



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA**  
**CURSO DE AGRONOMIA**

**GUILHERME SCHMITZ LIBRELOTTO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À**  
**PENETRAÇÃO EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHETO EM**  
**BURITI - MA**

Chapadinha - MA

Dezembro de 2022

**GUILHERME SCHMITZ LIBRELOTTO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À  
PENETRAÇÃO EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHETO EM  
BURITI - MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora no Centro de Ciências de Chapadinha da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Khalil de Menezes Rodrigues

Chapadinha – MA

Dezembro de 2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a)  
autor(a).

Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Schmitz Librelotto, Guilherme.

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À  
PENETRAÇÃO EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHETO EM  
BURITI - MA

/ Guilherme Schmitz Librelotto. - 2022.

37 f.

Orientador(a): Khalil de Menezes Rodrigues.

Curso de Agronomia, Universidade Federal do Maranhão,  
CCCh/UFMA, 2022.

1. Compactação do solo. 2. Dependência espacial. 3.  
Glycine max. 4. Leste Maranhense. 5. Pennisetum glaucum.

I. de Menezes Rodrigues, Khalil. II. Título.

**GUILHERME SCHMITZ LIBRELOTTO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À  
PENETRAÇÃO EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHETO EM  
BURITI - MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora no Centro de Ciências de Chapadinha da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Banca Examinadora:

---

Prof. Khalil de Menezes Rodrigues  
Universidade Federal do Maranhão

---

Profa. Dra. Maryzélia Furtado de Farias  
Universidade Federal do Maranhão

---

Prof. Dr. Washington da Silva Sousa  
Universidade Federal do Maranhão

## **Dedico**

Primeiramente a Deus, a meus pais, Carlos Alberto de Botoli Librelotto, Simoni Schmitz Librelotto, meu irmão Igor Schmitz Librelotto, minha noiva Lourena Késsia Cardial do Nascimento aos familiares e amigos que sempre me incentivaram e acreditaram no meu potencial em minha trajetória acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me concedido a vida, por me dar forças, iluminar na caminhada e por esta comigo em todos os momentos permitindo que tudo isso acontecesse. Aos meus pais, Carlos Alberto de Bortoli Librelotto, Simoni Schmitz Librelotto pela educação e apoio que sempre me ofereceram e minha irmão Igor Schmitz Librelotto que sempre me deu apoio para que isso acontecesse. Esse TCC também é de vocês.

Agradeço a todos meus familiares maternos e paternos, que sempre que possível se fizeram presente. A meus avós que sempre que possível se fizeram presente, dando apoio e confiança em tudo o que fiz nessa jornada. Aos que não podem mais estar presente fisicamente mais sim na lembrança, a meu avô Sadi Schmitz que sempre me apoio, aconselhou, e ensinou a ser o que sou hoje, e a meus tios Fabiano Schmitz e Soyara Colognese Schmitz que sempre me apoiaram, aconselharam e ensinaram como seguir um caminho concreto.

A minha Noiva Lourena Késsia Cardial do Nascimento que jamais me negou apoio, carinho e incentivo, para que eu nunca desistisse desse trabalho. Obrigado amor, por aguentar o estresse que quase não tenho e ansiedade. Sem você do meu lado esse trabalho não seria possível.

Agradeço ao laboratório Plintita, e por todos que de alguma forma fizeram parte dele diretamente ou indiretamente, lá passei momentos de alegria, raiva, tristeza, gratidão e muito aprendizado.

A meu orientador e mentor professor Khalil de Menezes Rodrigues, que foi um segundo pai, irmão, amigo, dentro da minha vida acadêmica e fora dela, obrigado pelos seus direcionamentos, ensinamentos, apoio e contribuição ao longo dessa jornada para que tudo isso acontecesse, obrigado por me aceitar como orientado.

A Professora Régia Maria Reis Gualter que junto ao professor Khalil me auxiliaram em um caminho concreto em minha caminhada acadêmica e fora dela, sempre que possível dando apoio e contribuição e a seus ensinamentos, obrigado por me deixarem fazer parte de vossa família.

Agradeço ao professor Gregori Ferrão, pelos seus ensinamentos, tanto acadêmicos como pessoal, e por ter me incentivado a me tornar um profissional melhor.

Agradeço, a meus compadres Dyego Nascimento Sousa, Jeanne Sousa, a meus amigos Laureliza Coelho e família, Leydson Martins, Isabele Monteles, Rick Simões, Henrique Augusto, Caio Cesar, Elisson Cardoso, Thaynara Mellody, Kananda Vaz, Mariana Viana, Lucas Guse, Valber Pacheco e aos meus cunhados Ursula Cardial do Nascimento e Francisco Reinaldo, e a todos não mencionados, mas que fizeram parte deste círculo, que deram uma contribuição valiosa para a minha jornada acadêmica e fora dela. Obrigado pelos conselhos, palavras de apoio, puxões de orelha, as risadas, que vocês compartilharam comigo nessa etapa tão desafiadora da vida acadêmica, também fizeram toda a diferença. Minha eterna gratidão.

Agradeço a banca pelo aceite em fazer parte dessa etapa da minha carreira acadêmica.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação. Por fim, mas não menos importante, deixo uma palavra de gratidão a todas as pessoas que de alguma forma tocaram meu coração e transmitiram força e confiança em mim, o meu muito obrigado.

## Sumário

I. INTRODUÇÃO .....	3
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivos Específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Resistência do solo à penetração .....	5
3.2. Geostatística e análise multivariada .....	5
3.3. Cultivo mínimo .....	7
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	8
4.1. Área de estudo.....	8
4.2. Variáveis analisadas .....	9
4.2.1. Resistência do solo à penetração .....	9
4.2.2. Análise das variáveis da planta.....	11
4.2.3. Análise geostatística dos dados.....	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	12
6. CONCLUSÕES.....	22
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
8. ANEXOS.....	28

# VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHETO EM BURITI - MA

## RESUMO

A sucessão de culturas consiste em alternar duas espécies vegetais no decorrer do tempo numa mesma área agrícola. A compactação do solo dificulta o desenvolvimento das raízes, resultando em menor crescimento radicular e conseqüente menor assimilação de nutrientes e absorção de água no solo. A cultura do milho (*Pennisetum glaucum* (L.) é de fácil cultivo em razão da sua versatilidade de usos, sendo uma planta rústica, de crescimento rápido e capacidade de romper camadas compactadas com um sistema radicular profundo e vigoroso, o que a torna eficiente no uso de água e nutrientes e recicla nutrientes. Objetivou-se com a pesquisa verificar a dependência espacial da resistência do solo à penetração na cultura do milho em sucessão à soja no município de Buriti na região Leste Maranhense. Para avaliar a variabilidade espacial foram demarcados 39 pontos em grade na área de estudo e foi avaliada a resistência do solo à penetração na cultura do milho, a umidade gravimétrica na profundidade de 0-20 cm e de 20-40 cm, a resistência do solo à penetração até a profundidade de 60 cm e as variáveis de planta: altura de planta, altura de folha bandeira, tamanho de panícula, diâmetro de colmo, diâmetro de panícula, peso total de panícula, massa seca em parcela de 1m<sup>2</sup>. Na análise dos dados foi realizado a estatística descritiva, correlação linear de Pearson, análise multivariada de redundância. Para análise de dependência espacial foram utilizados semivariogramas e interpolados em mapas temáticos por krigagem. A resistência do solo à penetração de 0-10 cm mostrou-se inversamente correlacionada a todos os outros atributos da planta e maior valor de coeficiente de variação. As resistências à penetração do solo de 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 e de 50-60 cm apresentaram correlação as variáveis de planta. O diâmetro de colmo possuiu correlação positiva com a resistência de 10-20 cm.

**Palavras-chave:** *Glycine max*, *Pennisetum glaucum*, dependência espacial, compactação do solo, Leste Maranhense.

## ABSTRACT

The succession of crops consists of alternating two plant species over time in the same agricultural area and soil compaction hinders root development, resulting in less root growth and consequently less nutrient assimilation and water uptake in the soil. The culture of millet (*Pennisetum glaucum* (L.)) is easy to grow because of its versatility of uses, being a rustic plant of fast growth and ability to break compacted layers with a deep and vigorous root system, which makes it efficient in the use of water and nutrients and recycles nutrients. The objective of the work was to verify the spatial dependence of soil resistance to penetration in the millet crop in succession to soybeans in the municipality of Buriti in the East Maranhão region. To evaluate the spatial variability, 34 grid points were demarcated in the study area and soil resistance to penetration was evaluated in the millet crop, gravimetric humidity at 0-20 cm and 20-40 cm depth, soil resistance to penetration up to 60 cm depth and plant variables: plant height, height of the flag leaf, panicle size, collar diameter, panicle diameter, total panicle weight, dry mass in 1m<sup>2</sup> plot. In the data analysis was performed descriptive statistics, Pearson's linear correlation, multivariate redundancy analysis. For spatial dependence analysis semivariograms were used and interpolated into thematic maps by kriging. The soil resistance to penetration of 0-10 cm was shown to be inversely correlated to all other plant attributes and higher coefficient of variation value. The soil penetration resistance of 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 and 50-60 cm showed correlation with the plant variables. The thatch diameter was positively correlated with the resistance of 10-20 cm.

**Key-words:** *Glycine max*, *Pennisetum glaucum*, spatial dependence, soil compaction, East Maranhão.

## I. INTRODUÇÃO

A sucessão de culturas consiste em alternar duas espécies vegetais no decorrer do tempo, numa mesma área agrícola, para o processo de preservação ambiental, que influi positivamente na recuperação, manutenção e melhoria dos recursos naturais, viabilizando melhores produtividades com a mínima alteração ambiental.

A qualidade do solo busca melhor aproveitamento dos recursos que beneficiam a planta, sendo diversas qualidades, desde a liberação e nutrientes até a fixação biológica de nitrogênio. Entre isso, existe a resistência do solo à penetração, medida pelo penetrômetro de impacto, sendo um indicativo físico de compactação do solo. Quando essa compactação for elevada, pode afetar a produtividade das culturas agrícolas por reduzir porosidade do solo, que é um fator primordial para a trocas gasosas e infiltração de água no solo.

O uso da geoestatística para aferição dos parâmetros físicos e químicos do solo pelos semivariogramas é uma técnica utilizada para caracterização das variabilidades, espacial e temporal. A geoestatística possibilita a criação de mapas para melhor entendimento dos resultados possibilitando a melhor leitura e entendimento dos mesmos e visa criar melhor entendimento do solo nas propriedades, possibilitando o aumento das produtividades.

A cultura do milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) é de fácil instalação e tem-se expandido de forma acelerada no Cerrado Brasileiro em razão da sua versatilidade de usos, requer poucos insumos, pois a planta tem rusticidade, crescimento rápido e capacidade de romper camadas compactadas com um sistema radicular profundo e vigoroso, o que a torna eficiente no uso de água e nutrientes além de reciclar nutrientes. A cultura apresenta resistência à seca, adaptação a solos de baixa fertilidade e excelente capacidade de produção de massa seca; atualmente, o uso do milheto na agricultura brasileira vem aumentando de forma rápida para a produção de palhada no sistema de plantio direto, cada vez mais empregado no Cerrado; além disto, possui um sistema radicular profundo que descompacta e estrutura o solo e (BOER et al., 2007).

O penetrômetro de impacto dinâmico de STOLF, possibilita o estudo da resistência a penetração do solo junto com as análises estatísticas possibilitando verificar os graus dessas compactações nos solos, tendo como conjunto os mapas de variabilidade espacial utilizando a geoestatística.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Verificar a dependência espacial da resistência do solo à penetração na cultura do milho em sucessão à soja na região de Buriti no Leste Maranhense.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Verificar a influência da resistência do solo à penetração em atributos de diâmetro do caule, comprimento da panícula e peso de massa seca com moldes na geoestatística.

Verificar quais variáveis estão associadas a maior ou menor produtividade.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Resistência do solo à penetração**

A compactação é uma alteração estrutural que promove reorganização das partículas e de seus agregados (STONE et al., 2002) e com o penetrômetro de impacto pode-se determinar a resistência do solo à penetração (Stolf, 1991). Os sistemas de preparo do solo promovem modificações nas propriedades físicas como a agregação do solo, a densidade e a porosidade do solo (DE CAMPOS et al., 2015).

Os sistemas de preparo do solo devem oferecer condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. No entanto, dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, eles podem promover a degradação da qualidade física do solo, com restrições ao crescimento radicular (GONÇALVES, S. B. et al, 2017).

A macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo (Dias Júnior e Pierce, 1996) que pode ser avaliada medindo-se a resistência do solo à penetração. De forma geral estas propriedades funcionam como indicadores de possíveis restrições ao crescimento radicular das culturas, podendo limitar a adsorção e a absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea (MANDARINO et al., 2015).

Vários são os fatores que interferem na magnitude da infiltração de água no solo. Esses fatores estão associados às propriedades físicas do solo e do manejo adotado. Textura, estrutura, porosidade, rugosidade superficial, restos culturais, matéria orgânica, atividade biológica do solo (KURYLO, 2005), manejo do solo e umidade inicial, além do método utilizado (BRITO et al., 1996) são alguns dos fatores apontados como responsáveis pelas variações na taxa de infiltração.

A descompactação do solo utilizando implementos de hastes como escarificadores produzem superfícies mais rugosas que os implementos de discos, como grades pesadas, e têm por objetivo aumentar a porosidade, reduzir a densidade do solo e, ao mesmo tempo, romper as camadas superficiais encrostadas e camadas subsuperficiais compactadas (DRESCHER et al., 2011).

#### **3.2. Geoestatística e análise multivariada**

O uso da geoestatística na agricultura favorece a modelagem da variabilidade espacial dos mais diversos atributos de solo e planta (VIEIRA, 2000) possibilitando o entendimento de muitos parâmetros até então ignorados. De acordo com Grego e Vieira (2005) e Siqueira et al. (2012) a ampla diversidade dos resultados dos estudos de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo está associada, em parte, ao sistema de manejo adotado. O estudo da variabilidade espacial de atributos do solo é particularmente importante em áreas sob diferentes manejos (SOUZA et al., 2001).

A geoestatística, pela análise de semivariogramas, tem permitido abordagens eficientes para a caracterização das variabilidades principalmente por considerar, simultaneamente, a variação espacial de um número elevado de variáveis que influenciam os sistemas de produção agrícolas, espacial e temporal em ciências agrárias, (SILVA et al., 2010), podendo indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade espacial sobre a produção das culturas, como também para estimar respostas das plantas a determinadas práticas de manejo.

A análise estatística multivariada surgiu como importante ferramenta de obtenção de quantidade maior de informação que dificilmente seria gerada com o uso de métodos univariados (FREDDI et al., 2008). A análise multivariada pode servir para agrupar indivíduos com características semelhantes e estudar suas correlações (Martin et al., 2008), possibilitando a classificação antecipada de objetos similares, em grupos, a discriminação dos objetos de acordo com os grupos previamente existentes na população, a investigação das relações de dependência entre as variáveis e a comparação de populações ou validação de suposições por meio de testes de hipóteses (MINGOTI, 2005), utilizando vários atributos forma agrupamentos de populações com características similares e permite a obtenção de um melhor entendimento das variações dos processos que ocorrem no solo (SENA et al., 2002).

O conhecimento do processo e sua relação com as características do solo são de fundamental significância para o eficiente manejo do solo e da água nos cultivos agrícolas (REICHARDT, 1996).

A correlação é utilizada junto a geoestatística, fornecendo um número que resume o grau de relacionamento linear entre as duas variáveis, junto a análise de regressão que fornece uma equação que descreve o comportamento de uma das variáveis em função do comportamento da outra variável. Na correlação, não se tem nenhum controle sobre as variáveis sendo estudadas, onde elas são observadas como ocorrem no ambiente natural,

sem nenhuma interferência, isto é, as duas variáveis são aleatórias, sendo necessário estudar o relacionamento entre duas ou mais variáveis.

### **3.3. Cultivo mínimo**

Os sistemas de manejos conservacionistas, ou seja, aqueles que demandam menor revolvimento de solo possível, aliado à manutenção da cobertura com palha, podem afetar positivamente as características químicas, físicas e biológicas do solo com a redução da erosão, redução do uso de máquinas, interferindo por sua vez na distribuição das raízes, com reflexos no crescimento da parte aérea, interagindo conseqüentemente, no rendimento de grãos da espécie em cultivo a possibilidade de plantio em épocas chuvosas; a possibilidade de utilizar forma mais intensa à área de plantio; controle de plantas daninhas. (FURNELATO et al., 2015). A redução da erosão é obtida pela existência dos resíduos culturais na superfície do solo, assim como pelo aumento da rugosidade superficial e da porosidade, melhorando, desse modo, a infiltração de água no seu perfil. (MONTANARI et al., 2012).

As conseqüências diretas da compactação do solo estão as reduções da porosidade e da infiltração de água e o aumento da resistência à penetração de raízes. A manutenção de pelo menos 30% de cobertura sobre a superfície do solo se caracteriza cultivo mínimo e ocorre a redução da evaporação e aumenta a taxa de infiltração de água, ocasionando maior disponibilidade da água às culturas, podendo refletir em maiores produtividades (MARX et al., 2017).

A evaporação é a principal causa de perda de água armazenada, no solo no período que vai desde a semeadura até quando o mesmo estiver totalmente coberto pela cultura. Na prática conservacionista da rotação de culturas, deve-se utilizar a adubação verde como forma de reduzir custos com adubos, realizar a melhoria da qualidade químico-física do solo e a proteção contra agentes climáticos, durante a entressafra. A palha também tem a qualidade de reduzir a variação térmica e aumentar a retenção de água no solo, nos períodos de estiagem. (ANDREOTTI *et al.*, 2008).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

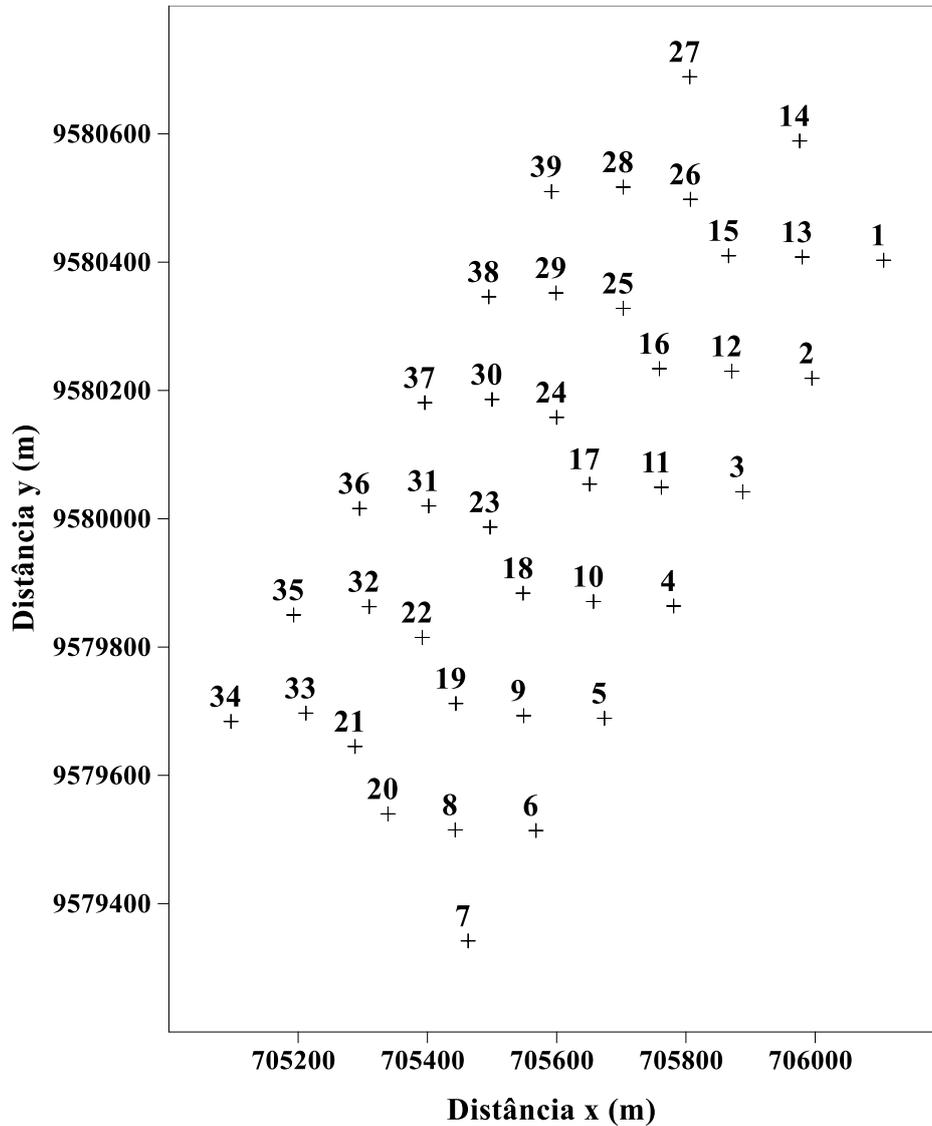
O estudo foi realizado na Fazenda Chapadão, no município de Buriti Estado do Maranhão. A área foi escolhida por apresentar diferenças na altura das plantas e na produtividade da cultura da soja e do milho. O estudo foi desenvolvido entre maio e junho de 2017 e entre setembro e outubro de 2022. Utilizando o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS et al., 2018), o solo da área de estudo foi classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico, A moderado, textura média, fase Cerrado, relevo plano. O clima da região é do tipo Cwa, tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, segundo a classificação climática internacional de Köppen-Geiger, com temperatura média anual de 21,7 °C e precipitação pluvial anual de 1.325 mm (SETZER, 1966).

A área avaliada possui 82 hectares e declividade média de 3% com o cultivo da soja (*Glycine max*) variedade Paragominas sementes cajueiro e sucessão de milho *Pennisetum glaucum*. (Figura 1).



**Figura 1** – Imagem aérea da área de estudo. Google (2017). Buriti, MA.

Para avaliar a dependência espacial das variáveis foi utilizada uma grade com 39 pontos espaçados, aproximadamente a 60 metros na linha e a 30 metros nas entrelinhas (Figura 2). Para localização dos pontos de amostragem foi utilizado o GPS utilizando o sistema de coordenadas cartesianas bidimensional UTM e o datum SAD69.



**Figura 2** - Grade dos 39 pontos de amostragem. Buriti - MA

## 4.2. Variáveis analisadas

### 4.2.1. Resistência do solo à penetração

Para medir a resistência do solo à penetração foi utilizado o penetrômetro de impacto dinâmico modelo IAA/Planalsucar – Stolf (STOLF et al., 1983) Figura 3 e sua utilização seguiu a metodologia de STOLF (1984). As avaliações foram realizadas com o solo próximo à capacidade de campo até à profundidade de 60 cm. Nos cálculos da resistência do solo à penetração foram utilizados os procedimentos descritos por STOLF (1990) e STOLF (1991) baseando-se na Equação 1, onde para a obtenção das forças (F) por unidade de área foram divididas pela área da base do cone (A) de acordo com STOLF (1991). Os resultados dos impactos foram agrupados de 10 em 10 cm até à profundidade de 60 cm, com base nos trabalhos de STOLF.

$$R = \left( \frac{(M + m)g + \left( \frac{M}{M + m} * \frac{Mgh}{x} \right)}{A} \right) * 10$$

R: resistência do solo à penetração (MPa); M: massa que provoca o impacto (kg); m: massa dos demais componentes (kg); g: aceleração da gravidade (m s<sup>-2</sup>); h: altura de queda (cm); x: penetração por impacto (cm); A: área da base do cone (cm<sup>2</sup>).



FONTE: Solotest

**Figura 3** - Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar – Stolf.

#### **4.2.2. Análise das variáveis da planta**

Para comparar os dados físicos do solo, foram coletados dados de plantas inteiras de milho localizadas dentro do quadro de 1 (um) m<sup>2</sup> em cada ponto amostral. Foi obtido o diâmetro do caule com o paquímetro digital, peso de massa seca, peso de panícula, tamanho de panícula, diâmetro de panícula, tamanho de folha bandeira, altura de planta.

#### **4.2.3. Análise geoestatística dos dados**

Os dados foram analisados pela estatística descritiva e calculados: valor mínimo, valor máximo, média, desvio padrão, e os coeficientes de variação (CV), assimetria e curtose. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KOLMOGOROV e SMIRNOV, 1933) a 5 % de significância utilizado o programa SURFER<sup>®</sup> versão 11.0 (2012). Para avaliar a dependência espacial entre as amostras foram construídos semivariogramas estimados a partir de  $\gamma^*(h)$  (Equação 14) utilizando o programa SURFER<sup>®</sup> versão 11.0 (2012). Os dados foram interpolados por krigagem. De acordo com (GONTIJO et al., 2012) podem-se interpolar valores em quaisquer posições no campo de estudo, sem tendência e variância mínima quando as variáveis apresentarem dependência espacial entre as amostras.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise da estatística descritiva dos dados apresentados na Tabela 1, temos nos atributos de planta o maior coeficiente de variação (CV) do peso total das panículas (PTP) seguido pela massa seca com o segundo maior CV. Esses atributos de planta tiveram um alto CV, pois são os totais de cada amostra coletada, explicando a alta variação dos valores mínimo e máximo que proporcionaram uma maior média e maior desvio padrão. O menor valor de CV foi do diâmetro de panícula, podendo ser explicado pela baixa expressão genética da planta pelos atributos de solo. Nos atributos de solo os maiores CV foram das camadas de resistência do solo à penetração de 0-10 (r10) e de 10-20 cm (r20) e o menor valor foi da umidade gravimétrica do solo na profundidade de 20-40 cm (umi40).

Os maiores valores de CV nos atributos de solo explicam os maiores valores nos atributos de planta, pois estão diretamente interrelacionados, os atributos de solo como variáveis independentes e os atributos de planta como variáveis dependentes. Os maiores valores de CV nas camadas de resistência do solo r10 e r20 podem indicar um início de compactação do solo podendo ser ocasionados pelo manejo do solo inadequado em alguns pontos, até mesmo o rodado do trator com tratos culturais pode promover a compactação do solo.

No atributo de solo, a resistência a penetração do solo de 0-10 cm, obteve-se os menores valores médios, sendo decorrente de seu valor mínimo e máximo serem baixos, ocasionando uma menor média em relação aos outros atributos analisados. Os altos valores de coeficiente de variação, assimetria, curtose e o do teste de normalidade não normal podem ser explicados pela maior variabilidade dessa variável na área de estudo indicando grandes variações em diferentes pontos. Esses valores altos podem ser explicados pelo manejo do solo onde essa camada sofre maior ação mecânica da ação do manejo do solo, além de maior evaporação da água interferindo na análise de resistência do solo à penetração. Foi verificado dados semelhantes aos apresentados Rodrigues et al. (2014) que verificou um aumento da resistência do solo à penetração com a profundidade com valores maiores entre 20 e 30 cm.

**Tabela 1** - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo e das variáveis do milheto. Buriti – MA.

	Mínimo.	Máximo	Média	D.P	C.V%	Assim.	Curtose	K.S
<b>AP</b>	82,67	119	97,91	9,35	10	0,87	0,39	0,15
<b>AFB</b>	38,97	66,68	51,23	6,65	13	0,60	-0,07	0,12
<b>TP</b>	9,00	14,94	11,29	1,32	12	0,64	0,74	0,11
<b>DC</b>	3,68	5,69	4,64	0,45	10	0,11	0,18	0,12
<b>DP</b>	8,71	12,11	10,34	0,79	08	-0,14	-0,12	0,11
<b>PTP</b>	20	100	52,36	20,08	38	0,80	0,67	0,14
<b>MS</b>	305	915	577,69	147,12	25	0,44	-0,11	0,14
<b>r10</b>	0,62	3,55	1,36	0,55	41	1,98	5,37	<b>*0,22</b>
<b>r20</b>	1,19	4,92	2,26	0,71	32	1,46	4,26	0,13
<b>r30</b>	1,80	5,84	2,93	0,78	27	1,56	4,27	0,14
<b>r40</b>	2,04	4,69	2,82	0,55	19	1,31	2,26	0,14
<b>r50</b>	1,89	3,43	2,65	0,41	16	0,15	-0,89	0,11
<b>r60</b>	1,73	4,01	2,61	0,55	21	0,76	0,39	0,13
<b>umi20</b>	3,97	11,87	7,79	1,98	25	0,00	-0,45	0,07
<b>umi40</b>	5,26	14,47	9,52	1,39	15	0,10	5,73	0,17

DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação; Assim.: Coeficiente de Assimetria; Curtose: Coeficiente de curtose; K.S: teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; AP: altura de planta; AFB: altura da folha bandeira; TP: tamanho de panícula; DC: diâmetro de colmo; DP: diâmetro de panícula; PTP: peso total de panícula; MS: massa seca; R 0-10: Resistência do solo à penetração de 0-10 cm; R 10-20: Resistência do solo à penetração de 10-20 cm; R 20-30: Resistência do solo à penetração de 20-30 cm; R30-40: Resistência do solo à penetração de 30-40 cm; R 40-50: Resistência do solo à penetração de 40-50 cm; R 50-60: Resistência do solo à penetração de 50-60 cm; umi20: umidade gravimétrica do solo na profundidade de 0-20 cm; umi40: umidade gravimétrica do solo na profundidade de 20-40 cm. \*valor não normal pelo teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de significância.

Na análise de correlação linear de Pearson representada na Tabela 2, foi observado que a altura de folha bandeira (AFB), tamanho de panícula (TP), diâmetro de colmo (DC), diâmetro de panícula (DP), peso total de panícula (PTP), e massa seca (MS), tem correlação significativa com a altura de planta (AP), ou seja, essas variáveis foram alteradas de acordo com a altura de planta, principalmente a altura de folha bandeira

(AFB) pois é uma variável dependente de altura de planta (AP). O tamanho de panícula (TP), diâmetro de panícula (DP), peso total de panícula (PTP) e a massa seca (MS), têm correlação com a altura da folha bandeira (AFB), influenciadas pela temperatura e luz, principalmente a matéria seca (MS) que é proporcional à radiação interceptada durante o crescimento vegetativo (Gallagher & Biscoe, 1978). (DE RESENDE et al., 2009) também explica que a influência da temperatura explica a correlação entre diâmetro do colmo (DC), diâmetro da panícula (DP), peso total de panícula (PTP) e massa seca (MS), em correlação ao tamanho da panícula (TP).

O diâmetro do colmo (DC) não teve nenhuma correlação significativa com as variáveis da planta analisadas e nem com as variáveis de solo. Essas variáveis não interferiram na expressão significativa da variável diâmetro do colmo, onde, segundo (DE RESENDE et al., 2009), é uma expressão decorrente da variedade do milho e das quantidades que já foi multiplicado em campo.

**Tabela 2** – Análise de correlação linear de Pearson dos atributos físicos do solo e das variáveis do milho.

	<i>AP</i>	<i>AFB</i>	<i>TP</i>	<i>DC</i>	<i>DP</i>	<i>PTP</i>	<i>MS</i>	<i>r10</i>	<i>r20</i>	<i>r30</i>	<i>r40</i>	<i>r50</i>	<i>r60</i>	<i>umi20</i>	<i>umi40</i>
<b>AP</b>	1,00														
<b>AFB</b>	<b>0,55**</b>	1,00													
<b>TP</b>	<b>0,78**</b>	<b>0,36*</b>	1,00												
<b>DC</b>	<b>0,52**</b>	0,29	<b>0,64**</b>	1,00											
<b>DP</b>	<b>0,44**</b>	<b>0,56**</b>	<b>0,46**</b>	0,20	1,00										
<b>PTP</b>	<b>0,67**</b>	<b>0,49**</b>	<b>0,71**</b>	0,21	<b>0,57**</b>	1,00									
<b>MS</b>	<b>0,54**</b>	<b>0,45**</b>	<b>0,35*</b>	0,26	0,31	<b>0,57**</b>	1,00								
<b>r10</b>	-0,27	-0,23	-0,04	0,04	-0,21	-0,08	-0,21	1,00							
<b>r20</b>	-0,09	-0,26	0,23	0,26	-0,13	0,04	0,07	<b>0,63**</b>	1,00						
<b>r30</b>	0,04	0,07	0,29	0,14	<b>0,38*</b>	0,30	0,07	<b>0,34*</b>	<b>0,51**</b>	1,00					
<b>r40</b>	0,15	0,12	0,31	0,07	<b>0,44**</b>	<b>0,37*</b>	0,18	0,11	0,24	<b>0,77**</b>	1,00				
<b>r50</b>	-0,07	0,10	0,09	-0,02	0,17	0,01	-0,08	0,10	0,22	<b>0,35*</b>	<b>0,51**</b>	1,00			
<b>r60</b>	-0,07	-0,01	0,14	0,00	0,06	0,15	0,00	0,17	0,12	0,14	0,18	<b>0,47**</b>	1,00		
<b>umi20</b>	-0,12	0,23	-0,21	-0,31	-0,08	-0,14	-0,23	-0,26	-0,28	-0,27	-0,20	0,03	-0,15	1,00	
<b>umi40</b>	0,11	0,27	0,21	-0,16	0,10	0,22	0,05	-0,09	0,19	0,08	-0,04	0,01	0,07	<b>0,38*</b>	1,00

R 0-10: Resistência do solo à penetração de 0-10 cm; R 10-20: Resistência do solo à penetração de 10-20 cm; R 20-30: Resistência do solo à penetração de 20-30 cm; R30-40: Resistência do solo à penetração de 30-40 cm; R 40-50: Resistência do solo à penetração de 40-50 cm; R 50-60: Resistência do solo à penetração de 50-60 cm; umi20: umidade gravimétrica do solo na profundidade de 0-20 cm; umi40: umidade gravimétrica do solo na profundidade de 20-40 cm.

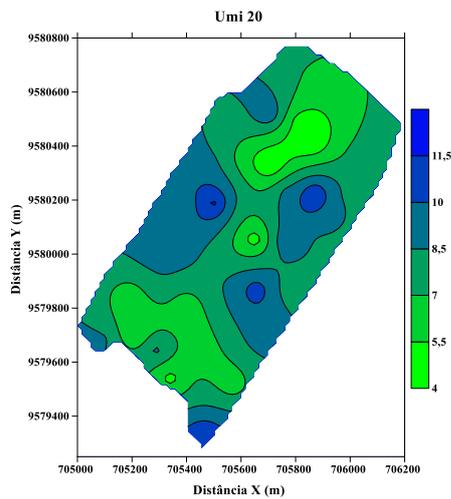
\*\* significativo ao teste t a 1% de significância.

\* significativo ao teste t a 5% de significância.

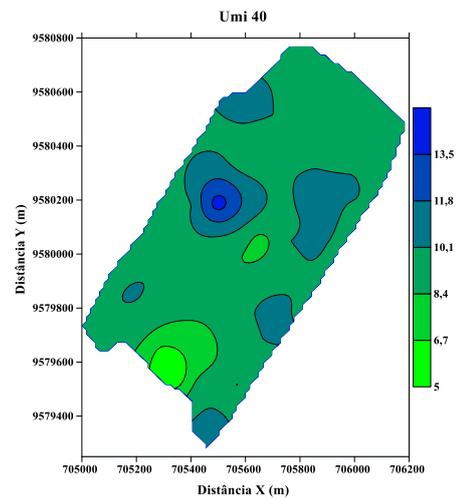
O diâmetro de panícula (DP) teve correlação significativa com o peso total de panícula (PTP) e correlação negativa com as resistências à penetração de 20-30 cm (r30) e resistência a penetração de 30-40 cm (r40). O peso total das panículas é recorrente ao tamanho e a quantidade de sementes expressas na panícula, que explica a correlação com o diâmetro das panículas (DP), já as resistências a penetração (r30) e (r40) explicam uma compactação no solo de 20 a 40 cm, contribuindo para a alteração da quantidade de nutrientes que a planta consegue absorver, interferindo diretamente nas variáveis da planta. Brasil Neto (2018) verificou que a resistência a penetração aumentou em profundidade, independente do aumento de umidade, apresentando valores restritivo ao crescimento radicular entre 5 e 35 cm de profundidade e que não foi possível obter correlação entre a produtividade e os demais atributos estudados. Mesmo a planta tendo uma boa expressão genética para uma boa produção de sementes, a resistência a penetração diminui essa expressão, fazendo com que a produção de sementes seja menor. A massa seca (MS) teve correlação significativa em relação ao peso total de panícula (PTP).

As variáveis de solo não tiveram nenhuma expressão significativa em relação a massa seca (MS), mesmo a massa seca sendo decorrente da expressão das variáveis da planta que respondem ao solo. As variáveis de resistência à penetração tiveram correlação significativa entre elas, indicando que os locais com maior resistência nas camadas superficiais indicam maior resistência nas camadas subsuperficiais.

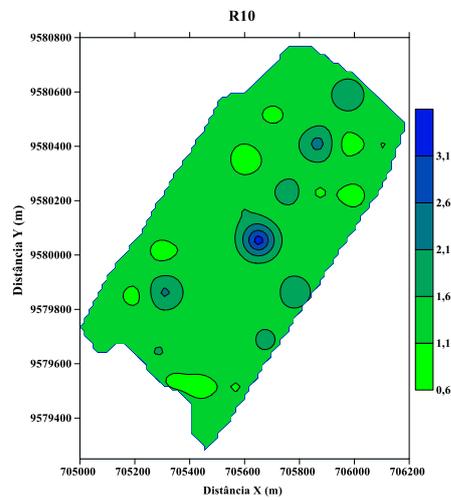
Comparando os mapas abaixo de variabilidade espacial de umidade do solo de 0-20 cm (Figura 4) em relação ao mapa de resistência do solo à penetração de 0-10 cm (Figura 6) com o mapa de resistência do solo à penetração de 10-20 cm (Figura 4), pode-se ter um parâmetro de que a umidade do solo teve correlação com os maiores índices de resistência à penetração do solo. Nos locais com maiores valores de umidade no solo, a resistência à penetração do solo foi menor até os 20 cm de solo, mostrando que a umidade do solo tem correlação com maiores e menores valores de resistência à penetração. Se compararmos os mapas de umidade de 20-40 cm (Figura 5), e os mapas de resistência a penetração do solo de 20-30 cm (Figura 7) e da resistência do solo à penetração de 30-40 cm (Figura 9), observamos que a umidade do solo na profundidade abaixo de 20 cm não obteve dependência espacial, apresentando distribuição aleatório, conforme também observado por (CORTEZ et al., 2019). MONTANARI et al. (2013) também observaram que a umidade gravimétrica e a resistência do solo à penetração foram os atributos que mais se relacionaram com a estimativa da qualidade física do solo; sendo que nas áreas com maior resistência e menor umidade, ocorreram maiores produtividades de biomassa verde utilizando a cultura do sorgo.



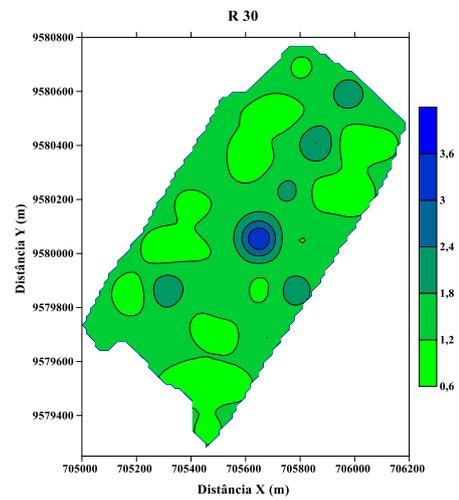
**Figura 4** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da umidade do solo, em  $g.g^{-1}$ , na profundidade de 0-20 cm em Buriti – MA



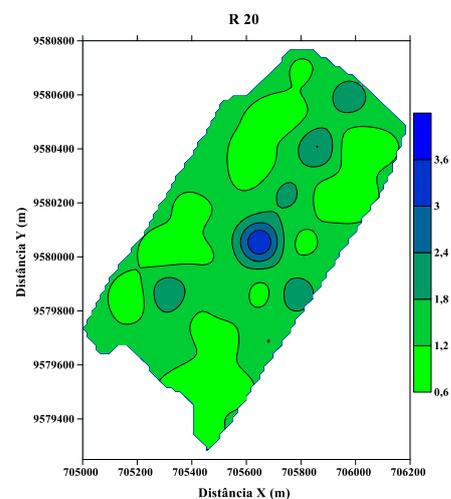
**Figura 5** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da umidade do solo, em  $g.g^{-1}$ , na profundidade de 20-40 cm em Buriti – MA



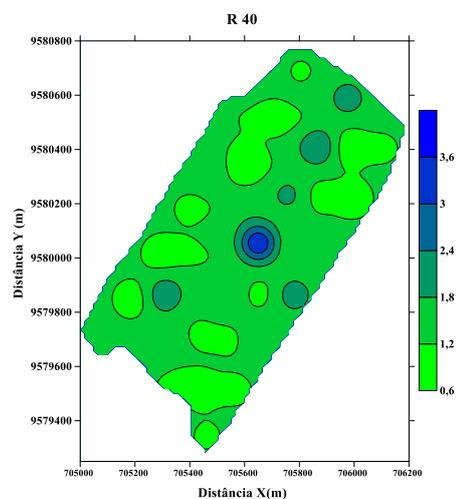
**Figura 6** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, em MPa, na profundidade de 0-10 cm. Buriti – MA



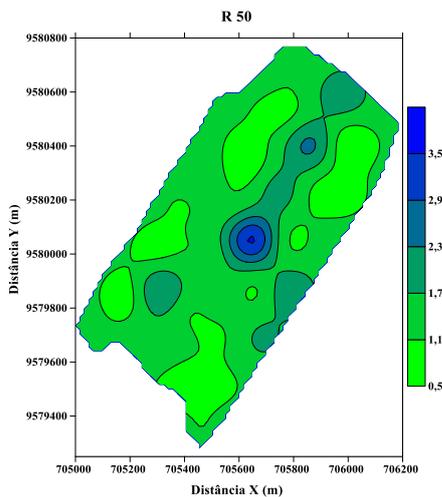
**Figura 7** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, em MPa, na profundidade de 20-30 cm. Buriti – MA



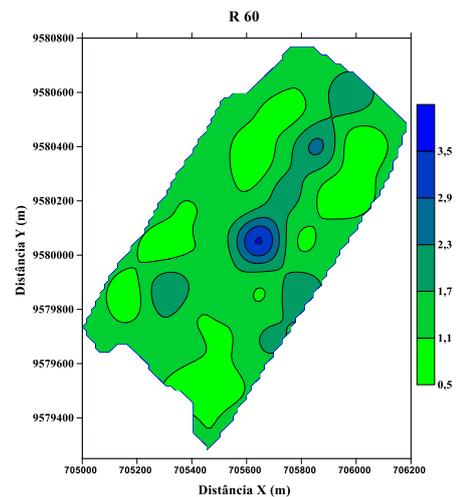
**Figura 8** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, em MPa, na profundidade de 10-20 cm. Buriti – MA



**Figura 9** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, em MPa, na profundidade de 30-40 cm. Buriti - MA



**Figura 10** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, em MPa, na profundidade de 40-50 cm. Buriti – MA



**Figura 11** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, em MPa, na profundidade de 50-60 cm. Buriti – MA

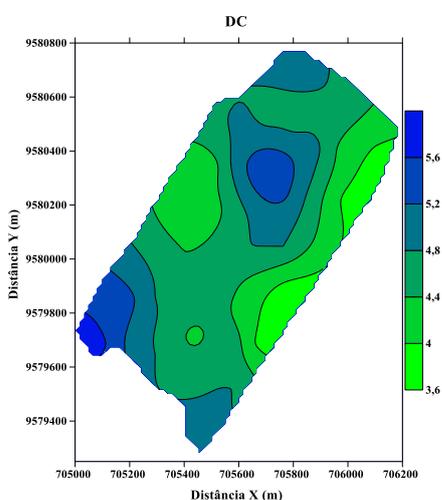
Nos mapas de variabilidade de resistência à penetração do solo apresenta amplitude variográfica extensa, mostrando um padrão de alta resistência à penetração solo no centro da área analisada. Utilizando o padrão de resistência à penetração de CAMARGO & ALLEONI (1997), os dados ficando acima do limite crítico de 2,5 MPa, indicando uma resistência física no crescimento radicular, podendo ser explicado pelo trânsito de máquinas no mesmo ponto, como rastro de plantio e rastro de pulverização em anos subsequentes, mesmo após o manejo do solo com subsolagem e aração os valores nos mapas de 3,1 MPa na resistência do solo de 0-10 cm a 3,5 MPa na resistência do solo de 40-50 cm.

Nos mapas de atributos de planta: altura de planta, diâmetro do colmo, massa seca, podemos observar um padrão de maiores valores nas bordas da área, que estão correlacionados nos mesmos pontos em que as resistências à penetração do solo têm seus menores valores, não sendo observada interferência pela umidade do solo (Figura 8, 9, 10). O mapa de diâmetro de panícula (Figura 12) teve maior dispersão espacial com os outros atributos de solo, pois é uma variável dependente da fertilidade do solo, mas tem correlação com os atributos de planta: diâmetro do colmo (DC) e altura de planta (AP), pois são dependentes da radiação como explicado por (OZANAN et al., 2016). Se sobreposmos os mapas de diâmetro de colmo (DC) e tamanho de panícula (TP), teremos uma sobreposição positiva mostrando que eles possuem correlação negativa em relação às resistências à penetração. (CANCIAN, 2015) verificou que ocorreu correlação negativa da umidade do solo com a resistência do solo à penetração.

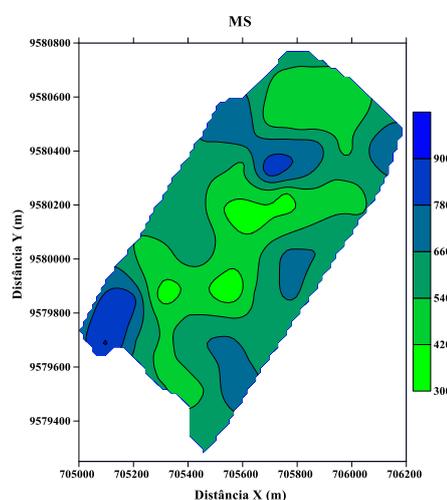
O mapa de isolinhas de variabilidade espacial do diâmetro da panícula Figura 12, não mostra nenhuma dependência espacial com os outros atributos de planta ou de solo, ou seja, é uma variável assimétrica em correlação aos outros atributos, mesmo sendo observada a correlação linear com os

atributos de AP, AFB, TP. Bandeira et al. (2018) observou que na sobreposição dos mapas, os maiores índices de resistência mecânica do solo à penetração foram equivalentes a menor produtividade de massa seca do milho. Também verificou que a partir de 20 cm de profundidade já existem limitações ao desenvolvimento do sistema radicular do milho.

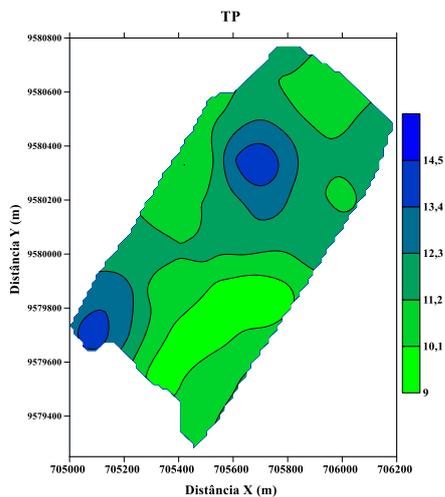
(COSTA et al., 2014) e (TAVARES et al., 2017) observaram nos Argissolos a sua pouca eficiência em retenção de água, podendo ser observado se sobrepormos os mapas de umidade do solo de 0-20 cm com o de 20-40 cm (Figura 4 e 5) sobre o mapa de atributo de planta massa seca (Figura 13). Podemos observar que nos locais que obtivemos maiores e menores valores de umidade de solo a massa seca da planta respondeu no mesmo sentido apesar de não terem correlação linear. Desse modo, podemos avaliar que do ponto de vista prático para melhorar essa correlação e, como consequência melhorar a produtividade da cultura do milho e da cultura da soja podemos usar técnicas de manejo do solo, como mudar o sentido de plantio das culturas, usar barreiras físicas como terraceamento para melhor aproveitamento da água no solo para a planta e a drenagem dessa água, e até a diminuição das arações no solo, podendo assim termos uma resposta positiva diminuindo as resistências do solo e melhorando as áreas com menor umidade no solo.



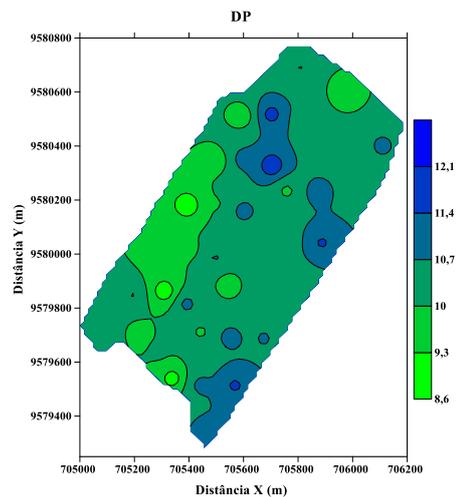
**Figura 12** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial do diâmetro do colmo, em mm, da panícula do milho. Buriti – MA



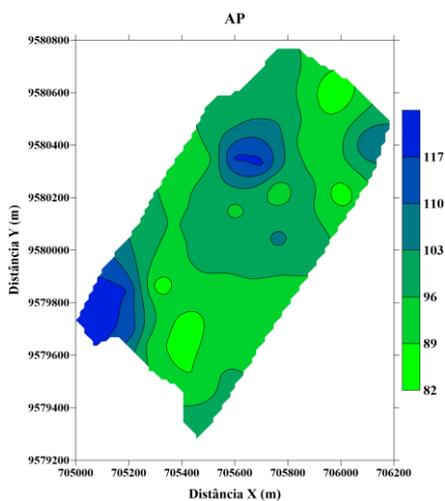
**Figura 13** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da matéria seca, em g, do milho. Buriti – MA



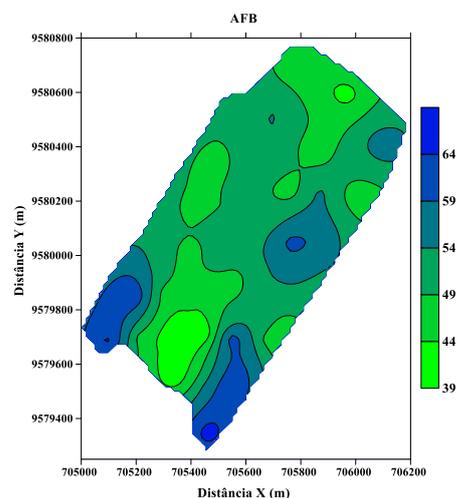
**Figura 14** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial do comprimento da panícula, em cm, do milho. Buriti – MA



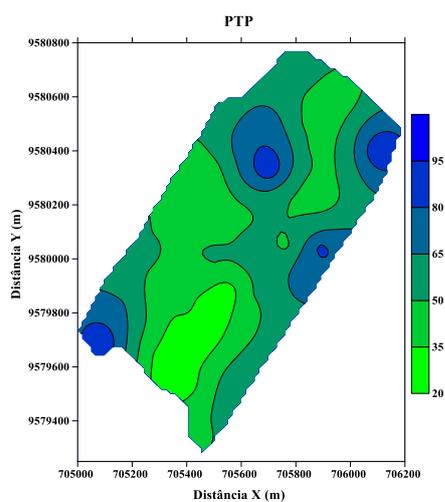
**Figura 15** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da altura da folha bandeira, em cm, do milho. Buriti – MA



**Figura 16** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da altura de planta, em cm, do milho. Buriti – MA

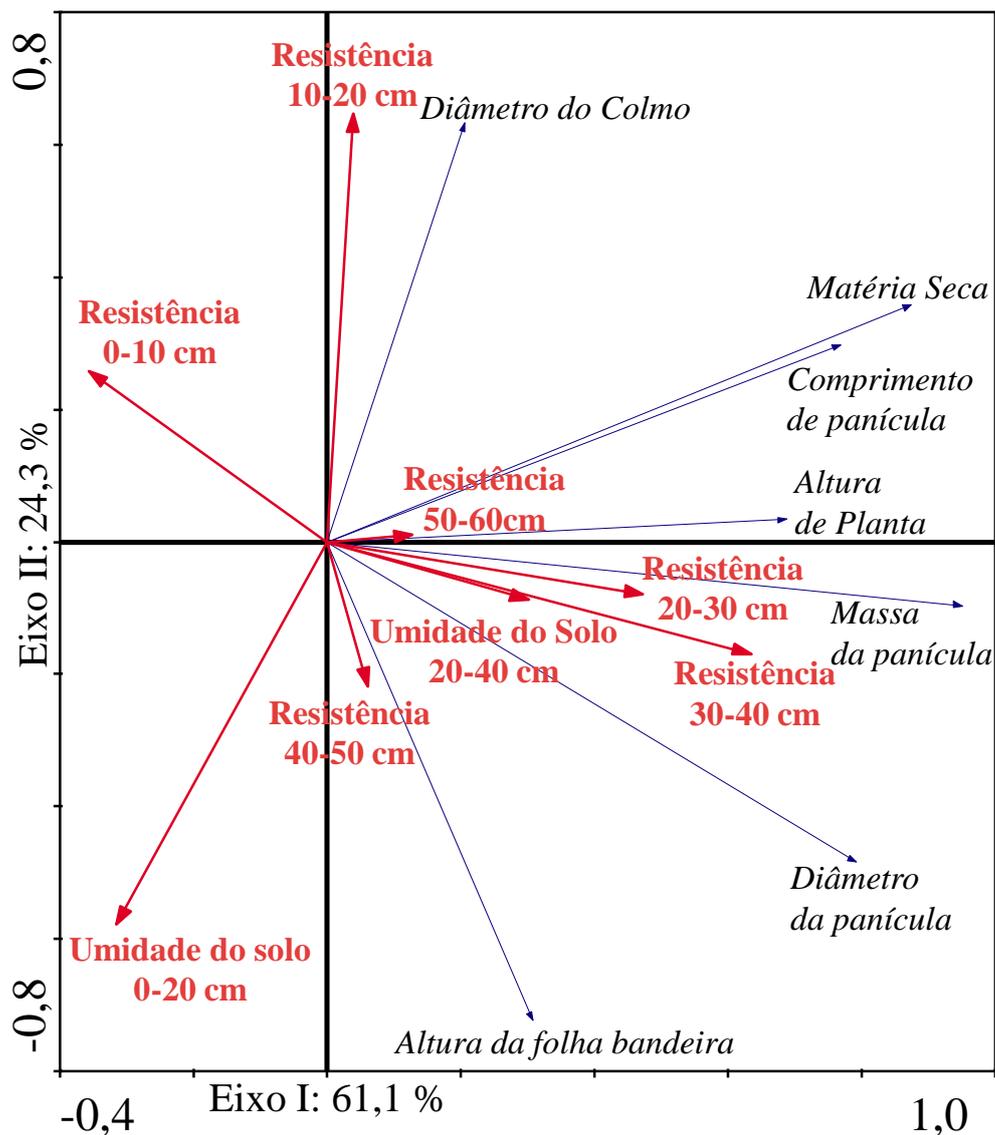


**Figura 17** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial do diâmetro da panícula, em mm, do milho. Buriti – MA



**Figura 18** - Mapas de isolinhas de variabilidade espacial da massa da panícula, em g, do milho. Buriti – MA

De acordo com a análise multivariada de redundância de ordenação canônica (RDA) mostrada na (Figura 19), verifica-se que somente o diâmetro do colmo mostrou-se correlacionado positivamente a resistência do solo à penetração de 10-20 cm e a resistência do solo à penetração de 0-10 cm com menos intensidade por conta do tamanho do vetor, porém a resistência do solo à penetração de 0-10 cm mostrou-se inversamente correlacionada a todos os outros atributos da planta, mostrando uma tendência inversa de resposta da planta a essa resistência. A altura da folha bandeira, sendo essa variável de expressão genética, teve uma resposta de intensidade maior por conta do tamanho de vetor em relação a umidade do solo de 0-20 cm, e a mesma variável de umidade de 0-20 cm mostrou-se inversamente correlacionadas as outras expressões da planta.



**Figura 19** – Análise multivariada de redundância com ordenação canônica dos atributos físicos do solo e das variáveis do milho. Buriti – MA

\* Resistência: Resistência do solo à penetração.

## 6. CONCLUSÕES

A resistência do solo à penetração de 0-10 cm mostrou-se inversamente correlacionada a todos os outros atributos da planta e maior valor de coeficiente de variação.

As resistências à penetração do solo de 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 e de 50-60 cm apresentaram correlação as variáveis de planta.

O diâmetro de colmo possuiu correlação positiva com a resistência de 10-20 cm.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREOTTI, M.; ARALDI, M.; GUIMARÃES, V. F.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI, S. **Winter corn yield and chemical modifications in latosol as a function of covering species after lime application under no-tillage system.** *Produção Vegetal*, [S. l.], p. 109-115, mar. 2008.
- BANDEIRA, P. P. C.; MEDEIROS, J. L. F.; BANDEIRA, P. M. C.; COSTA, J. P. N.; SILVA, S. L. **Variabilidade da resistência do solo no desempenho produtivo do milho em região semiárida.** III Congresso Internacional das Ciências Agrárias. COINTER. 2018.
- BEEBE, K.R.; PELL, R.J. & SEASHOLT, M.B. **Chemometrics: A practical guide.** New York, John Wiley & Sons, 1998. 348p.
- BRASIL NETO, E. S. **Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração mecânica em áreas de várzea cultivadas com soja.** Dissertação de mestrado. UFSM. 2018
- BRITO, L.T.L.; LOUREIRO, B.T.; DENICULI, W.; RAMOS, M.M. e SOARES, J.M. **Influência do método na determinação da taxa de infiltração.** *R. Bras. Ci. Solo*, 20:503-507, 1996.
- BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. **Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.1269-1276, 2007
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. **Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.527-538, 1998.
- CAMARGO, O. A. e ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciu. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** . Piracicaba: Ed do autor., 1997
- CANCIAN, L. C. **Variabilidade espacial da resistência a penetração, granulometria e umidade do solo.** Dissertação de mestrado. UFSM. 2015
- CHAUDHURI, U. N.; KANEMASU, E. T. **Growth and water use of sorghum and pearl millet.** *Field Crops Research* , Amsterdam, v.10, p.113-124, 1985.
- CORTEZ, J. W.; MERCADO MORENO, C. T.; FARINHA, L. S.; SOARES ARCOVERDE, S. N.; MORÃES VALENTE, I. Q.. **Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um sistema de semeadura direta.** *Científica* , Jaboticabal - SP, v. 47, n. 2, p. 175–182, 14 fev. 2019.
- COSTA, D. B. et al. **Adubação fosfatada em cana planta e soca em Argissolos do Nordeste de diferentes texturas.** *Revista Caatinga*, v.27, p.47-56, 2014.
- DE CAMPOS, A. G.; PEREIRA RAMOS, M. C.; DE OLIVEIRA PRETO, V. R.; DE OLIVEIRA, M. F.; SILVA, B. M.; FRANÇA DE FREITAS, D. A.. **Resistência à penetração como indicadora de alterações estruturais no solo decorrentes de implementos para manejo do solo.** XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, [S. l.], p. 1- 4, 5 ago. 2015.
- DRESCHER, M. S.; FOLETTO, F. L. E. ; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.. **PERSISTÊNCIA DO EFEITO DE INTERVENÇÕES MECÂNICAS PARA A DESCOMPACTAÇÃO DE SOLOS SOB PLANTIO DIRETO.** *R. Bras. Ci. Solo*, [S. l.], n. 35, p. 1713-1722, 7 jul. 2011.

- DURAES, F. O. MACHADO; MAGALHÃES, P. C. DOS SANTOS, F. G.. Fisiologia da planta de milho. **Circular Técnica (CNPMS)**, Sete Lagoas - MG, v. 28, p. 1-16, 29 mar. 2004.
- DA ROS, C.O. et al. **Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos.** Revista Brasileira de Ciência de Solo, Campinas, v.21, n.2, p.241-247, 1997.
- De MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. **Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.23, p.703- 709, 1999.
- DIAS JR., M.S.; PIERCE, F.J. **O processo de compactação do solo e sua modelagem.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.20, p.175-182, 1996.
- ENGBALL, B.; HERGERT, G.W.; LESOING, G.W. & FERGUSON, R.B. **Fractal analysis of spatial and temporal variability.** Geoderma, 88:349-362, 1999.
- FURNELATO, F. d. P. B.; MIGUEL, F. B.; GRIZOTTO, R. K.. **Cultivo Mínimo da Cana de Açúcar.** APTA, 2010. Disponível em: Acesso em 10 de novembro de 2015.
- FRANCHINI, J.C. et al. **Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.24, n.2, p.459- 467, 2000.
- FRANZLUEBBERS, A.J. et al. **Long-term chances in soil carbono and nitrogen pools in wheat management systems.** Soil Science Society of America Journal, Madison, v.58, n.6, p.1639-1645, 1994.
- FREDDI, O. d. S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F.. **Análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado com milho.** Rev. Bras. Ciênc. Solo, [S. l.], n. 32, p. 953-961, 15 ago. 2008.
- GALLAGHER, J. N.; BISCOE, P.V. **Radiation absorption, growth and yield of cereals.** Journal of Agricultural Science, Cambridge, v. 91, p. 47-60, 1978.
- GAVANDE, A.G. **Física de suelos: principios y aplicaciones.** 5.ed. Mexico, Limusa, 1986, 351p.
- GHOHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J.P. **Efeito da compactação artificial de dois solos limoargilosos sobre a penetração de raízes de arroz.** Bragantia, Campinas, v.25, n.39, p.421-31, 1966.
- Golden Software. Surfer v.11. Surface Mapping System, Colorado, 2012.
- GONTIJO I.; NICOLE L. R.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; SANTOS; E. O. DE J. **Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1093-1102, 2012.
- GONÇALVES, S. B.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; STAHL, J. **RESISTÊNCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES DE SUBSOLAGEM.** Nativa, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 224-229, 2017. DOI: 10.31413/nativa. v5i3.4109. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/4109>. Acesso em: 17 dez. 2022.

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, n.2, p.169-177, 2005.

ISAAKS E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** New York, Oxford University Press, 1989. 561p.

KLUTE, A. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (Ed.) **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes.** Madison: ASA, 1982. cap.3, p.29-43.

KIRKEGAARD, J.A.; SO, H.B.; TROEDSON, R.J. **Effect of compaction on the growth of pigeon pea on clays soils. III. Effect of soil type and water regime on plant response.** Soil and Tillage Research, v.26, p.163-178, 1993.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. **Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação.** Revista Brasileira de Ciência de Solo, Campinas, v.19, n.3, p.395-401, 1995.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto.** Passo Fundo, EMBRAPA-CNPT, 2000. 36p.

KOLMOGOROV-SMIRNOV, A. N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. **Giornale dell'Istituto degli Attuari**, Roma, v. 4, p. 83-91, 1933.

Kurylo, Rodrigo & Klein, Vilson & Klein, Antonio. (2005). **Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água.** Revista Brasileira De Ciencia Do Solo - REV BRAS CIENC SOLO. 29.

MANDARINO, A. P.; CREMON, C.; MAPELI, N. C.; DA SILVA, G. F.; DA SILVA, A. N.; DE FREITAS, S. E.. **Dinâmica da resistência do solo à penetração sob influência de soluções homeopáticas na cultura do milho.** XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, [S. l.], p. 1- 4, 5 ago. 2015.

MARASCA, I., OLIVEIRA, C.A.A. de, GUIMARÃES, E.C., CUNHA, J.P.A.R. da, ASSIS, R.L. de, PERIN, A.; MENEZES, L.A.S., **Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja.** Bioscience Journal [online], vol. 27, no. 2, pp. 239–246. 2011.

MARTIN, C. ; ROUEL J. ; JOUANY, JP; DOREAU, M ; CHILLIARD, Y., 2008. **Produção de metano e digestibilidade da dieta em resposta à alimentação de vacas leiteiras com linhaça bruta, linhaça extrusada ou óleo de linhaça.** J. Anim. Sci., 86 (10): 2642-2650.

Microsoft: Excel. Versão 2019. Novo México: Microsoft Corporation, 2019.

MINGOTI, S. A. **Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada:** Uma abordagem Aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MONTANARI, R.; PANACHUKI E.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. S.; BONINI, C. S. B. **Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e atributos físicos em um Planossolo.** Revista Agro@mbiente On-line, v. 7, n. 3, p. 252-261, 2013.

- MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E.C.; CORRÊA, A. R.; PEREIRA PELLIN, D. M.; DE PASSOS E CARVALHO, M.; DALCHIAVON, F. C.. **Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho.** *Rev. Ceres*, Viçosa - MG, n. 59, p. 125-135, 22 mar. 2012.
- MACHADO DURAES, F. O.; MAGALHAES, P. C.; LAVINSKY, A. O. **Cultivo do milho.** PEREIRA FILHO, Israel Alexandre (ed.). 5. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Abr 2016. 1-116 p.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** 2.ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996. 513p.
- RODRIGUES, M. S.; RAMOS, R. R. D.; AZEVEDO, T. P.; PATROCINIO FILHO, A. P.; OLIVEIRA, L. G. **Variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em área de capineira irrigada no semiárido.** *Agropecuária científica no semiárido*. v. 10, n. 1, p. 161-166, 2014.
- 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.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. E-book: il. color. E-book, no formato ePub, convertido do livro impresso. <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub>
- SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. **Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study.** *Soil and Tillage Research*, Amsterdam. v.67, p.171–181. 2002.
- SETZER, J. (1966) **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo.** Comissão Interestadual da bacia do Paraná e Centrais Elétricas de São Paulo, São Paulo, SP.
- SIQUEIRA, G. M.; DATAFONTE, J; VÁZQUEZ, E; VALCARCEL ARMESTO, M. **Distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas experimentais sob diferentes intensidades de chuva simulada.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.7, n.4, p.671-679, 2012.
- SILVEIRA, D.C.; MELO FILHO, J.F. de; SACRAMENTO, J.A.A.S.; SILVEIRA, E.C.P. **Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no Recôncavo da Bahia.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 34:659-667, 2010.
- SILVA, S. D. A.; LIMA, J. S. D. S. **Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geostatística.** *Revista Ceres*, v.59, p.271-277, 2012.
- SOUZA, C.M. **Efeito do uso contínuo de grade pesada sobre algumas características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, fase cerrado, e sobre o desenvolvimento das plantas e absorção de nutrientes pela cultura de soja.** 1988. 105p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- SOUZA, Z.M. et al. **Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, em Selvíria, MS.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.699-707, 2001.

STONE, L. F. et al. **Compactação do solo na cultura do feijoeiro-1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambientes, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-12, 2002.

STOLF, R. **Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba.

STOLF, R. **Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf.** Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR., 1984. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n.2).

STOLF, R. **Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação de dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-35, 1991.

STOLF, R. **Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação de dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-35, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf.** São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto – Boletim, 1)

STOLF, R. **Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba. **Anais...** v. 2, p. 823-836.

STOLF, R. **Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf.** Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR., 1984. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n.2).

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação de dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-35, 1991.

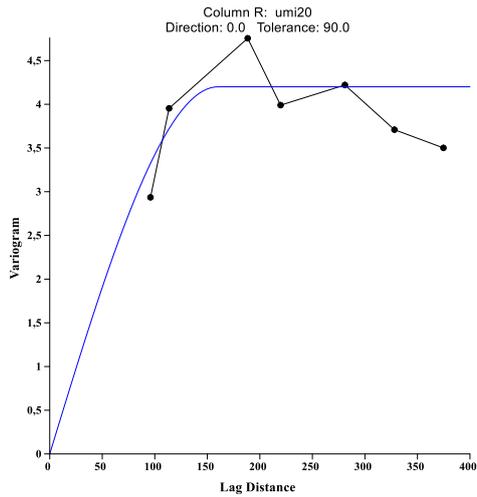
STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf.** São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto – Boletim, 1)

SURFER. Surfer 11.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers:** New York, Golden Software Inc., 2012.

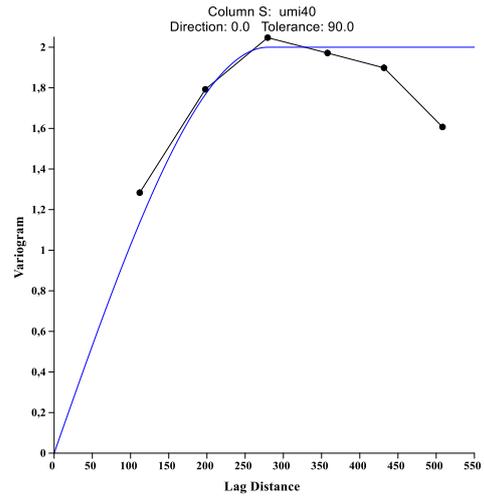
TAVARES, U. E.; MONTEIRO, M. R.; ORTIZ, P. F. S.; PEIXOTO, F. B.; NETO, O. L. D. A. G. **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE UM ARGISSOLO AMARELO DISTROCOESO NO ESTADO DE PERNAMBUCO.** Combea, Maceió - AL, p. 1- 4, 3 ago. 2017.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo.** In: Novais, R. F.; Alvarez, V. H., Schaefer, G. R. (Eds.) Tópicos em Ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, 2000. p.1-54.

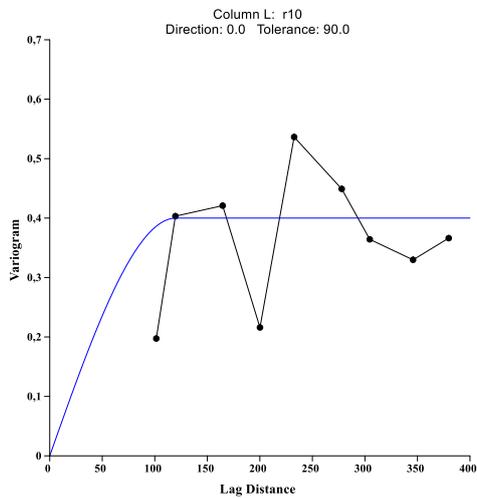
## 8. ANEXOS



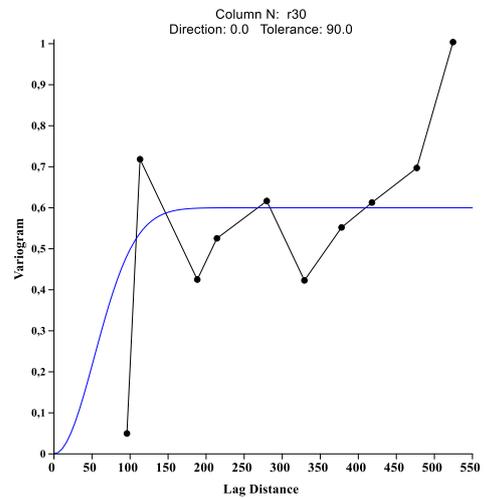
**Figura 1** – Semivariograma da umidade do solo de 0-20 cm. Buriti – MA



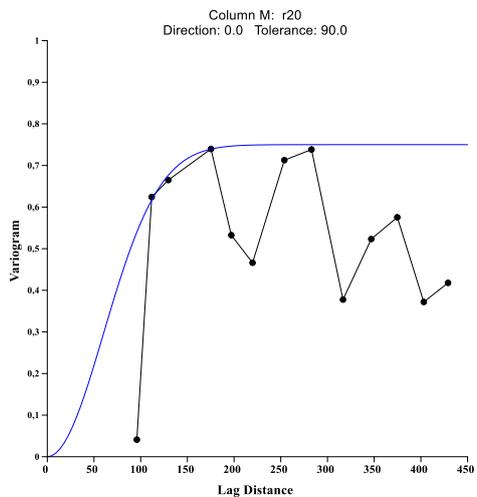
**Figura 4** – Semivariograma da umidade do solo de 20-40 cm. Buriti – MA



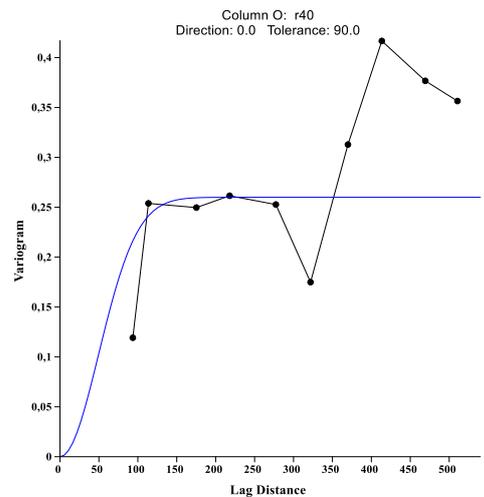
**Figura 2** – Semivariograma da resistência do solo à penetração na profundidade de 0-10 cm. Buriti – MA



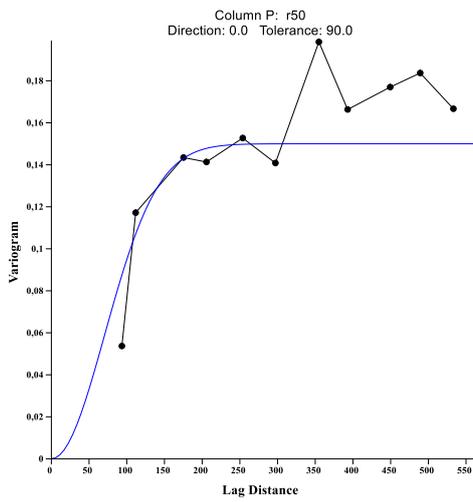
**Figura 5** – Semivariograma da resistência do solo à penetração na profundidade de 20-30 cm. Buriti – MA



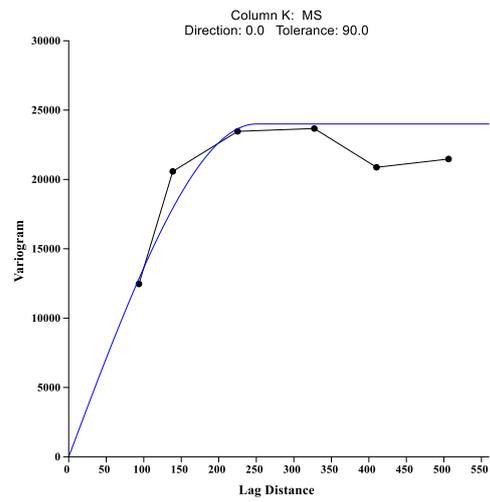
**Figura 3** – Semivariograma da resistência do solo à penetração na profundidade de 10-20 cm. Buriti – MA



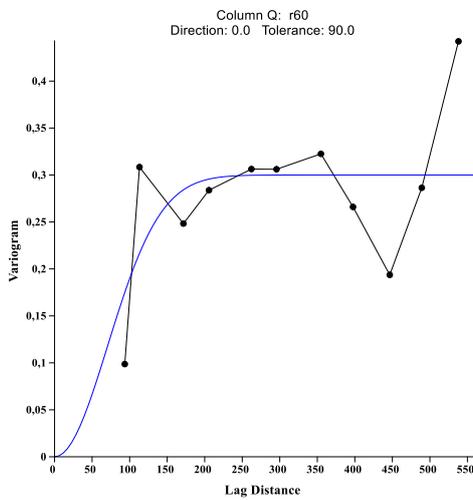
**Figura 6** – Semivariograma da resistência do solo à penetração na profundidade de 30-40 cm. Buriti – MA



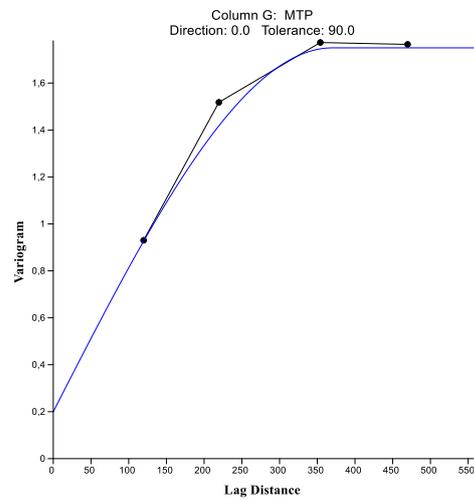
**Figura 7** – Semivariograma da resistência do solo à penetração na profundidade de 40-50 cm. Buriti – MA



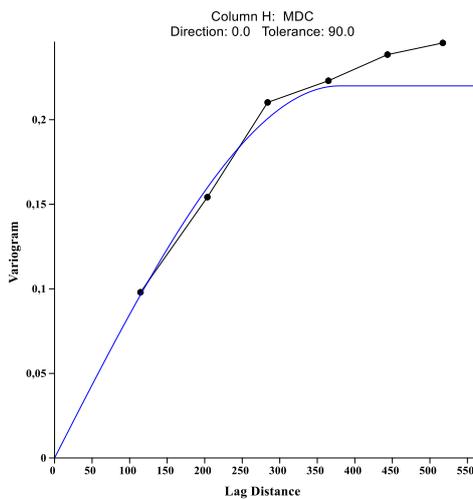
**Figura 10** – Semivariograma da matéria seca. Buriti – MA



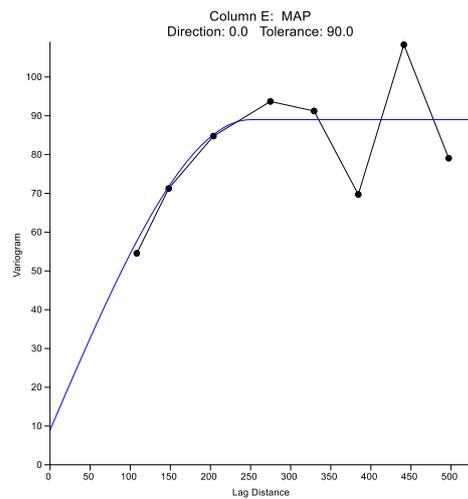
**Figura 8** – Semivariograma da resistência do solo à penetração na profundidade de 50-60 cm. Buriti – MA



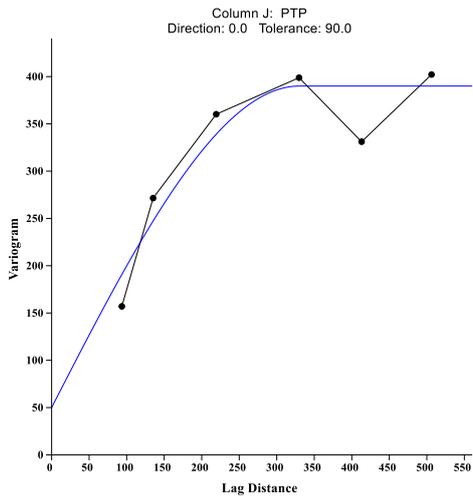
**Figura 11** – Semivariograma do comprimento de panícula. Buriti – MA



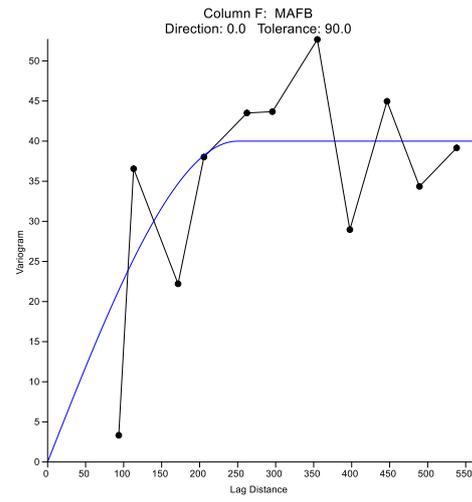
**Figura 9** – Semivariograma do diâmetro do colmo. Buriti – MA



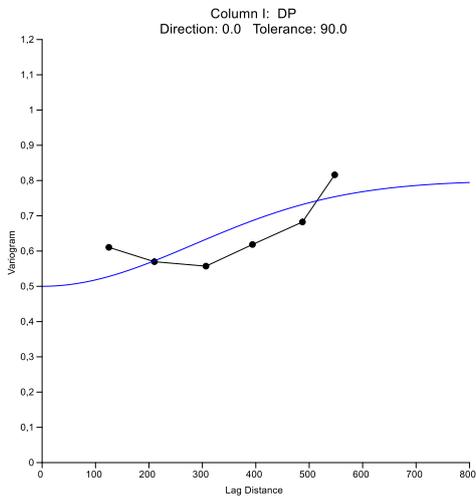
**Figura 12** – Semivariograma da altura de planta. Buriti – MA



**Figura 13** – Semivariograma da massa da panícula. Buriti – MA



**Figura 15** – Semivariograma da altura da folha bandeira. Buriti - MA



**Figura 14** – Semivariograma do diâmetro da panícula. Buriti – MA