66cb> Acesso em: 10 dez. 2019.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de pedologia**, n.4, 2.ed., 2007. Disponível em: <https://www.slideshare.net/gabrielalpp/manual-de-pedologia-ibge> Acesso em: 18 dez. 2019.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Oxford University Press. New York, 561p, 1989. ISBN 0-19-505012-6, ISBN 0-19-505013-4 DOI:10.1016/0098-3004(91)90055-I, Corpus ID: 60627489 Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Introduction-to-Applied-Geostatistics%3A-by-Edward-Hohn/6a2d6d600eb377326836f8aa7fa4927b88af868d> Acesso em: 10 jan. 2020.

IŞIK, M. F.; SÖNMEZ, Y.; YILMAZ, C.; ÖZDEMİR, V.; YILMAZ, E. N. Precision irrigation system (PIS) using sensor network technology integrated with IOS/Android application. **Applied Sciences**, v. 7, n. 9, p. 891, 2017. <https://doi.org/10.3390/app7090891> Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/9/891> Acesso em: 11 dez. 2019.

JOAQUIM, A. C.; BELLINASSO, I. F.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. D.; BARATA, M. Q. F. Potencial e manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar. **Seminário Copersucar de Tecnologia Agrônômica**, v. 6, p. 1-10, 1994. <https://www.copersucar.com.br> Acesso em:

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G. L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n.4, p.845-855, ago. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400009> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/jCDkTGWBkfJDzPm5hwTWCpJ/?lang=pt> Acesso em: 20 nov. 2020.

KESTRING, F. B. F. **Geostatistical analysis of thematic maps of soybean yield with diferente sampling grids**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2011. URI: <http://tede.unioeste.br:8080/tede/handle/tede/2818> Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/2818> Acesso em: 13 jan. 2020.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agrônômica Ceres, 262p., 1979. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/manual-de-edafologia-relacao-solo-planta/oclc/709510574> Acesso em: 25 nov. 2020.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e a disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, REGETE-iSSN 2236 1170 , v. 19, n. 1, p. 21-29, jan.-abr. 2015. Disponível em: <https://www.google.com/url?Sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahukewjrm6cygaj1ahw5erkghs90aa4qfnoecaoqaw&url=https%3A%2F%2Fperiodicos.ufsm.br%2Fregete%2Farticle%2Fviewfile%2F14990%2Fpdf%23%3A~%3Atext%3DT%25C3%25a9cnicas%2520como%2520adi%25C3%25A7%25C3%25a3o%2520de%2520mat%25C3%25a9ria%2Cnecessitem%2520de%2520estudos%2520mais%2520aprofundados.&usq=aovvaw2zllzlkypjhidut>

qxjy1xvg Acesso em: 14 dez. 2019.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, n. 52, p. 119-139, 1951. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-statistical-approach-to-some-basic-mine-valuation-Krige/b8a3d23444cd33f1d74c62d5013f04e6acf0f763> Acesso em: 19 dez. 2019.

LIMA, F. V. D.; SILVINO, G. da S.; MELO, R. S. de S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. de S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, p. 53-63, out.-dez. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/zpLqvdvJDszSxDrQX6wmZKw/?lang=pt&format=pdf> Acesso em: 20 jan. 2021.

LOBATO, M. G. R. Estimativa da capacidade de campo em solos por critérios estáticos e dinâmicos, 58f., 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018. URI: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/39513> Disponível em: 21 já. 2021.

LOPES, M. A. O futuro da gestão de riscos na agropecuária. **Revista de Política Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 3-7, dez. 2017. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1292> Acesso em: 10 dez. 2019.

LOVERA, L. H.; MONTANARI, R.; LIMA, E. de S.; PANOSSO, A. R.; SQUIZATO, M.; OLIVEIRA, I. N. de. Atributos de um Latossolo e Componentes Produtivos da Soja: Uma Abordagem Linear e Geoestatística. **Revista de Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 4, p. 1109-1131, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n4p1109-1131> Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/5947> Acesso em: 12 mar. 2021.

LUNDGREN, W. J. C.; SOUZA, I. F. de; LUNDGREN, G. A. Krigagem na construção de mapa pluviométrico do Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 13-22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170002> Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233901> Acesso em: 10 jan. 2020.

MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S. de; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUSA, V. F. de. Manejo da água de irrigação, 76p. In: SOUSA, V. F. DE; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**, Cap. 5, Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 771p.: il., 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55931/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap5.pdf> Acesso em: 16 dez. 2019.

MENDES, D. F.; JORGE, R. F.; ALMEIDA, C. X. de. **Variabilidade Espacial de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho sob Cafeicultura na Região do Cerrado Mineiro**. XXI ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XVII ENCONTRO LATINOMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO E VII ENCONTRO DE INICIAÇÃO À DOCÊNCIA, Universidade do Vale do Paraíba. 2017. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/anais/arquivos/RE_1207_1242_01.pdf Acesso em: 22 mar. 2021.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHR, R. B.; ANDRADE, J. G. de. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental [on-line]**. v.13, n.1, p.39-45, 2009. ISSN 1415-4366. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000100006> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/bjvCShHmjSNdTnhJpCZG9hr/abstract/?lang=pt> Acesso em: 20 nov. 2019.

MIRANDA, E. E. V.; LANÇAS, K. P.; SILVA, R. B. Modelagem e mapas da capacidade suporte de carga de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, v. 22, p. 42-54, 2007. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNSP_ed62f37c11bf36c49216dba28770d9c3 Acesso em: 23 nov. 2019.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTOS, L. L.; HERNANDO, I. D.; PANACHUKI, E. Densidade do solo e densidade relativa de um latossolo vermelho submetido a diferentes usos. **Agrotropica**, v. 29, n. 1, p. 31-38, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/revista-agrotropica/revista-volumes/2000-a-2010/revista-agrotropica-vol-29-no-1-2017.pdf> Acesso em: 19 dez. 2019.

OLIVEIRA, I. A. de; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E. de; FREITAS, L. de; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. da. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de argissolos da Região de Manicoré. AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.3, p.668-681, maio-jun. 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140496> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcS/a/BSNtbVm8wvFgj53NrSft5RM/?lang=pt> Acesso em: 21 nov. 2019.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. F. de. **Modelagem espacial dos atributos do solo sob diferentes ocupações em uma microbacia perene de vertente do semiárido**, 102 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/tede/580> Acesso em: 19 dez. 2019.

OLIVEIRA, P. J. de. de. **Irrigação de precisão para a cultura de cebola**. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/153820/oliveira_pjd_dr_jabo.pdf?sequence=3 Acesso em: 20 jan. 2020.

PEREIRA, W. C. **Simulação Geoestatística via Métodos Convolutivos**. Dissertação 62p., (Mestrado em Estatística), Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Belém, 2011. Disponível em: <http://www.ppgme.ufpa.br/doc/diss/Disserta%20C3%A7%20A3oFinal.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 66-79, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010> Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716301313> Acesso em: 14 dez. 2019.

PRADO, H. A. B.; PRADO, T. A. B.; VITTI, A. C.; PRADO, H. **Eficiência da matriz de colheita nos diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar**. In: CONGRESO

SUELOS 2015 – POR EL MANEJO SOSTENTABLE DEL SUELO, 2015, La Havana, Cuba, Instituto de Suelos, 2015. Disponível em: <http://cubaeventos.com/index.php/es/categorias-eventos/cien/item/congreso-suelos-2015.html> Acesso em: 20 jul. 2020.

PRADO, H. D.; PÁDUA JUNIOR, A. L.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. D.; CARVALHO, J. D.; DONZELI, P. L. Solos e ambientes de produção. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, p. 179-204, 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/17769/1/2222.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2019.

PRADO, R. de M.; NATALE, W. Alterações na granulometria, grau de flocculação e propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico, sob plantio direto e reflorestamento. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v. 25, n. 1, p. 45-52, 2003. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2344> Acesso em: 20 fev. 2020.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.12, n.3, p.211-216, 1988. Disponível em: <https://www.rbcsjournal.org/pt-br/> Acesso em: 16 dez. 2019.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciências do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007. Disponível em: http://fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/2007_Topicos.pdf Acesso em: 20 set. 2020.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. **Tópicos em ciência do solo**, v.7, p. 1-54, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. Disponível em: http://www.fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/122.pdf Acesso em: 16 dez. 2019.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de F.; SAMPAIO, F. de M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n.4, p. 1167-1175, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/6dMcQxC43F8tMMKrfWkBXw/abstract/?lang=pt> Acesso em: 18 dez. 2019.

ROSA, H. A.; VELOSO, G.; SECCO, D.; RUFFATO, G. G.; MARCONDES, L. C.; SANTOS, R. F. Efeitos do tempo de adoção do sistema plantio direto em atributos físicos de um Latossolo argiloso. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 5, n. 2, p. 165-174, 2012. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjQj4n1irH1AhUcppUCHaIPC18QFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fcultivandosaber.fag.edu.br%2Findex.php%2Fcultivando%2Farticle%2Fdownload%2F438%2F350%2F&usg=AOvVaw3r7zE_16DsmLW68AEuuLQH Acesso em: 9 out. 2020.

ROSA, S. L. K.; SOUZA J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; PIEKARSKI, K. R.; OLIVEIRA, C. T. Determinação dos atributos físico-hídricos de três tipos de solos dos Campos Gerais. **Anais... CONVIBRA**, 2018. Disponível em: <https://maissoja.com.br/determinacao-dos-atributos-fisico-hidricos-de-tres-tipos-de-solos-dos-campos-gerais/> Acesso em: 13 out.

2020.

RÜHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M.; GRAEFE, J. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. **Geoderma**, v.130, n.3, p.272-283, 2006. DOI:10.1016/j.geoderma.2005.01.024 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248166777_A_new_approach_to_calculate_the_particle_density_of_soils_considering_properties_of_the_soil_organic_matter_and_the_mineral_matrix Acesso em: 15 out. 2020.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do Rio Pajeú em Pernambuco, segundo método geoestatístico. **Revista Tecnologia**, [S.l.], v. 29, n. 2, 2008. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/27>. Acesso em: 12 jan. 2020.

SAMPAIO, E. P.M. **Mineralogia do solo**. Portugal: Universidade de Évora, 2011. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4499/1/Mineralogia%20do%20solo.pdf> Acesso em: 29 maio 2021.

SANCHES, G. M.; GRAZIANO MAGALHÃES, P. S.; JUNQUEIRA FRANCO, H. C. Site-specific assessment of spatial and temporal variability of sugarcane yield related to soil attributes. **Geoderma**, v. 334, p. 90-98, 2019. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/en/publicacao/153287/site-specific-assessment-of-spatial-and-temporal-variability> Acesso em: 21 nov. 2019.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Árvore do conhecimento Cana-de-Açúcar**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica (Ageitec). 2009. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_19_711200516716.html Acesso em: 20 jul. 2020.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 356p. il. color., 5.ed. rev. e ampl., ISBN: 978-85-7035-800-4. Brasília, DF: Embrapa, 2018. URL: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub> Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf> Acesso em: 21 jan. 2010.

SILVA, F. J. da; OLIVEIRA, C. A. A. de; ALMEIDA, L. da S.; LIMA, L. P. de; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da produtividade do milho. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 4, n. 3, p. 77-84, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327782328_VARIABILIDADE_ESPACIAL_DA_RESISTENCIA_DO_SOLO_A_PENETRACAO_E_DA_PRODUTIVIDADE_DO_MILHO Acesso em: 22 out. 2020.

SILVA, L. I. da; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M. da; BRITO FILHO, E. G. de; SILVA, G. A. da; SILVA, D. M. P. da; SOUZA, F. G. de; FRAGA, V da S. Variabilidade espacial de atributos físicos de terra preta de índio sob pastagem (*Brachiaria brizantha* sp. L.). In: Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil. **Research, Society and Development**, [S.l.], v. 9, n. 9, p. e514996794, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.6794. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/6794> Acesso em: 7 nov. 2020.

SILVA, F. R. da; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. da. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira Ciências do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Brasil, v. 38, n. 6, p. 1731-1739, 2014. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1802/180232852008.pdf> Acesso em: 11 jan. 2020.

SILVEIRA, A. K. da C.; TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; RODRIGUES, M. do R. L.; CEDDIA, M. B.; FERRAZ, R. D.; SILVA, E. F. da; MACEDO, R. S. Capacidade de retenção de água em amostras de diferentes horizontes de solo na Bacia do Rio Urucu-Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios. [Viçosa, MG]: SBCS; Fortaleza: UFC, 2009. 1 CD-ROM. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/112039/1/2543.pdf> Acesso em: 15 dez. 2019.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 937-944, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600001> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7gqxC8XMkxyFG35739tNzvK/?lang=pt> Acesso em: 23 nov. 2019.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 40, n.1, p. 48-56, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000243> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7gqxC8XMkxyFG35739tNzvK/?lang=pt> Acesso em: 23 nov. 2019.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**, 2.ed. SBN: 0198042787, 9780198042785. Google Books, 344p. Oxford university press, 2008. DOI:10.1093/oso/9780190630881.001.0001 Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=XcJnDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=SPOSITO,+G.+The+chemistry+of+soils&ots=iHo4d5GV-E&sig=faRS2kEZqd3nrMXOO9ADGdH9kt4#v=onepage&q=SPOSITO%2C%20G.%20The%20chemistry%20of%20soils&f=false> Acesso em: 16 dez. 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. (org.). **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**, 6.ed. Tradução Alexandra Antunes Mastroberti. Artmed Editora Ltda., Porto Aegre, RS, 2017. Disponível em: https://grupos.moodle.ufsc.br/pluginfile.php/474835/mod_resource/content/0/Fisiologia%20e%20desenvolvimento%20vegetal%20-%20Zair%206%20AAed.pdf Acesso em: 15 dez. 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Embrapa. 573p, 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 574 p.:il. Color, 2017. ISBN 978-85-7035-771-7 Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209> Acesso em: 16 dez. 2019.

TOLOSANA-DELGADO, R.; MUELLER, U.; VAN DEN BOOGAART, K. G.; PAWLOWSKY-GLAHN, V. EGOZCUE, J. J. Geostatistics for compositional data: an

overview. **Math Geosci**, n.51, p. 485-526, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11004-018-9769-3> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11004-018-9769-3> Acesso em: 21 dez. 2019.

VANNI, S. M. **Modelos de regressão**: Estatística aplicada. 177p., 1998. São Paulo. Legmar Informática, Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/sergio-marcos-vanni/modelos-de-regressao-estatistica-aplicada/26329595> Acesso em: 04 dez. 2019

VENDRUSCULO, L. G; CARVALHO, J. R. P. de. **Uso de indicadores para escolha do melhor modelo de semivariograma**. XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, São Pedro, SP, 2004. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/544_wordID-hDyHd5MyNK.pdf Acesso em: 10 jan. 2020.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54, n.2, p.405-412, 1995. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051995000200019> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/VLgKXswhzgh5Gb75ZbxKqSm/?lang=pt> Acesso em: 12 fev. 2020.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. *In*: STEWART, B. A. (ed.) **Advances in Soil Science**, v.3, p.1-70, New York, Springer, 1985. ISBN: 9781461250906 DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5090-6_1 Disponível em: <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8q172/quantitative-spatial-analysis-of-soil-in-the-field> Acesso em: 23 nov. 2019.