BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUANTIFICAÇÃO DE POROS VIA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA EM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES MANEJOS

RECIFE/PE

FEVEREIRO/2017

BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUANTIFICAÇÃO DE POROS VIA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA EM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES MANEJOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Ciência do Solo.

Orientador
Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Co-Orientadores
Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
Dr. José Coelho de Araújo Filho

RECIFE/PE
FEVEREIRO/2017

BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUANTIFICAÇÃO DE POROS VIA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA EM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES MANEJOS

Dissertação defendida em _____ e _____ pela banca examinadora.

Presidente da Banca:

_____

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Orientador
PPGCS/UFRPE

Examinadores:

_____

Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima
PPGPA/UAG

_____

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
PPGCS/UFRPE

A minha família,

Ana Lúcia, José Antônio e Daiane

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida, por quem sou hoje e por abençoar meu caminho em todos os momentos;

À minha família, por todo o incentivo, amor e carinho nos momentos mais difíceis. Em especial a minha mãe, por ser exemplo e fortaleza na minha vida e sempre ter as palavras certas de aconchego e carinho;

À minha esposa Daiane Mantovanelli, pelo entendimento de minha ausência durante este período de dedicação profissional;

Ao Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pela amizade, orientação, oportunidade, ensinamentos, disposição, preocupação e conversas durante a realização do Mestrado, deste trabalho e pelo o exemplo de professor;

Ao Prof. Milton Campos da Universidade Federal do Amazonas, pelas oportunidades, ensinamentos, amizade e pelo despertar e incentivo nos estudos voltados à Ciência do Solo;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo/UFRPE: Edivan Rodrigues de Souza, Mario de Andrade Lira Júnior, Emídio Cantídio de Oliveira Filho e José Ramon Barros Cantalice, pelos ensinamentos adquiridos;

Ao grande amigo Thiago Schossler pela ajuda nos trabalhos de campo e laboratório;

Aos amigos de Pós-graduação pela amizade e companheirismo: Augusto César, Jefrejan Rezende, Vinícius Gomes, Abraão Silva, Edivan Uchôa, Luís Antônio Coutrim, Thais Assunção, pelos momentos de descontração;

Aos amigos da Universidade Federal do Amazonas e demais instituições: Rosiney Mendes (IDAM), Charle Soares, Leonardo Rezende, Pedro Cardoso, Marcelo Mota,

Maílson Ferreira, Romário Gomes (UNESP), Diogo Pinheiro (UFMG), Felipe Weckner, Pedro Lira (UFRPE), Symone Falcão (UFRPE);

À Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC) pelo apoio na realização da pesquisa e em especial ao Dr. Djalma Euzébio, Evanilson Paulino e toda a equipe de funcionários, que também contribuíram nos trabalhos de campo;

Ao Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio na realização e aquisição das imagens tomográficas;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

À todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Meu muito Obrigado!!

BIOGRAFIA

BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI, filho de José Antônio Mantovanelli e Ana Lúcia Campos Mantovanelli, nascido em 14 de novembro de 1989, em São Gabriel da Palha, Estado do Espírito Santo. Em Fevereiro de 2015 diplomou-se em Engenharia Agronômica pela Universidade Federal do Amazonas. Durante a graduação participou de projetos de pesquisa vinculados a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e CNPq. Em 2013 recebeu o prêmio Professor Abraham Moysés Cohen de melhor bolsista de PIBIC do Instituto de Educação Agricultura e Ambiente/UFAM. Tem experiência na área de Agronomia com ênfase em Ciência do Solo trabalhando principalmente nos seguintes temas: tomografia computadorizada, estatística multivariada, geoestatística, atributos físicos para fins de manejo específico, influência do manejo nos atributos do solo e Terras Pretas Arqueológicas.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL 9

ABSTRACT 11

INTRODUÇÃO GERAL 13

Cana-de-açúcar 13

Geoestatística e variabilidade espacial de atributos físicos 14

Tomografia Computadorizada 16

Efeito dos sistemas de manejo nas propriedades físicas 17

REFERÊNCIAS 20

Capítulo I - Variabilidade espacial e análise multivariada de atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco 26

RESUMO 27

ABSTRACT 28

INTRODUÇÃO 29

MATERIAL E MÉTODOS 32

RESULTADOS E DISCUSSÃO 40

CONCLUSÕES 61

REFERÊNCIAS 61

Capitulo II – Propriedades estruturais de solos cultivados com cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco 72

RESUMO 73

ABSTRACT 74

INTRODUÇÃO 75

MATERIAL E MÉTODOS 78

RESULTADOS E DISCUSSÃO 87

CONCLUSÕES 106

REFERÊNCIAS 107

CONCLUSÕES GERAIS 116

RESUMO GERAL

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em áreas manejadas é de extrema importância, pois os processos que imprimiram tais modificações, somados ao manejo realizado pelo homem, acentuam a variação dos atributos do solo e seu entendimento é fundamental para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos sobre o ambiente. O uso da distribuição do tamanho de poros para inferir sobre as mudanças estruturais exercidas pelas diferentes práticas de cultivo é um fenômeno que está se tornando comum no campo da Ciência do Solo. Avanços na aplicação da tomografia computadorizada (µTC) para estudos da distribuição de tamanho de poros têm surgido como uma nova ferramenta de pesquisa para investigar a distribuição espacial e diâmetros de poros, pois se baseia na avaliação estrutural dos solos a partir de imagens 2D ou 3D. Desta forma, neste trabalho objetivou avaliar os efeitos dos diferentes manejos nos atributos físicos do solo a fim de explicar a variação espacial e correlação existente entre as variáveis físico-hídricas estudadas. Assim, investigações, utilizando as distribuições de tamanho de poro derivadas de dados de retenção de água do solo e técnicas de análise de imagem, explorará ferramentas para caracterizar as mudanças no sistema poroso do solo, causadas por sistemas de preparo do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), associados às práticas de irrigação e sequeiro na camada superficial. O estudo foi realizado na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC) em um Argissolo Amarelo distrocoeso, com amostragem dos solos realizada em janeiro de 2016. Em cada sistema de uso (irrigado e sequeiro), foram coletadas amostras nas entrelinhas de cultivo, usando um padrão de grid amostral com dimensões de 56 x 35 m (1960 m²), com espaçamento regular de 7 m entre os pontos, fornecendo um total de 32 pontos em cada

área de estudo, totalizando 64 amostras. Para caracterização da variabilidade espacial dos atributos físicos foram realizadas as seguintes análises: resistência do solo à penetração; densidade do solo; porosidade total; macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade; condutividade hidráulica saturada; diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado. Para avaliação da estrutura do solo foi realizada a construção da curva característica de retenção de água no solo, seguindo-se da distribuição de tamanho de poros, baseados na função spline cubic e quantificação de poros via tomografia computadorizada. A abordagem geoestatística associada às técnicas multivariadas de Análise de Componentes Principais (ACP), possibilitaram compreender a relação do padrão de distribuição espacial exercidas pelos manejos irrigado e sequeiro sobre as propriedades físicas do solos; caracterizando que o efeito da irrigação favoreceu a maior relação com variáveis que estão interligadas com os padrões estruturais e de qualidade do solo. Os resultados sugerem que as práticas de gestão adotadas, são capazes de modificar a estrutura do solo em condições específicas, visto que o efeito da irrigação favoreceu a uma condição mais estruturada no solo submetido ao PD, em que a partir das técnicas adotadas de avaliação, pode-se entender melhor estes mecanismos, desde a forma de poros até a distribuição de MAP macroporos por quantidade e volume em intervalo de classes.

Palavras-chave: Variabilidade espacial, geoestatística, plantio direto, plantio convencional, Carpina.

ABSTRACT

The knowledge of the spatial distribution of soil attributes in managed areas is of extreme importance, since the processes that have produced such modifications, added to man-made management, accentuate the variation of soil attributes and their understanding is fundamental for the refinement of the practices of management and evaluation of the effects on the environment. The use of pore size distribution to infer the structural changes exerted by different cultivation practices is a phenomenon that is becoming common in the field of soil science. Advances in the application of computed tomography (μTC) to pore distribution evaluation have emerged as a new research tool to investigate spatial distribution and pore diameters, as it is based on the structural evaluation of soils from 2D or 3D images. In this paper, the objective of this work was to evaluate the effects of the different managements on the physical attributes of the soil in order to explain the spatial variation and correlation between the studied physical-hydrological variables and to investigate and explore tools to characterize the changes in the no tillage (NT) and conventional tillage systems (CT) associated with irrigation and rainfed practices in the surface layer using the pore size distributions derived from soil water retention data and analysis techniques of image. The study was carried out in the agricultural area of the Carpina Sugarcane Experiment Station (EECAC) in a Haplohumults. Soil sampling was carried out in January 2016. In each system of use (irrigated and rainfed), samples were collected between the lines, using a sample grid pattern with dimensions of 56 x 35 m (1,960 m²), with spacing 7 m between the points, providing a total of 32 points in each study area, totaling 64 samples. Soil resistance penetration, bulk density, total porosity, macroporosity, mesoporosity, microporosity, soil moisture, saturated hydraulic conductivity, geometric mean diameter and weighted

average diameter were used to characterize the spatial variability of the physical attributes. In the evaluation of the soil structure were carried out the construction of the characteristic curve of soil water retention, distribution of pore size based on spline cubic function and quantification of pores via computed tomography. The geostatistical approach associated with the multivariate techniques of principal components analysis (PCA) allowed us to understand the relation of the pattern of spatial distribution exerted on the irrigated and dry landings on the physical properties of the soils, characterizing that the irrigation effect favored a greater relation with variables that are interconnected with the structural and soil quality standards. The results suggest that the management practices adopted are capable of modifying the soil structure under specific conditions, since the irrigation effect favored a more structured condition in the soil submitted to NT where, based on the adopted assessment techniques, we can better understand these mechanisms, from the pore form to the distribution of macroporosity by quantity and volume in the range of classes.

Keywords: Spatial variability, geostatistics, no-tillage, conventional tillage, Carpina.

INTRODUÇÃO GERAL

Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar no contexto histórico e atual, sempre foi uma das principais commodities agrícolas no Brasil e, atualmente o país tem novamente a primeira posição no ranking mundial da cultura. A agroindústria canavieira nacional é tecnicamente qualificada, apresentando um elevado potencial de produção por hectare e com os menores custos de produção do mundo.

Desde 2006 a cana-de-açúcar representa um dos grandes mercados agrícolas brasileiro, com previsão de aumento de 40% da área plantada, estimando-se chegar a 100% na produção nos próximos 10 anos (SILVA et al., 2014). O Brasil irá produzir 684,7 milhões de toneladas em área de 8,9 milhões de hectares distribuídas em todos os estados produtores, onde o estado de Pernambuco contribui com apenas 3% deste total de área plantada (276,3 mil hectares) (CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, 2016).

As dificuldades e problemáticas na produção de cana-de-açúcar para o estado de Pernambuco, mais especificamente para a região da Zona da Mata Norte, vêm se tornando atualmente objeto de estudo e pesquisa, com o propósito de manejar adequadamente a cultura com fins de maior produção por unidade de área (OLIVEIRA et al., 2010). Além disso, a má distribuição nas taxas pluviométricas tem afetado o crescimento e desenvolvimento da cultura, gerando impactos negativos nos aspectos relacionados à produtividade e qualidade dos canaviais (WIEDENFELD & ENCISO, 2008). Diante disto, o manejo da irrigação é essencial para esta região, pois devido a insuficiência hídrica natural, a irrigação pode contribuir com o aumento na produção, e

até mesmo na expansão das áreas produtoras que apresentem baixo regime hídrico (DANTAS NETO et al., 2006).

Geoestatística e variabilidade espacial de atributos físicos

Em meados da década de 50, o pesquisador Africano Daniel. G. Krige, estudando jazidas de minas de ouro na África do Sul, passou a publicar os primeiros resultados que desenvolveu com as técnicas geoestatísticas. Mas o seu grande avanço se faria com o pesquisador francês Georges Matheron, que a partir do trabalho clássico "Traité de Géoestatistique Appliquée" introduziu o termo geoestatística e a noção do uso de semivariogramas, com isso surgiu a teoria das variáveis regionalizadas em que são estudados os fenômenos contínuos no espaço e no tempo (ANDRIOTTI, 1988).

Com isso, a variabilidade espacial de atributos do solo vem sendo discutida por pesquisadores desde o início do século XX, como relata VIEIRA (2000). Muitos são os métodos que podem inferir sobre a variabilidade de atributos do solo, com destaque para a estatística multivariada, classificação contínua (lógica fuzzy), métodos de dimensão fractal; entretanto a dependência espacial entre as amostras somente pode ser modelada por meio da geoestatística, expressa por meio do semivariograma (VIEIRA, 2000; WEBSTER, 2001).

Sabe-se que o solo apresenta heterogeneidade ao longo do perfil, tanto verticalmente como horizontalmente, variações estas exercidas pelos fatores e processos de formação que os solos foram submetidos ao longo de milhões de anos, a começar pelo próprio material de origem que não se apresenta uniforme em toda sua extensão, e ao fato do processo de intemperização não ocorrer de forma homogênea e contínua (RICHTER et al., 2011). Em contrapartida, quando os solos são submetidos a intensas

modificações condicionadas pelo uso e manejo, podem apresentar variação espacial dos atributos (SOUZA et al., 2010).

Em virtude de se conhecer estas variações espaciais, diversos estudos vêm sendo realizados com o intuito de caracterizar tais variações, principalmente para se elucidar os efeitos em propriedade físicas do solo, visto que estas são as que passam por intensas modificações ao longo do tempo de uso (CARVALHO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013; ALHO et al., 2016; GUIMARÃES et al., 2016).

Conforme os solos vão sendo submetidos às práticas de uso, ocorrem modificações nos seus atributos físicos, levando ao aumento na densidade do solo, redução no volume de poros associado aos seus diâmetros, e estabilidade de agregados (OLIVEIRA et al., 2013).

Sendo assim, conhecer a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo é fundamental para se compreender os diferentes processos induzidos pelas práticas continuas de manejo dos solos ou variações naturais além também de reduzir os erros de amostragem e o manejo do solo (LIMA et al., 2007). Estudos mais específicos com atributos físicos do solo em condições adversas vêm mostrando que as variáveis físicas têm se modificado intensamente com as variações e continuação espacial, com destaque para o trabalho desenvolvido por SANTOS et al. (2012), que encontraram alcance de dependência espacial na faixa de 135 m em solos do vale aluvial no semiárido de Pernambuco, enquanto que ARAUJO et al. (2014) encontraram valores de alcance para microporosidade e macroporosidade de 210,9 m e 82,3 m respectivamente em diferentes tipos de uso e manejo do solo. Tais condições indicam a magnitude destas variações em termos de manejos exercidos.

Diante destas condições, conhecer a magnitude espacial dos efeitos exercidos por diferentes práticas de uso são possíveis com o uso das técnicas geoestatísticas, que

possibilitam a interpretação dos resultados, com base na estrutura da variabilidade natural ou de fontes adicionais para medição e quantificação dos atributos (SOUZA et al., 2009; SANTOS et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

Tomografia Computadorizada

Com os avanços tecnológicos, diversos métodos têm sido propostos com a finalidade de quantificar a distribuição do sistema poroso do solo e demais variáveis físicas, de modo que possa identificar alguns questionamentos como: a continuidade espacial entre poros; sua tortuosidade; interligação entre os espaços porosos; gênese; além de uma vasta gama de informações.

Avanços na aplicação da tomografia computadorizada (µTC) para avaliação da porosidade do solo têm surgido como uma nova ferramenta de pesquisa para investigar a distribuição espacial e diâmetros de poros (ANDERSON et al., 2010; VAZ et al., 2011; BORGES et al., 2012; MUNKHOLM et al., 2013).

A tomografia computadorizada é uma técnica de imagem não-invasiva, ou seja, não destrutiva, que permite alta resolução bidimensional e tridimensional da imagem, inferido assim de forma mais detalhada e precisa sobre as características dos poros do solo (CORTINA JANUCHS et al., 2011).

O estudo dessas imagens baseia-se no conceito de pixel (menor elemento ou ponto por unidade de medida quadrada que compõe uma imagem digital) e voxel, que representa a medida do pixel em volume, unidade de medida cúbica (HECK, 2009). A separação dos diferentes materiais que compõem a imagem é baseada na densidade de cada componente (radiodensidade). Assim, nas imagens de tomografia computadorizada a visualização de componentes com maior densidade é mais escura e aquelas de menor densidade, mais clara. Dessa forma, a distribuição da imagem dentro de um número pré-

estabelecido de pixels e voxels, isto é, de resolução da imagem, permite a quantificação e reconstrução em 3D dos componentes da amostra estudada (ELLIOT & HECK, 2007; HECK, 2009).

Métodos de tomografia computadorizada fornecem uma resolução fina de medição, em escala de milímetros a micrometros (KIM et al., 2010; KUMAR et al., 2010) e, portanto, têm o potencial de detectar pequenas diferenças na geometria dos poros e outros parâmetros espaciais.

Os estudos envolvendo a aplicação da tomografia computadorizada em termos de Brasil vêm se destacando nas últimas três décadas, com um trabalho pioneiro no qual se utilizou esta técnica para a quantificação da distribuição espacial do conteúdo de água e da retenção e movimento da água no solo (CRESTANA et al., 1985). Recentemente, estudos envolvendo a modificação da densidade do solo e da porosidade de amostras deformadas submetidas a diferentes ciclos de umedecimento e secamento (PIRES & BACCHI, 2010), comprovam que no Brasil a técnica de tomografia computadorizada nos estudos de ciência do solo ainda está em evolução, mesmo apesar dos 30 anos que esta vem sendo aplicada.

Uma das grandes problemáticas que envolvem os estudos da distribuição de poros está em relação à forma de poros. Diversas pesquisas têm sido focadas na maneira mais eficaz em medir o tamanho dos poros, suas formas, distribuição e disposição, área de superfície e conectividade (UDAWATTA et al., 2008; KUMAR et al., 2010).

Efeito dos sistemas de manejo nas propriedades físicas

No Brasil os últimos anos têm sido caracterizados pelo avanço de maquinários, implementos agrícolas e sistemas de irrigação que visam aumentar em grande escala a produtividade das culturas cultivadas comercialmente, e que são de grande importância

no cenário nacional e mundial. As inovações tecnológicas relacionadas ao uso de máquinas agrícolas posicionam o Brasil como uma grande potência agrícola mundial, pois esta evolução consolida o país com um elevado índice na produção de commodities de destaque mundial (TOLLEFSON, 2010).

Diante deste cenário, a atividade canavieira mecanizada e automatizada com sistemas de irrigação, tornam-se indispensáveis para atender a demanda por produtos e subprodutos do setor sucroalcooleiro, especialmente em regiões onde ocorre déficit hídrico elevado e escassez de mão-de-obra, como é o caso da região da Zona da Mata Pernambucana. Porém tais práticas quando realizadas de forma excessiva ou de forma não planejada, podem influenciar negativamente nas propriedades físicas do solo.

No contexto atual, práticas voltadas ao plantio direto (PD) e uso racional da irrigação, vêm modificando satisfatoriamente as propriedades físicas do solo, principalmente a porosidade, estabilidade de agregados, densidade do solo e a condutividade hidráulica dos solos, que são as mais afetadas por estas práticas, quando comparadas aos métodos tradicionais de cultivo em sequeiro ou práticas desordenadas de preparo do solo (SANTOS & RIBEIRO, 2000; ALVAREZ & STEINBACH, 2009; CASSARO et al., 2011; PIRES et al., 2017).

Dentre as variáveis físicas, podemos destacar principalmente a estabilidade de agregados, a partir da relação entre o diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), que pode ser considerada como a variável física afetada diretamente, e em maior proporção, pelas práticas de manejo descritas. PORTELLA et al. (2012); CASSARO et al. (2011), trabalhando com Latossolos, descreveram mudanças no índice de estabilidade de agregados, DMG e DMP, induzido pelos sistemas de plantio direto; em contrapartida, a preparação mais intensa do solo resultou em uma diminuição da agregação do solo e que afetou diretamente as demais variáveis

físicas como a distribuição do tamanho de poros e condutividade hidráulica. ZHANG et al. (2017) estudando macroporos após conversão de solos nativos do deserto para áreas de cultivo irrigadas, destacam que o efeito da irrigação nas propriedades estruturais geram fissuras e contribuem para aumentar a duração média dos macroporos, mas entretanto, ocorre uma redução afetando assim a sua distribuição e rede de macroporos, afetando assim a densidade do solo e sua resistência à penetração de raízes.

Conforme destacam JARVIS et al. (2017); MARTINEZ et al. (2017) os diferentes efeitos de cultivo e práticas de gestão aplicadas ao solo em diferentes escalas e magnitudes afetam proporcionalmente a estrutura do solo, visto que a estrutura e o funcionamento do solo são os dois lados de uma equação, igualmente essenciais dentro do campo da ciência do solo, que ainda continua a ser um desafio. Tais processos, infelizmente, estão longe de ser totalmente compreendidos, o que favorece o surgimento de novas pesquisas visando elucidar e compreender os efeitos associados às práticas de gestão dos solos.

Com isso, faz-se necessário estudos que visem compreender os efeitos proporcionados pelas práticas de preparo do solo, associados às técnicas de irrigação, visto que na literatura estudos conjuntos com estas técnicas são bastante escassos, e principalmente se tratando de uma região canavieira de grande importância econômica, como é a Zona da Mata Pernambucana, em que trabalhos voltados para a física de solos ainda são inexpressivos na literatura atual.

REFERÊNCIAS

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, D. M. P.; SOUZA, Z. M.; CUNHA, J. M.; RODRIGUES, M. D. Physical and geospatial attributes of inceptisols and ultisols under native vegetation in Humaitá, AM, Brazil. **Bioscience Journal**. v. 32, p. 422-430, 2016.

ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and Tillage and Research**. v. 104, 1–15, 2009.

ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; KUMAR, S.; GANTZER, C. J.; RACHMAN, A. **CT-measured macropore parameters for estimating saturated hydraulic conductivity at four study sites**. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 2010, Brisbane, Australia.

ANDRIOTTI, J. L. S. Introdução a Geoestatística. **Acta Geológica Leopoldensia**. v. 27, p. 7-82, 1988.

ARAUJO, D. R.; MION, R. L.; SOMBRA, W. A.; ANDRADE, R. R.; AMORIM, M. Q. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos submetidos a diferentes tipos de uso e manejo. **Revista Caatinga**. v. 27, p. 101-115, 2014.

BORGES, J. A. B.; PIRES, L. F.; PEREIRA, A. B. Computed tomography to estimate the representative elementary area for soil porosity measurements. **Scientific World Journal**. v. 27, p. 1–10, 2012.

CARVALHO, L. C. C.; SILVA, F. M.; FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. C.; STRACIERI, J. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**. v. 8, p. 265-275, 2013.

CASSARO, F. A. M.; BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; SAAB, S. da, C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil and Tillage Research**. v. 111, 175–179, 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17**. v. 3, 65p, 2016.

CORTINA JANUCHS, M. G.; QUINTANILLA DOMINGUEZ, J.; VEGA-CORONA, A.; TARQUIS A. M.; ANDINA, D. Detection of pore space in CT soil images using artificial neural networks. **Biogeosciences**. v. 8, p. 279–288, 2011.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI MUCELLI, R. S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. **Soil Science**. v.140, p.326-332, 1985.

DANTAS NETO, J.; FIGUEIREDO J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, p. 283-288, 2006.

ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. A comparation of 2D vs. 3D tresholding of X-ray CT imagery. **Canadian Journal Soil Science**. v. 87, p. 405–412, 2007.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JÚNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Ciência Agronômica**. v. 47, p. 247-255, 2016.

HECK, R. J. **X-ray computed tomography of soil**. In*:* Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Tópicos em Ciência do Solo. v. 6, p. 1 -30, 2009.

JARVIS, N.; LARSBO, M.; KOESTEL, J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. **Geoderma**. v. 287, p. 71-79, 2017.

KIM, H. M.; ANDERSON, S. H.; MOTAVALLI, P. P.; GANTZER, C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**. v. 260, p. 244–251, 2010.

KUMAR, S.; ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; GANTZER, C. J. CT-measured macropores as affected by agroforestry and grass buffers for grazed pasture systems. **Agroforestry Systems**. v. 79, p. 59–65, 2010.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R. B.; QUARTEZANI, W. Z. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de pimenta - do - reino. **Revista de Engenharia Agrícola**. v. 15, p. 290-298, 2007.

MARTINEZ, F. S. J.; CANIEGO, F. J.; GUTIÉRREZ, C. G. Lacunarity of soil macropore space arrangement of CT images: Effect of soil management and depth. **Geoderma**. v. 287, p. 80-89, 2017.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**. v. 127, p. 85–91, 2013.

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; LIRA JÚNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, p. 951-960, 2010

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, p. 1103-112, 2013.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com o uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 45, p. 391-400, 2010.

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.

PORTELLA, C. M. R.; GUIMARÃES, M. DE. F.; FELLER, C.; FONSECA, I. C. de, B.; TAVARES FILHO, J. Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, 1868–1877, 2012.

RICHTER, R. L.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P. J.; HANSEL, F. D. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo sob plantio direto influenciados pelo relevo e profundidade de amostragem. **Enciclopédia Biosfera**. v.7, p.1043-1059, 2011.

SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um argissolo da região do sub médio São Francisco: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 24, p. 875-884, 2000.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos do vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, p. 828-835, 2012.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 241-249, 2014.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; SIQUEIRA, D. S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, p.1250–1256, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**. v. 40, 48-56, 2009.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature.** v. 466, p. 554-556, 2010.

UDAWATTA, P.; GANTZER, C. J.; ANDERSON, S. H., GARRETT, H. E. Agroforestry and grass buffer effects on high resolution X-ray CT-measured pore characteristics. **Soil Science Society American Journal**. v. 72, p. 295–304, 2008.

VAZ, C. M.; DE MARIAB, I. C.; LASSO, P. O. Evaluation of an advanced benchtop micro-computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian Oxisols. **Soil Science Society American Journal**. v. 75, p. 832–841, 2011.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

WEBSTER, R. Statistics to support soil research and their presentation. **European Journal of Soil Science**. v.52, p.331- 340, 2001.

WIEDENFELD, B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south Texas. **Agronomy Journal**. v.100, p. 665-671, 2008.

ZHANG, Y.; ZHAO, W.; FU, L. Soil macropore characteristics following conversion of native desert soils to irrigated croplands in a desert-oasis ecotone, Northwest China. **Soil and Tillage Research**. v. 168, p. 176-186, 2017.

Capítulo I - Variabilidade espacial e análise multivariada de atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco

RESUMO

As técnicas geoestatísticas e multivariadas vêm sendo utilizadas em pesquisas com o propósito de identificar e caracterizar a variabilidade, além de explicar a possível relação existente entre variáveis do solo com manejos aplicados e distinção de ambientes. Os objetivos deste estudo foram: (I) avaliar a distribuição espacial de atributos físicos do solo sob sistemas de cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro e irrigado; (II) com base na densidade amostral caracterizar a amostragem mínima na determinação de variáveis físicas do solo (III) caracterizar com base na análise de componentes principais (ACP) a relação e efeitos entre variáveis físicas e manejo. A variabilidade espacial foi determinada a partir do delineamento de duas áreas (sistemas) com 56 x 35 m e espaçamento regular de 7 m, caracterizada a partir da amostragem de 64 pontos, ao qual foram georreferenciados com sistema de posição global (GPS). O solo foi caracterizado fisicamente, avaliado os seguintes parâmetros: densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP), macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade e porosidade total (PT), condutividade hidráulica saturada (Ksat), umidade gravimétrica, diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP). Os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva, geoestatística e técnicas multivariadas. A abordagem geoestatística associada às técnicas multivariadas de ACP, possibilitaram compreender a relação do padrão de distribuição espacial exercidas pelos manejos irrigado e sequeiro sobre as propriedades físicas dos solos. As técnicas de densidade amostral se fazem eficaz em uma gestão de monitoramento de atributos físicos, com o critério de manter a qualidade física dos solos.

Palavras-chave: Distribuição espacial; densidade amostral; parâmetros físicos; técnicas multivariadas.

ABSTRACT

The objectives of this study were: (I) evaluate the spatial distribution of soil physical properties under sugarcane cultivation systems in rainfed and irrigated; (II) based on sample density to characterize the minimum sampling of physical variables of soil (III) characterize based on principal component analysis (PCA) and the relationship between effects physical variables and management. The spatial variability was determined from the design of two areas (systems) with 56 m x35 m and regular spacing of 7 m, wherein from 64 sampling points, which have been geocoded with global position system (GPS). The soil was physically characterized, assessed the following parameters: bulk density (BD), soil resistance penetration (SRP), macroporosity, mesoporosity, microporosity and total porosity (TP), saturated hydraulic conductivity (Ksat), soil moisture, average diameter geometric (ADG) and mean weight diameter (MWD). The data were analyzed with descriptive statistics, geostatistics and multivariate techniques. The geostatistical approach associated with multivariable PCA techniques made it possible to understand the spatial distribution pattern of the relationship exerted on managements in irrigated and rainfed on the physical properties of soils. The sample density techniques are made effective in a monitoring management of physical attributes, with the criterion of maintaining the physical quality of the soil.

Keywords: Spatial distribution; sample density; physical parameters; multivariate techniques.

INTRODUÇÃO

Diante da expansão global por culturas que exerçam papel fundamental na produção de bioenergia, a cana-de-açúcar destaca-se como a cultura que melhor apresenta resposta de produção de biocombustíveis comparada com as demais culturas destinadas a este fim (OLIVEIRA et al., 2013; CHERUBIN et al., 2016a; CHERUBIN et al., 2016b).

No contexto atual, o Brasil detém os maiores índices de área plantada e produção por hectare, sendo considerado o maior produtor mundial de cana. Estima-se que na safra 2016/17 o Brasil irá produzir 684,7 milhões de toneladas em uma área de 8,9 milhões de hectares (CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, 2016).

A região Nordeste contribui com aproximadamente 10,4% do total da área plantada, dos quais 3% localiza-se no estado de Pernambuco, enquanto que em relação à produção nacional o estado contribui com apenas com 2,8% (CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, 2016).

As dificuldades na produção de cana-de-açúcar para o estado de Pernambuco, mais especificamente para a região da Zona da Mata Norte, vêm se tornando atualmente objeto de pesquisa, com o propósito de manejar adequadamente a cultura com fins de maior produção por unidade de área (OLIVEIRA et al., 2010).

O déficit hídrico é um dos grandes problemas que afetam a produção da cultura para esta região. O sistema de cultivo em sequeiro, predominante a nível mundial e de Brasil, é praticado em maior escala conforme destacam FARIAS et al. (2008); GAVA et al. (2011). Em contra partida, DANTAS NETO et al. (2006); FARIAS et al. (2008) afirmaram que para a obtenção de uma elevada produtividade o uso da tecnologia de irrigação é imprescindível.

Além de afetar diretamente a produtividade, manejos sob sistema irrigado e de sequeiro, associados à práticas de preparo do solo, modificam o comportamento dos atributos do solo, mais especificamente as suas características físicas, a qual são influenciadas, como por exemplo a umidade. Um conteúdo de água inadequado, no qual for realizado o manejo mecanizado do solo, associados a carga dos implementos agrícolas, deverá levar a maior compactação dos solos (CORRÊA et al., 2010).

Desse modo, a inadequação de práticas pode acarretar na redução do sistema radicular em função das variáveis físicas que dependem diretamente da circulação de água na matriz do solo, tais como: a porosidade, estabilidade de agregados, densidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes e condutividade hidráulica (OTTO et al., 2011; BAQUERO et al., 2012; CHERUBIM et al., 2016a).

O acompanhamento das modificações nos atributos físicos de solos em perímetros irrigados fornecem informações importantes sobre a qualidade do solo e sua capacidade produtiva, sendo esta alterada pelo uso, subsidiando a implantação de novos perímetros e o manejo do solo nos perímetros em atividade, conforme destacam CORRÊA et al. (2010).

As técnicas geoestatísticas e multivariadas vêm sendo utilizadas em pesquisas com o propósito de identificar e caracterizar a variabilidade, além de explicar a possível relação existente entre variáveis do solo com manejos aplicados e distinção de ambientes, principalmente por considerar a variação espacial de um grande número de variáveis que estão correlacionadas diretamente com os sistemas de cultivo (SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2015a; AQUINO et al. 2016).

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em áreas manejadas é de extrema importância, pois os processos que imprimiram tais modificações, somados ao manejo realizado pelo homem, acentuam a variação dos

atributos do solo e seu entendimento é fundamental para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos sobre o ambiente (CAMBARDELLA et al., 1994).

A análise de dados a partir destas técnicas apresenta-se como valiosa ferramenta na caracterização da variabilidade de atributos físicos do solo, principalmente em variáveis físicas como a densidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes, umidade do solo e sua porosidade, por serem variáveis que apresentam variações tanto no sentido horizontal quanto vertical, além de apresentarem variação de alcance de distribuição espacial, além do estipulado pela área amostral (CAMPOS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015a; ALHO et al., 2016; AQUINO et al., 2016)

Nesse sentido, o uso das técnicas geoestatísticas e multivariadas facilitam a interpretação do comportamento dos atributos do solo, para melhor tomada de decisão na prática de manejo, além de fornecerem informações a respeito das modificações estruturais dos solos.

Embora a região da Zona da Mata Pernambucana seja uma referência de produção de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco, ainda são escassos os trabalhos que visam elucidar os efeitos de diferentes manejos nos atributos físicos do solo, aplicando técnicas geoestatísticas e multivariadas.

Diante deste cenário, foi realizado um estudo para quantificar os efeitos dos diferentes manejos nos atributos físicos do solo a fim de se explicar a variação espacial e correlação existente entre as variáveis estudadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do meio físico

O estudo foi realizado na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina - PE (7º51'13"S, 35º14'10"W), situada na região da Zona da Mata Pernambucana e caracterizada como a região de maior expressividade na produção de cana no estado.

O município de Carpina encontra-se inserido, geologicamente, na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos do Complexo Salgadinho, da Suíte Serra de Taquaritinga, do Complexo Vertentes e do Grupo Barreiras (CPRM, 2005). O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo Ams, tropical chuvoso de monção, com verão seco e altitude média de 180 m.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, de textura franco-argilo-arenosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (SANTOS et al., 2013) e como Haplohumults, segundo SOIL SURVEY STAFF (2014). Critérios adicionais de informações dos atributos físicos e químicos antes da implantação do experimento são apresentados na Tabela 1, com metodologias de acordo com DONAGEMA et al. (2011).

A área agrícola utilizada no ensaio foi implantada em sistema convencional de cultivo de cana-de-açúcar e foi preparada para implantação do experimento em junho de 2014. O manejo para renovação do canavial consistiu na dessecação da socaria utilizando o herbicida Glyfosate® na dosagem de 4,0 L ha^{-1}. A correção do solo com calcário dolomitíco (PRNT 79,3 %, CaO 33,6 %, MgO 17,8 %) em superfície, realizada com a aplicação de 3,5 t/ha à lanço dois meses antes do plantio da cana-de-açúcar. A

necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases e realizada de modo à saturação de bases atingir 60%.

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo da área amostral antes da instalação do experimento

Variáveis	Valor/Teor/Classificação
pH (H_2O)	4,60
H+Al (cmolc dm^{-3})	4,40
Al[(1)] (cmolc dm^{-3})	0,50
H[(2)] (cmolc dm^{-3})	3,90
Ca[(1)] (cmolc dm^{-3})	1,30
Mg[(1)] (cmolc dm^{-3})	0,30
K[(3)] (cmolc dm^{-3})	0,10
Na[(3)] (cmolc dm^{-3})	0,03
CTC (cmolc dm^{-3})	6,13
V (%)	28,21
m (%)	22,44
Carbono orgânico total (%)	0,96
Matéria orgânica (%)	1,66
P[(3)] (mg dm^{-3})	9,00
Fe (mg dm^{-3})	92,60
Cu (mg dm^{-3})	0,60
Zn (mg dm^{-3})	5,30
Mn (mg dm^{-3})	22,40
Areia Total (g kg^{-1})	656,50
Areia Fina (g kg^{-1})	168,20
Areia Grossa (g kg^{-1})	488,30
Silte (g kg^{-1})	91,00
Argila (g kg^{-1})	252,50
Classe textural	Franco-Argilo-Arenosa
Grau de Floculação (%)	11,85
Grau de Dispersão (%)	85,15
Densidade de partículas (Mg m^{-3})	2,61
Densidade do Solo (Mg m^{-3})	1,55
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,41
Macroporosidade (m^3 m^{-3})	0,14
Microporosidade (m^3 m^{-3})	0,27
Capacidade de Campo (m^3 m^{-3})	0,24
Ponto de Murcha Permanente (m^3 m^{-3})	0,17

[(1)] Extrator KCl 1 mol/L; [(2)] Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0. [(3)] Extrator Mehlich^{-1};CTC = Capacidade de Troca de Cátions; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio.

Após a abertura dos sulcos, o plantio foi realizado manualmente no mês de agosto de 2014, utilizando-se rebolos de três gemas, distribuídos em sulcos com oito metros de comprimento, para que se atingisse uma densidade de plantio de 16 a 18 gemas por metro linear.

O cultivo da cana-de-açúcar sob sistema de irrigado, foi conduzido sob irrigação plena durante todo o período de instalação do experimento. Utilizaram-se aspersores com dois bocais (4,0 x 2,8 mm) e vazão nominal de 1,29 m^3 h^{-1} dispostos em campo num espaçamento de 12 x 12 m. Foram realizadas irrigações a cada dois dias, sendo a lâmina de irrigação calculada pelo somatório da evapotranspiração da cultura suprimindo-se eventuais precipitações no período.

A evapotranspiração da cultura foi calculada com base no produto do coeficiente da cultura (Kc) pela evapotranspiração de referência, sendo esta obtida de maneira indireta por meio do Tanque Classe A de acordo com ALLEN et al. (1998).

A lâmina total de irrigação foi de 786 mm, enquanto a precipitação foi de 1029 mm. Os dados da distribuição da precipitação, evapotranspiração e a lamina bruta total de irrigação encontram-se na Figura 1.

Amostragem de solos e medições físicas

A amostragem dos solos foi realizada em janeiro de 2016. Em cada sistema de uso (irrigado e sequeiro), foram coletadas amostras nas entrelinhas de cultivo, usando um padrão de grid amostral com dimensões de 56 x 35 m (1960 m²), com espaçamento regular de 7 m entre os pontos, fornecendo um total de 32 pontos em cada área de estudo, totalizando 64 amostras. Os pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin Etrex (South American´69), para posterior construção do modelo digital de elevação (MDE) (Figura 2).

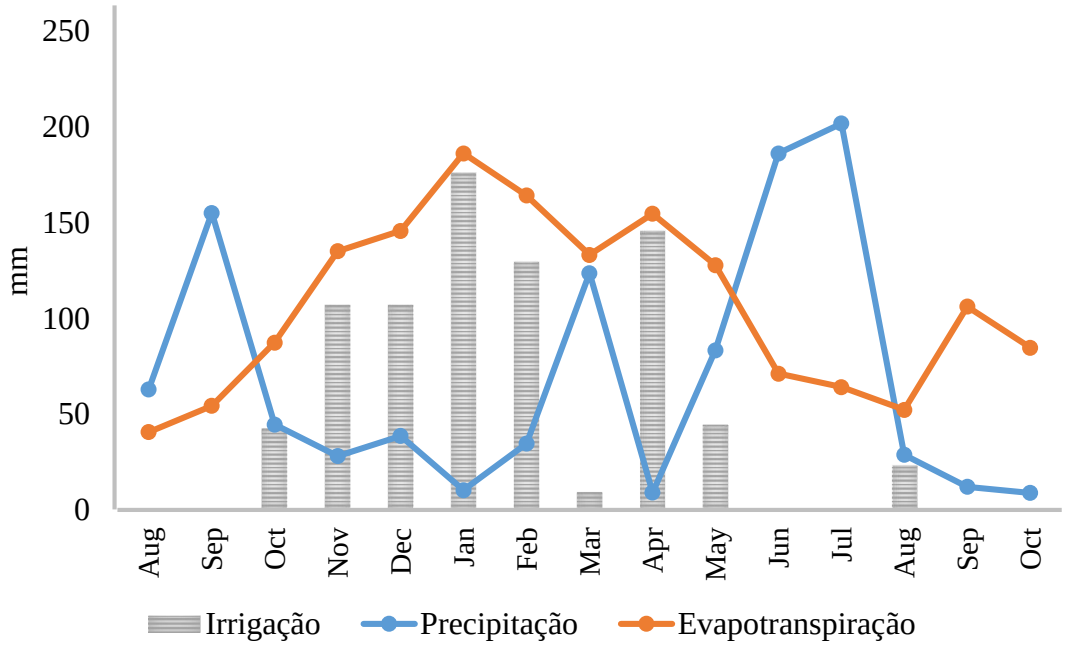


Figura 1. Distribuição de precipitação, irrigação e evapotranspiração durante o período de cultivo da cana planta na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina.

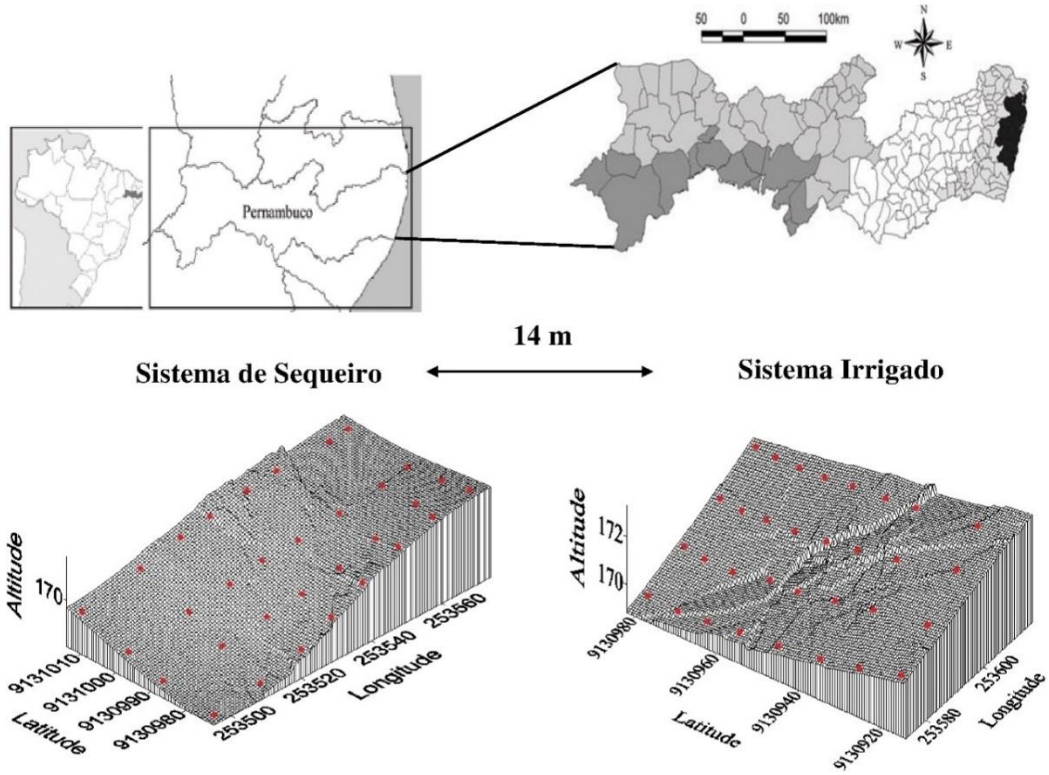


Figura 2. Localização da área experimental e modelo digital de elevação (MDE) em área de cana-de-açúcar sob manejo na Zona da Mata de Pernambuco.

Embora os sistemas radiculares de cana-de-açúcar possam chegar a camadas mais profundas do solo, limitamos a nossa avaliação a 0,1 m, pois a maioria das raízes está concentrada nesta camada e esta é a zona onde alterações das propriedades físicas do solo são mais significativas e que são mais facilmente modificadas pelo uso da terra e práticas de gestão (BALL-COELHO et al., 1992; KANNO et al., 1999).

As amostras foram coletadas em estrutura preservada, utilizando-se anéis volumétricos fabricado em acrílico, com dimensões de 7,5 x 7,5 cm (altura e diâmetro) que foram usados nos ensaios físico-hídricos.

A amostragem foi realizada pela inserção dos anéis com auxílio de amostrador tipo Uhland, mas por inserção motorizada (cuja patente está em fase final de depósito, não sendo possível fornecer maiores detalhes). Tal procedimento garante a menor perturbação da amostra dentro do anel, durante o processo de sua inserção ao solo. Em cada ponto de amostragem foi aberta uma mini trincheira (0,3 x 0,3 x 0,3 m) para a coleta de agregados a uma profundidade de 0,1 m.

Em nível de campo foram tomadas nove medidas de resistência do solo à penetração (RP) em torno de cada uma das trincheiras na profundidade de 0,10 m usando um penetrômetro digital FALKER®, modelo PenetroLOG – PLG 5300, com haste metálica com extremidade em cone tipo: C2 com 12,2 mm de diâmetro. O penetrômetro registra e armazena leituras a cada 0,01m de profundidade. Os dados foram extraídos por meio do Software PenetroLOG. A umidade gravimétrica (U) foi medida na mesma camada de determinação da RP, a partir da relação entre a massa de solo úmido e massa de solo seco em estufa a 105°C (EMBRAPA, 2011).

A condutividade hidráulica saturada, determinada em laboratório (Ksat), foi quantificada conforme REYNOLDS & ELRICK (2002), utilizando as amostras coletadas em anéis volumétricos, previamente saturadas e adaptadas a um permeâmetro

de carga constante. A condutividade hidráulica saturada foi obtida por meio da aplicação da equação de Darcy, expressando os resultados em mm h^{-1}.

Para a quantificação da porosidade total, as amostras foram saturadas por um período de 24 h, aumentando gradualmente o nível de água até que atingissem 2/3 da altura do cilindro em uma bandeja. Após este período, foram pesadas e com base na relação entre o peso de saturação, peso seco à 105ºC, com o respectivo volume do cilindro, foi determinada a porosidade total.

A determinação do volume de macroporos (Ma, em m^3 m^{-3}), foi realizada a partir da saturação da amostra e aplicação de potencial matricial a -1kPa, em mesa de tensão, até que houvesse equilíbrio do conjunto, sendo então calculada a Macroporosidade a partir da relação entre o peso do conjunto saturado e equilibrado a -1kPa pelo respectivo volume de solo (assumido como volume do anel volumétrico).

Para mesoporosidade, a partir do conjunto equilibrado a -1kPa, foi aplicado o potencial matricial de -6kPa, e calculada a partir da relação entre a umidade equilibrada a -1kPa e -6kPa; enquanto que a microporosidade foi determinada entre a relação de umidade a -6kPa e o respectivo peso equilibrado a 105° C. A distribuição dos tamanhos de poros foi realizada com base na classificação de PREVEDELLO (1996).

A determinação da densidade do solo foi realizada na sequência, conforme descrito em GROSSMAN & REINSCH (2002), onde o solo contido em anel volumétrico foi seco em estufa à 105ºC, até peso constante.

Para os ensaios de estabilidade de agregados, estes foram manualmente confeccionados para apresentarem diâmetro médio de 5,9 mm (obtidos a partir de tamisação a seco em peneira de 7,1 mm e retidos na peneira de 4,7 mm). A estabilidade de agregados via úmida foi determinada conforme o princípio de umedecimento lento, descrito por KEMPER & ROSENAU (1986), com alguma modificações comentadas a

seguir. Depois do pré-umedecimento, as amostras foram mantidas em repouso em temperatura ambiente por 10 minutos. Em seguida, estas amostras foram colocadas no aparelho de oscilação vertical sobre um conjunto de cinco peneiras, com abertura de malha (mm) de: 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 durante 15 minutos. A partir dos valores das massas contidas em cada peneira e conhecendo os teores de água das amostras de solo submetidas ao tamisamento, foram calculados o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG).

Análise geoestatística

Após obtenção dos dados, foram realizadas as análises exploratórias, calculando-se a média, a mediana, o desvio padrão, o coeficiente de variação, de assimetria e de curtose, máximo e mínimo. O coeficiente de variação (CV) foi calculado com base no critério de WARRICK & NIELSEN (1980), que classificam o CV como: baixo, quando < 12%; médio, de 12% a 24%; e alto > 24%. Para a hipótese de normalidade, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística. Sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação (1):

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

onde: (h) é o valor da semivariância para uma distância h; N(h), o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; Z(xi), o valor do atributo Z na posição xi; Z(xi+h), o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição xi.

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$ são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita, C_0; variância estrutural, C_1; patamar, $C_0 + C_1$; e alcance, a) (TRANGMAR et al., 1985). Na

determinação da existência ou não da dependência espacial (DE), utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS^+ (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor coeficiente de determinação (R^2) e validação cruzada (VC). Para analisar o grau da dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994), em que são considerados dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25% e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Os semivariogramas serviram como base de informação para calcular o número mínimo de amostragem do solo, conforme equação (2):

$$\mathrm{N} = \frac{\mathrm{A}}{(a^2)/10000} \qquad (2)$$

em que: N é o número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem; A: área total em hectare (ha); e a, o alcance do semivariograma, em metros (m).

Análise multivariada

Os dados foram submetidos à análise de componentes principais (ACP), tendo o intuito de sumarizar os valores obtidos dos atributos estudados nos sistemas irrigado e de sequeiro. Desta forma, o conjunto inicial de 10 variáveis passou a ser caracterizado por duas novas variáveis latentes (CP1 e CP2), o que possibilitou sua localização em figuras bidimensionais (ordenação dos acessos por componentes principais).

A adequação desta análise é verificada pela informação total das variáveis originais, retida nos componentes principais que mostram autovalores superiores à unidade, ou autovalores inferiores não dispondo de informação relevante. Foram

realizadas análises de Correlação de Pearson com o critério de sumarizar e visualizar a inter-relação entre as variáveis físicas. Todas as análises estatísticas multivariadas e de correlação foram processadas no software Statistica versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Indicadores estatísticos dos atributos físicos

Os resultados referentes ao teste de médias e estatística descritiva para os atributos físicos são apresentados na (Tabela 2). Observa-se que os valores de média e mediana de todas as variáveis estudadas estão próximos, evidenciando que estes se aproximam de uma distribuição normal, caracterizando que os dados seguem distribuições simétricas, a exceção da condutividade hidráulica saturada (Ksat) que apresentou distanciamento entre média e mediana.

Verifica-se que as variáveis macroporosidade (Ma), mesoporosidade (Me), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e umidade gravimétrica (U), não foram alteradas em função dos sistemas implantados, apresentando índices similares quando comparados.

Tais condições observadas podem ser justificadas em função do caráter distrocoeso destes solos, onde os efeitos das práticas de irrigação e preparo do solo não foram suficientes para interferir nas suas condições físicas, pois quando o solo encontra-se em condição de umidade semelhante, como foi constatada nos dois manejos de 0,09 g^1 g^{-1}, a ação coesiva dos solos tornam os ambientes similares.

Em relação a isto, LIMA NETO et al. (2009) e TAVARES et al. (2012), estudando Argissolos coesos dos tabuleiros costeiros, respectivamente nas regiões de

Alagoas e do Leste Maranhense, encontraram valores próximos para estas variáveis físicas citadas, quando comparadas ao do presente, indicando assim que estas propriedades físicas são as mais sensíveis a esta condição em que a umidade encontra-se em níveis críticos.

Em relação aos valores de macroporos para os dois sistemas, percebe-se que estes se encontram abaixo do limite de 10% estabelecido por TORMENA et al. (1998), como limitantes à difusão de oxigênio no interior do solo. Como grande parte do sistema radicular da cana-de-açúcar encontra-se na camada superficial (BALL-COELHO et al., 1992; KANNO et al., 1999), esta condição é preocupante e limitante à produção em maior escala para a cultura.

A similaridade nos índices de mesoporos obtidos em ambos os manejos, pode ser um indicativo da drástica redução de macroporos exercidas pelas práticas contínuas de preparo do solo, pois a desagregação da estrutura, destruindo ou reduzindo partes dos poros maiores é comumente estabelecida em áreas que passam por manejo frequente (SILVA, 2011).

Os valores de microporosidade para os dois sistemas são superiores aos encontrados por ZUFFO et al. (2013) no qual obtiveram 0,21 m^3 m^{-3}, em Argissolo Amarelo coeso do Espírito Santo em sistema convencional de cultivo sem irrigação. Como não foi constatada diferenças entre os índices de microporos para os sistemas sob irrigado e sequeiro, pouco pode ser concluído sob os efeitos da irrigação no que diz respeito a esta propriedade física. De certa forma, o aumento da área amostral poderia captar variações vai acentuadas. Conforme destacam ARAÚJO et al. (2004) a microporosidade é pouco influenciada pelo manejo do solo, ainda mais na condição do presente estudo.

Tabela 2. Teste de médias e estatística descritiva de atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na Zona da Mata de Pernambuco

Est. Descritiva	Ma	Me	Mi	PT	UG	RP	Ds	Ksat	DMG	DMP
	----------m^3 m^{-3}----------				g^1 g^{-1}	MPa	Mg m^{-3}	mm h^{-1}	-----mm-----	
Sistema de Sequeiro										
Mínimo	0,02	0,05	0,21	0,34	0,06	0,69	1,27	43,4	1,36	1,97
Máximo	0,08	0,18	0,29	0,48	0,11	3,03	1,77	665,9	2,71	3,53
Média	0,03 A	0,10 A	0,25 A	0,38 A	0,09 A	1,95 A	1,55 B	257,9 A	2,01 B	2,55 B
Mediana	0,03	0,1	0,25	0,39	0,11	1,38	1,55	189,7	1,99	2,55
DP	0,01	0,03	0,02	0,03	0,011	0,57	0,1	177,7	0,32	0,3
Assimetria	1,18	0,45	0,01	0,48	-1,05	0,78	-0,4	0,93	0,31	0,69
Curtose	0,77	-0,92	-0,49	-0,58	1,87	0,27	0,22	-0,12	-0,49	2,22
CV	43,8	34,96	8,03	9,3	11,99	39,88	7,06	68,9	16,06	11,97
d^3	0,12	0,15	0,06	0,11	0,05	$0,16^{ns}$	0,09	$0,11^{ns}$	0,08	$0,17^{ns}$
Sistema de Irrigado										
Mínimo	0,03	0,05	0,23	0,37	0,08	0,67	1,32	55,3	1,68	2,16
Máximo	0,09	0,15	0,31	0,51	0,12	3,8	1,66	613,5	3,04	3,19
Média	0,04 A	0,09 A	0,27 A	0,40 A	0,09 A	1,44 B	1,48 A	233,8 B	2,36 A	2,74 A
Mediana	0,04	0,09	0,27	0,41	0,1	1,81	1,5	190,0	2,37	2,79
DP	0,01	0,07	0,02	0,02	0,008	0,68	0,07	147,8	0,38	0,27
Assimetria	1,31	0,46	-0,02	1,27	0,14	0,62	-0,2	1,05	-0,13	-0,5
Curtose	1,47	0,17	-0,2	3,39	0,55	0,29	-0,11	0,6	-0,94	-0,5
CV	32,37	25,68	7,45	6,99	8,9	35,18	5,24	63,24	16,2	10,16
d^3	0,12	0,05	$0,04^{ns}$	0,07	0,03	0,14	0,13	$0,14^{ns}$	0,1	0,12

Ma = macroporosidade; Me = mesoporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; UG = umidade gravimétrica; RP = resistência do solo a penetração; Ds = densidade do solo; Ksat = condutividade hidráulica saturada; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado; CV = coeficiente de variação; d^3 = teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; * = não significativo pelo teste de normalidade.

Os valores médios de porosidade total estão acima do limite considerado crítico para o desenvolvimento das plantas que é 0,30 m^3 m^{-3}. Os valores encontrados são semelhantes aos obtidos por SILVA et al. (2015) e maiores que os 0,37 m^3 m^{-3} encontrados por MION et al. (2012) em Argissolo Amarelo distrocoeso. Apesar de haver uma suave variação entre a porosidade total no manejo em sequeiro 0,38 m^3 m^{-3} e irrigado 0,40 m^3 m^{-3}, estes não foram suficientes para captar variações com base no teste de médias, indicando assim que a análise de estatística clássica não é sensível a ponto de captar possíveis variações.

Os valores médios de 1,44 e 1,95 MPa encontrados para RP respectivamente aos manejos irrigado e sequeiro (Tabela 2), encontram-se abaixo do limite crítico de 2,0 MPa estabelecido por TORMENA et al. (1998); ARAÚJO et al. (2004). A RP é o indicador mais sensível que expressa a coesão dos solos. Nas condições do presente estudo a associação dos índices de umidade com os valores de RP, expressam que o grau de coesão destes solos ainda pode ser considerado muito baixo, visto que em pesquisas desenvolvidas por LIMA et al. (2005); SILVEIRA et al. (2010) encontraram valores médios de 5,07 MPa na camada superficial.

Os valores de Ds mostraram-se ligeiramente inferiores ao manejo sob sistema de irrigado (1,48 Mg m^{-3}) quando comparado ao sistema em sequeiro (1,55 Mg m^{-3}). Apesar de se constatar uma diferença significativa entre estes dois sistemas, evidencia nestas condições que o efeito irrigação pode ter sido um fator que contribuiu diretamente para esta condição, afetando também a porosidade do solo que se apresentou um pouco superior nesta condição (0,40 m^3 m^{-3}). TAVARES et al. (2012) estudando a variabilidade espacial de argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar encontraram valores similares ao do presente estudo, atribuindo que o efeito de

diferentes sistemas de usos exerceram papel fundamental na redução da Ds entre manejos.

Os valores acima citados para Ds em ambos os sistemas encontram-se elevados para a condição do presente estudo, muito em função do caráter coeso do solo estudado. Dentro desta faixa de Ds, SANTOS & RIBEIRO (2000) encontram valores variando entre 1,45 Mg m^{-3} a 1,60 Mg m^{-3} em áreas sob irrigação no vale aluvial do São Francisco em Argissolo. Estes autores concluíram que tais práticas podem ser benéficas ao solo, como também, dependendo das práticas de gestão aplicadas, podem levar a maior deterioração do solo.

Seguindo esta mesma lógica, ROCHA et al. (2014) afirmam que o uso de práticas de irrigação associadas ao manejo e tráfego inadequados, podem contribuir para a maior compactação dos solos, principalmente em camadas superficiais, como foi o caso do presente estudo.

Com relação a Ksat, os baixos valores encontrados no presente estudo para o sistema de sequeiro 257,9 mm h^{-1} e irrigado 233,8 mm h^{-1} (Tabela 2), estão muito abaixo daqueles obtidos por LIMA NETO et al. (2009), estudando Argissolos Coesos de Alagoas. Apesar de não existir um grau de coesão acentuada nestes solos, pois as condições de RP encontram-se dentro dos limites considerado como adequados (2,0 MPa), o fator Ds encontra-se em níveis elevados, que, associados ao tipo de argila (grau de dispersão ≅ 85%), tais condições podem formar camadas de impedimento à drenagem destes solos.

Outra vertente que pode ser considerada para estes baixos valores é a distribuição de macroporos. Os baixos índices de macroporos constatado, tanto no sistema sob sequeiro (0,03 m^3 m^{-3}), como no irrigado (0,04 m^3 m^{-3}), estão muito abaixo dos limites estabelecidos na literatura, que indicam valores próximos à

0,10 m^3 m^{-3} (TORMENA et al., 1998), refletindo assim em baixa condutividade hidráulica encontrada para os solos.

Com relação a este fato, GONÇALVES & LIBARDI (2013) comentam que a macroporosidade é fator de extrema importância na condutividade hidráulica do solo saturado e sua redução provoca diminuição nos valores de Ksat, como o observado nas condições do presente estudo.

A estabilidade de agregados avaliada pelo diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) é apresentada na Tabela 2. Observa-se que a área sob sistema de irrigado apresentou os maiores índices de DMG e DMP. O efeito da irrigação associado com possíveis agentes cimentantes, interligados às características como a atividade microbiana, a liberação de exsudados por raízes, o crescimento e funcionamento das raízes, morte dos tecidos, conferiram, provavelmente, maior estabilidade aos agregados neste sistema, como comentado em SALTON et al. (2008).

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov não indicou normalidade para RP, Ksat e DMP no sistema sob sequeiro; microporosidade e Ksat no sistema irrigado (Tabela 2). Apesar de a normalidade dos dados não ser exigência da geoestatística, esta medição apenas permite observar a maior precisão pelas estimativas da krigagem, as quais são baseadas em valores médios (CRESSIE, 1991).

A estatística descritiva evidenciou que os atributos apresentaram valores de assimetria e curtose próximos a zero, evidenciando novamente a relação de simetria dos dados, com exceção para alguns atributos, como por exemplo o Ksat (Tabela 2).

Apesar de apresentaram a mesma denominação taxonômica (Argissolo Amarelo distrocoeso) e similaridade entre os atributos físicos com base nos manejos utilizados, estes solos apresentam diferentes padrões de variabilidade, característica observada por meio dos diferentes valores de coeficiente de variação (CV).

Pelos limites de CV propostos por WARRICK & NIELSEN (1980), percebe-se que nos sistemas irrigado e de sequeiro o CV foi baixo para as variáveis de microporosidade, PT, umidade e DMP. Já para o DMG, considerando os dois sistemas de manejo, o CV apresentou valor moderado, enquanto que houve altos valores de CV para macroporosidade, mesoporosidade, RP e Ksat.

Avaliando os valores de CV entre os sistemas de cultivo, percebe-se que os das variáveis físicas do sequeiro sempre foram superiores, indicando que esta área apresentou maiores impactos pelo manejo exercido, sendo que, estes altos valores de CV são estimativas da maior heterogeneidade dos atributos, indicando maior variabilidade e consequentemente influenciando na densidade amostral (CARVALHO et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2014).

Variabilidade espacial

O CV possibilita comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém este padrão estatístico não permite gerar um padrão da distribuição espacial e compreender os efeitos exercidos pelas variações espaciais. Com isso, o ajuste dos semivariogramas pela análise geoestatística evidenciou que os sistemas de cultivo estudados apresentaram variabilidade no espaço para os atributos físicos analisados (Tabela 3 e Figuras 3 e 4).

Os modelos de semivariogramas esférico e exponencial foram os que melhor se ajustaram às variáveis físicas do solo, com valores de R^2 e VC superiores a 0,7 caracterizados assim como aqueles que apresentam a melhor relação em estudos voltados para a ciência do solo (SOUZA et al., 2006; SERRANO et al., 2016; BUTTAFUOCO et al., 2017).

Tabela 3. Parâmetros geoestatísticos de atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na Zona da Mata de Pernambuco

Par. Geoestatísticos	Ma	Me	Mi	PT	UG	RP	Ds	Ksat	DMG	DMP
	----------m^3 m^{-3}----------					MPa	Mg m^{-3}	mm h^{-1}	-----mm-----	
Sistema de Sequeiro										
Modelo	Lin	Exp	Exp	Exp	Esf	Exp	Lin	Exp	Exp	Exp
EP	-	0,004	0,006	0,002	0,007	0,03	-	5196,5	0,03	0,006
Patamar	-	0,001	0,004	0,001	0,001	0,27	-	37950	0,09	0,09
Alcance (m)	-	34,8	35,1	31,8	66,1	39	-	25,5	62,1	26,78
[1]R^2	-	0,91	0,98	0,96	1	0,99	-	0,81	0,97	0,86
[2]DE	-	0,7	0,84	0,79	0,57	0,88	-	0,86	0,59	0,87
[3]VC	-	0,69	0,8	0,55	0,76	0,74	-	0,68	0,97	1,09
Sistema de Irrigado										
Modelo	Lin	Lin	Exp	Exp	Esf	Exp	Esf	Lin	Exp	Esf
EP	-	-	0,003	0,001	0,002	0,07	0,003	-	0,02	0,01
Patamar	-	-	0,002	0,006	0,006	0,54	0,001	-	0,16	0,08
Alcance (m)	-	-	29,56	19,23	44,08	29,7	51,6	-	30,49	31,3
[1]R^2	-	-	0,95	0,94	0,82	0,73	1,0	-	0,82	0,69
[2]DE	-	-	0,78	0,91	0,56	0,87	0,54	-	0,85	0,82
[3]VC	-	-	0,66	0,72	0,87	0,78	0,65	-	0,91	0,81

Ma = macroporosidade; Me = mesoporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; UG = umidade gravimétrica; RP = resistência do solo a penetração; Ds = densidade do solo; Ksat = condutividade hidráulica saturada; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado; EP = efeito pepita; R^2 = coeficiente de determinação; DE = dependência espacial; VC = validação cruzada.

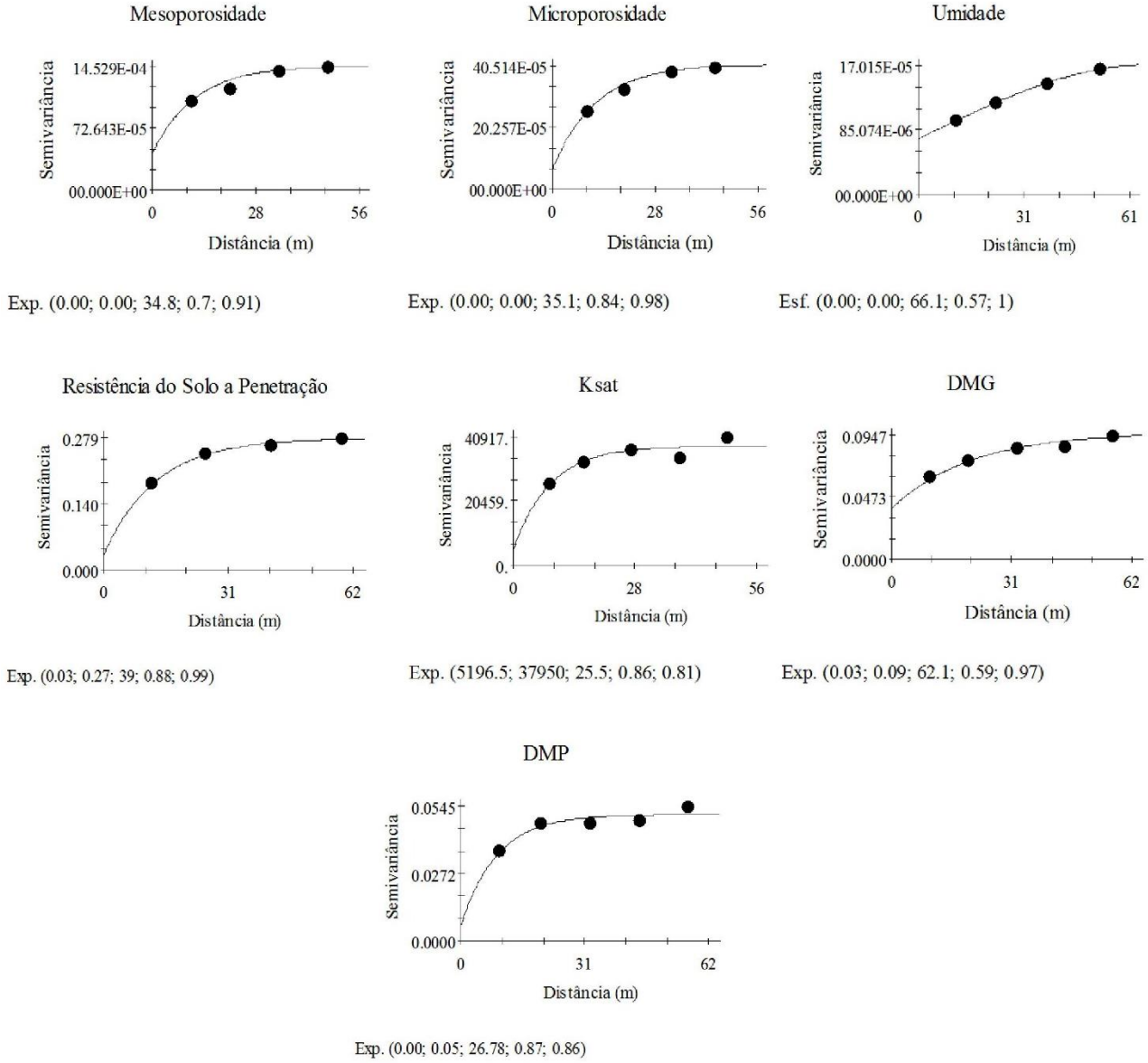


Figura 3. Modelos experimentais dos semivariogramas para atributos físicos do solo em sistema de sequeiro.

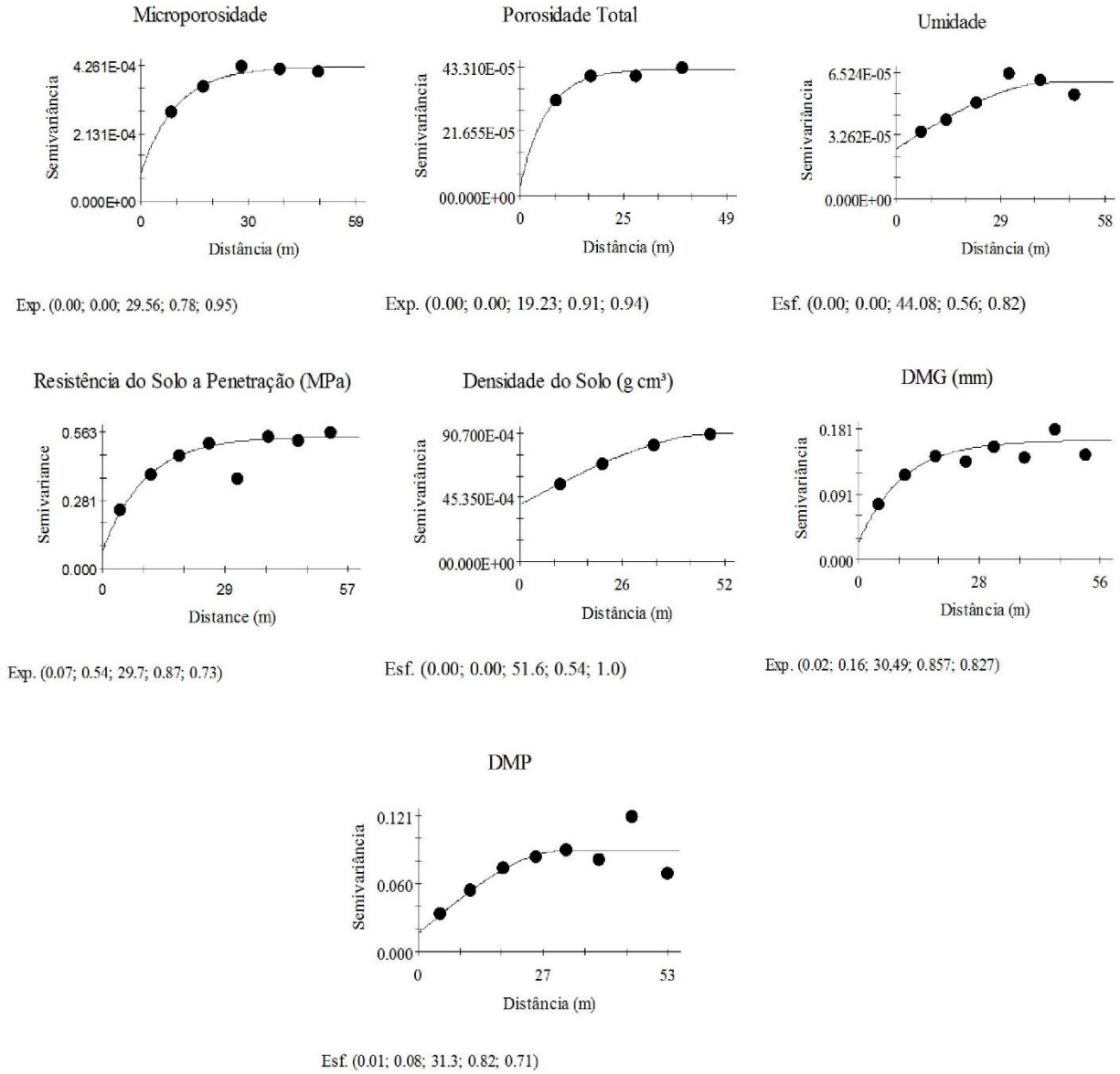


Figura 4. Modelos experimentais dos semivariogramas para atributos físicos do solo em sistema de irrigado.

Observa-se que para o sistema em sequeiro, as variáveis de macroporosidade e Ds; como também macroporosidade, mesoporosidade e Ksat para o sistema em irrigado (Tabela 3), estas apresentaram efeito aleatório ou efeito pepita puro, sendo que nestas condições a distribuição espacial não pode ser explicada, sendo necessário haver extensão da área amostral ou aumentar a quantidade de pontos amostrais (OLIVEIRA et al., 2015a).

O modelo exponencial predominou nos sistemas estudados, sendo que tais modelos explicaram uma mudança mais abrupta da variabilidade dos atributos do solo. Por outro lado, o modelo esférico evidenciou que existe uma mudança mais suave e uma transeção entre os valores estimados de variabilidade.

O alcance é um parâmetro fundamental na análise geoestatística, pois expressa a dependência espacial ou distância em que uma variável pode apresentar o mesmo efeito. Para o sistema em sequeiro identificou-se que apenas o DMG e umidade apresentaram valores superiores ao estabelecido pela malha amostral 62,1 m e 66,1 m respectivamente, caracterizando assim a maior continuidade na distribuição espacial destas propriedades (Tabela 3 e Figura 3).

No sistema irrigado (Tabela 3 e Figura 4) as variáveis apresentaram valores de alcance menores que o estabelecido pela malha amostral, com variações entre 19,23 m à 51,6 m. No tocante geral, considerando os valores médios de alcance, observam-se menores valores para o sistema irrigado, sendo que, apesar de ter havido pouca variação quando comparado os valores médios das variáveis físicas, a análise geoestatística, a partir do alcance de dependência espacial, indicou esta área mais homogênea e que o manejo da irrigação foi fundamental para tal ocorrência, fato este que não foi constatado no manejo em sequeiro, com alcance mais elevado e CV sempre superior, demonstrando a maior variabilidade amostral.

A dependência espacial (DE), expressa pela razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0 + C_1) (CAMBARDELLA et al., 1994), foi classificada como baixa para quase todas as variáveis estudadas nos sistemas irrigado e de sequeiro, exceto para a mesoporosidade, umidade e DMG, no sistema em sequeiro; e umidade e Ds, no sistema irrigado, que apresentaram moderada variabilidade.

Conforme destacam CAMBARDELLA et al. (1994), as variáveis que apresentam estrutura com forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, como os fatores de formação do solo; enquanto a dependência espacial moderada e fraca possivelmente seriam em virtude da homogeneização do solo. Os resultados obtidos corroboram os apresentados por TAVARES et al. (2012); RESENDE et al. (2014); ARAÚJO et al. (2014); OLIVEIRA et al. (2015ab), que encontraram DE variando entre moderada a fraca para propriedades físico-hídricas do solo, assim como as avaliadas no presente estudo.

Densidade amostral

Avaliando os valores de densidade amostral (Tabela 4), com base nos parâmetros de alcance dos semivariogramas, verificou-se que o padrão mínimo de amostragem variou conforme os sistemas estudados, sendo que no sistema sob sequeiro a amostragem mínima necessária foi de 2 à 15 pontos ha^{-1}, enquanto que no sistema sob irrigação foi de 4 à 11 pontos ha^{-1}.

Tabela 4. Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na Zona da Mata de Pernambuco

Variáveis	Sistema de Sequeiro		Sistema de Irrigado	
	Dens. Amostral	Esp.	Dens. Amostral	Esp.
	Pontos ha^{-1}	m	Pontos ha^{-1}	m
Ma	-	-	-	-
Me	8	34,8	-	-
Mi	8	35,1	11	29,56
PT	9	31,8	10	19,23
UG	2	66,1	5	44,08
RP	6	39	11	29,7
Ds	-	-	4	51,6
Ksat	15	25,5	-	-
DMG	2	62,1	10	30,49
DMP	14	26,78	10	31,3

Esp = Espaçamento; Ma = macroporosidade; Me = mesoporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; UG = umidade gravimétrica; RP = resistência do solo a penetração; Ds = densidade do solo; Ksat = condutividade hidráulica saturada; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado.

Observa-se que a Ksat no sistema sob sequeiro foi a variável física que apresentou a maior densidade amostral. Este comportamento é de se esperar, pois a Ksat apresenta alta variabilidade tanto no sentido horizontal quanto no vertical do perfil, sendo necessária uma grande quantidade de amostras para se tornar representativo os resultados obtidos e assim caracterizar a sua variabilidade (GONÇALVES & LIBARDI, 2013).

Em função do alcance de dependência espacial, o sistema em sequeiro apresentou sempre amostragem mínima inferior quando comparado ao sistema irrigado. O efeito da irrigação foi um fator que levou a uma maior continuidade espacial das variáveis físicas, onde esta faixa continua levou a uma amostragem sempre superior. Este fator não indica a heterogeneidade da área em estudo, mas somente que as variáveis no espaço têm uma interferência quando fatores extrínsecos são exercidos no meio.

Pode-se destacar que as técnicas de densidade amostral exercem papel fundamental no planejamento experimental e são úteis como ferramenta nos programas de agricultura de precisão, uma vez que o número de amostras a serem coletadas está diretamente relacionado ao custo, além de definirem com base no alcance de distribuição espacial o número real de pontos para que se tornem representativos de um ambiente em estudo.

Krigagem – Modelos digitais de elevação

A krigagem é a superfície interpolada de cada variável, que mostra sua distribuição espacial. A partir dela é possível identificar a localização e a abrangência dos valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente (GUIMARÃES et al., 2016).

Os padrões espaciais dos atributos estudados obtidos por meio da krigagem ordinária são apresentados nas Figuras 5 e 6. Quando se compara o padrão espacial do sistema irrigado (Figura 5) e sequeiro (Figura 6), nota-se que a área com irrigação apresenta faixas descontínuas ao longo da área amostral para algumas variáveis como microporosidade, porosidade total e umidade. Esse fato é observado em razão do menor espaçamento entre as classes de variabilidade da área de estudo, ao contrário da área sob sequeiro que apresentou faixas contínuas referentes as variáveis físicas. RESENDE et al. (2014) estudando atributos de solos coesos do Leste do Maranhão também encontraram padrão similar ao do presente estudo para as variáveis físicas de porosidade total e umidade.

Um dos critérios que podem ser levantados em função do padrão de distribuição espacial dos atributos físicos do solo na área sob irrigação serem descontínuos, pode ser de que o efeito da irrigação formou diferentes áreas dentro do ambiente amostral, e este fator levou a um padrão espacial heterogêneo, indicando assim que espacialmente o efeito da irrigação deve ser uma prática que deve ser monitorada, principalmente se for em áreas que apresentem topografia em forma côncava, pois esta forma de relevo influencia diretamente nestas variáveis físicas, principalmente a partir do depósito de sedimentos mais finos em regiões de baixada, causando assim modificações intensas nestas variáveis (MONTANARI et al., 2005).

Nos sistemas irrigado e sequeiro (Figuras 5 e 6), percebe-se nitidamente a relação existente entre umidade e a RP, sendo que ocorre coincidência entre os valores elevados de RP com os pontos de menor concentração de umidade, corroborando ARAÚJO et al. (2014). De acordo com GUEDES FILHO (2009), a resistência mecânica à penetração é mais afetada pela umidade do solo no momento da amostragem, do que pela densidade do solo.

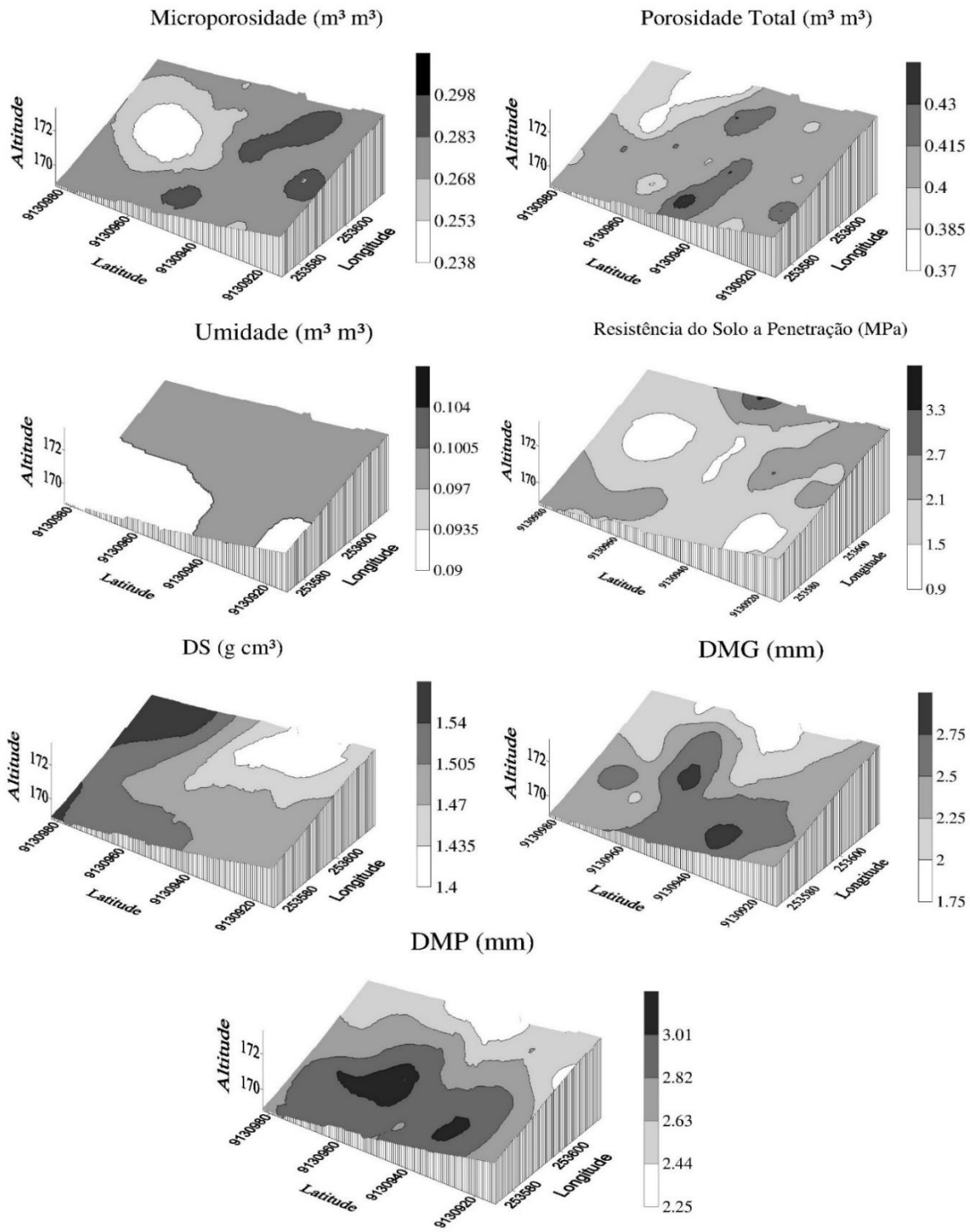


Figura 5. Mapas de Krigagem de atributos físicos em área de cana-de-açúcar sob manejo em sistema de irrigado na área de estudo.

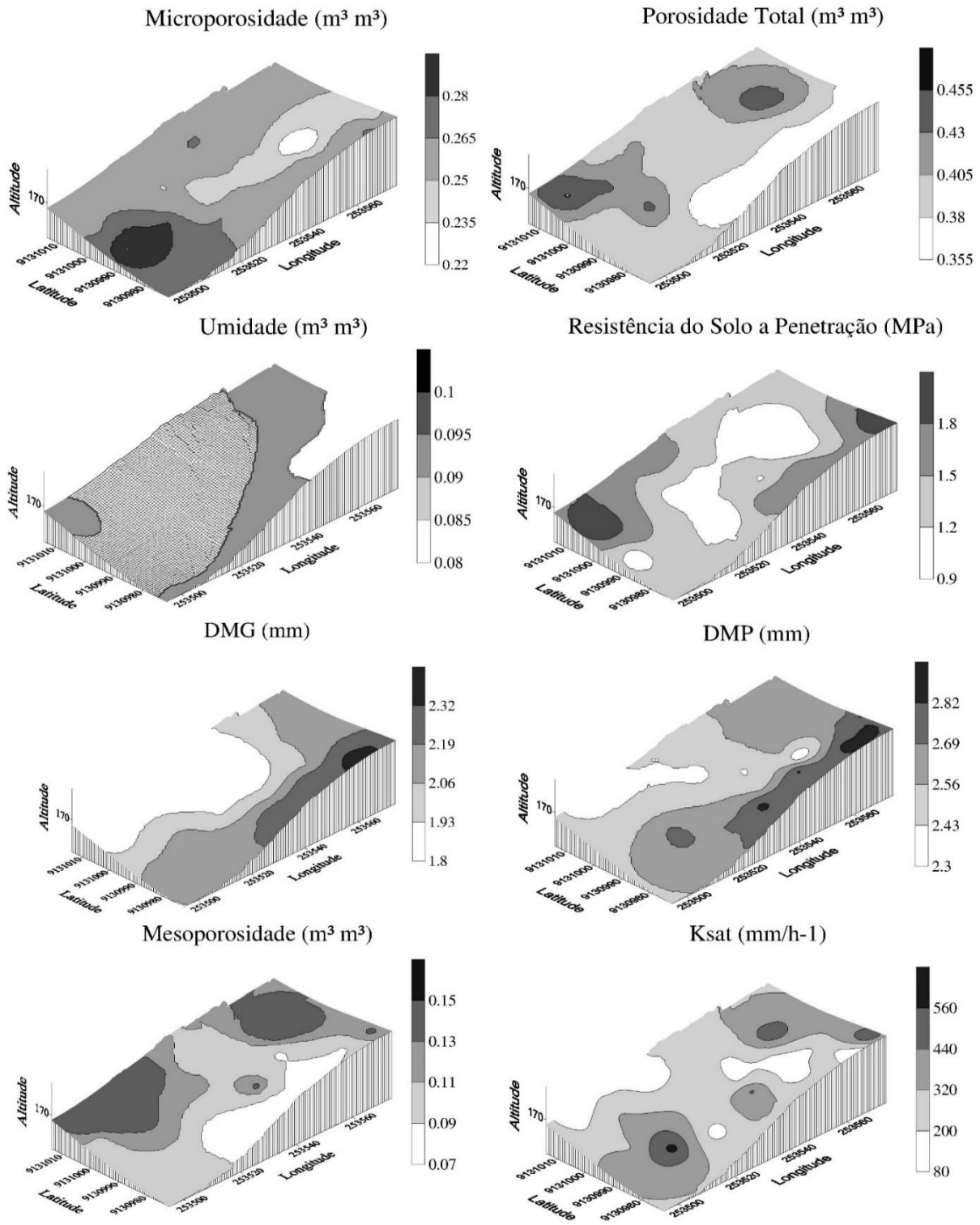


Figura 6. Mapas de Krigagem de atributos físicos em área de cana-de-açúcar sob manejo em sistema de sequeiro na área de estudo.

Com relação a Ksat, assim como discutido anteriormente, seus valores no sistema em sequeiro (Figura 6) apresentam-se muito heterogêneo, em função da alta condição de variabilidade desta variável física. O efeito inverso entre PT e Ds também pode ser observado no sistema sob sequeiro, pois nas localidades que ocorrem a menor Ds simultaneamente ocorrem os valores mais elevados de PT.

Análise de componentes principais - ACP

A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica de reconhecimento de padrões e não uma técnica de classificação, ilustrando apenas a relação entre as variáveis no gráfico, mas não dirá em absoluto como classificá-los (LYRA et al., 2010).

Com o critério de avaliar a interação dos atributos físicos com os sistemas irrigado e de sequeiro, foi usado a ACP (Figura 7 e Tabela 4).

Tabela 4. Cargas fatoriais da ACP para atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco

Variáveis	Sistema de Sequeiro		Sistema de Irrigado	
	CP1	CP2	CP1	CP2
PT	0,106	0,000	0,784	0,064
Ma	0,015	0,045	0,876	0,021
Me	0,036	0,003	0,921	0,022
Mi	0,667	0,012	0,201	0,012
DS	0,075	0,022	0,803	0,011
RP	0,378	0,100	0,004	0,319
DMG	0,185	0,004	0,245	0,542
DMP	0,124	0,022	0,217	0,598
Ksat	0,033	0,005	0,845	0,089
U	0,100	0,669	0,016	0,202
Autovalor (%)	1,71	0,88	4,91	1,87
Variabilidade (%)	17,18	8,82	49,12	18,79

CP1 = Componente principal 1; CP 2 = Componente principal 2; Ma = macroporosidade; Me = mesoporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; U = umidade; RP = resistência do solo a penetração; Ds = densidade do solo; Ksat = condutividade hidráulica saturada; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado.

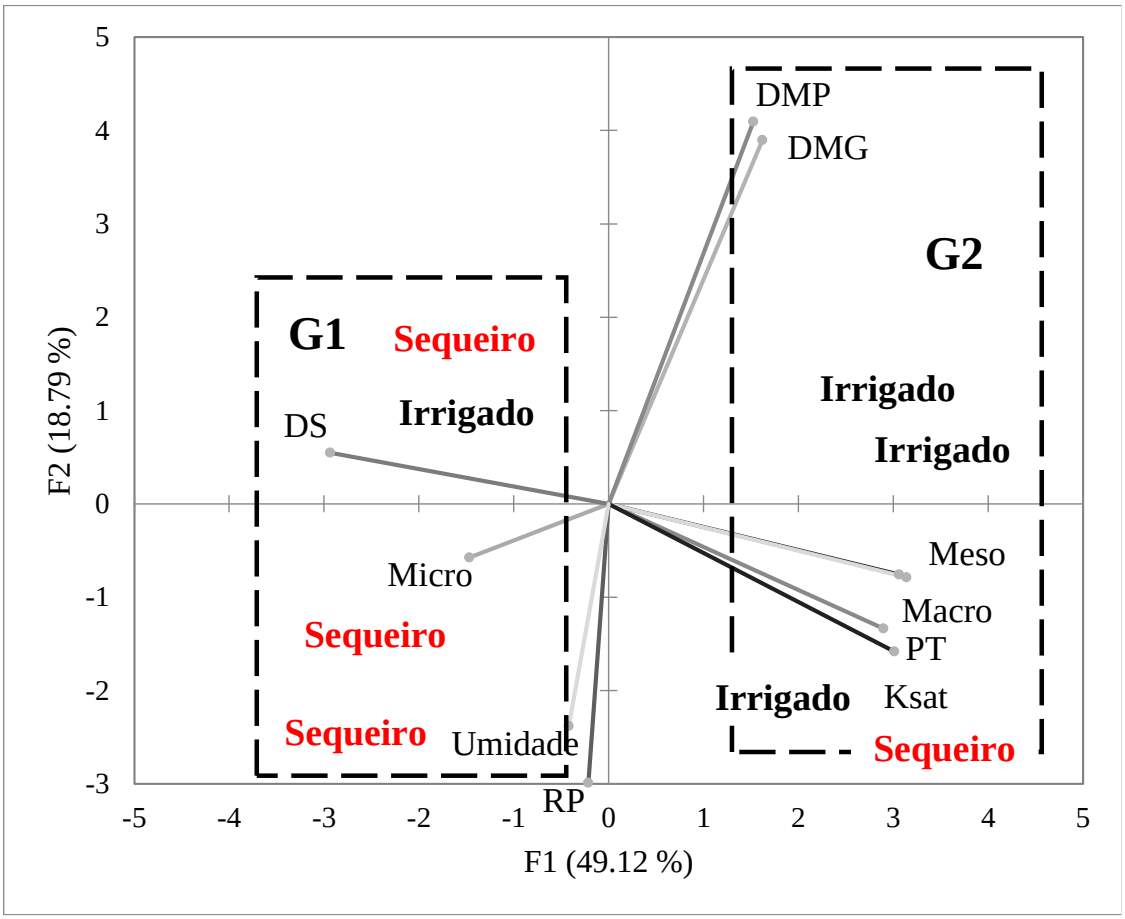


Figura 7. Análise de Componentes Principais (ACP) de atributos físicos em área de cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco. Macro = macroporosidade; Meso = mesoporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; U = umidade gravimétrica; RP = resistência do solo à penetração de raízes; Ds = densidade do solo; Ksat = condutividade hidráulica saturada; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado.

A ACP confirmou os resultados médios apresentados para a caracterização física das áreas estudadas (Tabela 2). Os resultados da ACP dispostos na (Figura 7), apresentam os dois primeiros componentes principais (CP), fator 1 e 2, explicando 67,91% da variância total dos atributos dos solos, sendo que o percentual da variância explicada para CP1 se mostrou igual a 49,12%, enquanto a CP2 foi responsável por 18,79%.

A partir das cargas fatoriais dos atributos físicos sob os sistemas irrigado e de sequeiro (Tabela 4), podemos observar que o sistema sob irrigação apresentou as maiores cargas fatoriais principalmente na CP1, em que a macroporosidade e mesoporosidade representaram 0,876 e 0,921. Este fator é um indicio de que em solos submetidos a sistemas de irrigação, estas variáveis físicas apresentam maior representatividade na variabilidade dos dados.

Além do percentual da variância explicada, pode-se notar a existência de dois grupos de variáveis distintos, que apresentam correlações com diferentes variáveis, tendo como exemplo a formação do grupo 1 (G1) e grupo 2 (G2), onde é possível observar a semelhança entre variáveis físicas e os sistemas estudados. Essas diferenças de agrupamento resultam, portanto, das diferenças observadas nos atributos, possibilitando uma análise mais generalizada da qualidade das áreas estudadas e possíveis dissimilaridades existentes entre os efeitos nas práticas de cultivo.

Nota-se que é possível identificar a maior relação entre a Ds, microporosidade e umidade no qual englobam o G1 e apresentam maior relação com a área sob sistema de sequeiro. O G2 apresenta relação direta com DMP, DMG, mesoporosidade, macroporosidade, PT e Ksat, no qual a maior relação destas variáveis está direcionadas ao manejo sob sistema irrigado.

Diante destas condições nota-se que as variáveis físicas ligadas a estruturação dos solos, e posteriormente que expressam a qualidade física dos solos, estão relacionadas ao manejo sob irrigação, sendo que, a ACP consegue captar a relação que existe entre os padrões espaciais, e com base em sua variância distribui esta relação, conferindo assim que o efeito da irrigação afetou estas variáveis positivamente.

Esse tipo de análise é de grande fundamento para a ciência do solo, e mais específico à física do solo, pois pode eleger as variáveis mais significativas nos

processos exercidos pelo manejo (THEOCHAROPOULOS et al., 1997; OLIVEIRA et al., 2015b). Assim, os atributos do solo analisados com a ACP são agrupados de acordo com suas semelhanças, nas áreas estudadas, que, por sua vez, são separadas por critérios de dissimilaridade, o que levará à formação de grupos.

A partir da Tabela 5 são apresentados os valores da matriz de correlação de Pearson, sumarizada para os sistemas irrigado e de sequeiro conjuntamente. Primeiramente é possível identificar o efeito de relação inversa e altamente significativa entre PT x Ds (-0,938*), sendo uma condição característica, em função de que a medida que ocorre aumento na Ds o efeito de redução da PT é acentuado, indicando assim que para as condições do presente estudo para a classe de Argissolo Distrocoeso a Ds é um fator que contribui significativamente para esta condição.

Tabela 5. Matriz de correlação de Pearson para atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco

Variáveis	PT	Ma	Me	Mi	Ds	RP	DMG	DMP	Ksat	Umidade
PT		0.847*	0.814*	-0.034	-0.938*	0.205	0.358	0.304	0.800*	0.064
Ma	0.847*		0.909*	-0.487	-0.776*	-0.159	0.299	0.307	0.904*	0.060
Me	0.814*	0.909*		-0.589	-0.824*	-0.053	0.286	0.270	0.968*	-0.148
Mi	-0.034	-0.487	-0.589		0.093	0.487	-0.003	-0.072	-0.569	0.242
Ds	-0.938*	-0.776*	-0.824*	0.093		-0.114	-0.464	-0.356	-0.778*	0.108
RP	0.205	-0.159	-0.053	0.487	-0.114		-0.148	-0.219	0.091	0.234
DMG	0.358	0.299	0.286	-0.003	-0.464	-0.148		0.973*	0.175	-0.192
DMP	0.304	0.307	0.270	-0.072	-0.356	-0.219	0.973*		0.150	-0.167
Ksat	0.800*	0.904*	0.968*	-0.569	-0.778*	0.091	0.175	0.150		-0.084
Umidade	0.064	0.060	-0.148	0.242	0.108	0.234	-0.192	-0.167	-0.084	

Ma = macroporosidade; Me = mesoporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; U = umidade; RP = resistência do solo a penetração; Ds = densidade do solo; Ksat = condutividade hidráulica saturada; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado.

O mesmo comportamento ocorre para os mesoporos (-0,824*), sendo estes poros estruturais altamente influenciados pela Ds. A respeito disto, ASSIS et al. (2015) também encontraram comportamento semelhante para estas variáveis, indicando assim a importância do sistema poroso na contribuição da maior ou menor densidade do solo. A Ksat também foi influenciada pela Ds (-0,778*) sendo altamente significativa e proporcionalmente inversa, assim também quando correlacionada Ksat x Ma (0,904*).

A parir destas condições de correlação conjunta, pode se entender que a Ds é a variável física que se encontra atuante sobre todos os processos que ocorrem nas condições atuais nos manejos exercidos nos sistemas irrigado e de sequeiro. Os resultados corroboram os de MONTANARI et al., (2013); ASSIS et al., (2015), que também encontraram efeitos acentuado da Ds exercidos sobre as demais variáveis físicas do solo, no qual nestas condições as variações exercidas pela Ds alteram proporcionalmente as propriedades físicas mais sensíveis a estas mudanças, como a condutividade hidráulica e porosidade que estão sujeitas e correlacionadas inversamente.

Por se tratar da condição de um solo coeso, mas com um grau não muito acentuado na camada superficial, percebe-se que a relação da Ksat comparada com a Ds, PT e Ma, respectivamente, apresenta correlação negativa para a primeira e positiva para as demais. BEUTLER et al. (2003) encontraram resultados semelhantes, demonstrando assim que a Ksat é uma variável física sensível aos efeitos exercidos pelos manejos e posterior condições naturais do solo.

CONCLUSÕES

A abordagem geoestatística associada às técnicas multivariadas de ACP, possibilitaram compreender a relação do padrão de distribuição espacial exercidas pelos manejos irrigado e de sequeiro sobre as propriedades físicas do solos, caracterizando que o efeito da irrigação favoreceu a maior relação com variáveis que estão interligadas com os padrões estruturais e de qualidade do solo.

A variação em ambos os manejos aplicados, principalmente quando considerada a umidade do solo, deve ser tomada em consideração para uma gestão eficaz na agricultura de precisão, por meio da utilização de sensores remotos que indiquem faixas de umidade abaixo da capacidade de campo.

As técnicas de densidade amostral se fazem eficaz em uma gestão de monitoramento de atributos físicos, com o critério de manter a qualidade física dos solos, promovendo assim uma elevada produção. Em uma região que praticamente não existem estudo desta magnitude, a aplicação de tais técnicas podem subsidiar o manejo preciso de áreas agrícolas, principalmente na região da Zona da Mata Pernambucana.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements** [internet]. Rome: FAO; 1998.

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, D. M. P.; SOUZA, Z. M.; CUNHA, J. M.; RODRIGUES, M. D. Physical and geospatial attributes of inceptisols and ultisols under native vegetation in Humaitá, AM, Brazil. **Bioscience Journal**. v. 32, p. 422-430, 2016.

AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**. v. 262, p. 35-44, 2016.

ARAÚJO, D. R.; MION, R. L.; SOMBRA, W. A.; ANDRADE, R. R.; AMORIM, M. Q. Variabilidade espacial de atributos físicos em solo submetido a diferentes tipos de uso e manejo. **Revista Caatinga**. v. 27, p. 101-115, 2014.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 28, p. 337-345, 2004.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 19, p. 309-316, 2015.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant Soil**. v. 142, p. 297-305, 1992.

BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 63-70, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z.M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**. v. 8, p. 242-249, 2003

BUTTAFUOCO, G.; CASTRIGNANO, A.; CUCCI, G.; LACOLLA, G.; LUCÀ, F. Geostatistical modelling of within-field soil and yield variability for management zones delineation: a case study in a durum wheat field. **Precision Agriculture**. v. 18, p. 37-58, 2017.

CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo a penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 8, p. 305-310, 2013.

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. **Soil Science Society of American Journal**. v.58, p.1501-1508, 1994.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitório Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.27, p. 695-703, 2003.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; PAVINATO, P. S.; RODRIGUES, M.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**. v. 265, p. 27-38, 2016b.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**. v. 267, p. 156-168, 2016a.

CONAB — Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17**. v. 3, 65p, 2016.

CORRÊA, R. M.; FREIRE, M. B. G. S.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; PESSOA, L. G. M.; MIRANDA, M. A.; MELO, D. V. M. Atributos físicos de solos sob diferentes usos com irrigação no semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, p. 358-365, 2010.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley, 1991. 920p.

DANTAS NETO, J.; FIGUEIREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, p.283-288, 2006.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**.2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

FARIAS, H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, p. 356-362, 2008.

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de irrigado e sequeiro por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 15, p. 250-255, 2011.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, p. 1174 -1184, 2013.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. **Bulk density and linear extensibility**. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison, Soil Science of Society of America. p. 201-228, 2002.

GUEDES FILHO, O. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta**. 2009. 114f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2009.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JÚNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Ciência Agronômica**. v. 47, p. 247-255, 2016.

KANNO, T.; MACEDO, M. C.; EUCLIDES, V. P. B.; BONO, J. A.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; ROCHA, M. C.; BERETTA, L. G. R. Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian savanas. **Grassland Science**. v. 41, p. 9-14, 1999.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. 1986. **Aggregate stability and size distribution**. In: Klute, A. (Ed.). Methods of soil analysis. 2. ed. American Society of Agronomy, Madison, Part 1, p. 425-442.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos amarelos e Argissolos dos Tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E.; JACOMINE, P. K. T. Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 29, p. 33-40, 2005.

LYRA, W. S.; SILVA, E.C.; ARAÚJO, M.C.U.; FRAGOSO, W.D. Classificação periódica: Um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. **Química Nova**. v.33, p.1594-1597, 2010.

MION, R. L.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. L.; SILVA, S. F.; DUARTE, J. M. L.; SOUSA, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 33, p. 2057-2066, 2012.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 40, p. 69-77, 2005.

MONTANARI, R.; PELLIM, D. M. P.; SILVA JÚNIOR, C. A.; CARVALHO, M. P.; GIOIA, M. T.; DALCHIAVON, F. C.; GONZÁLEZ, A. P. Correlação entre produção

de feijão e atributos físicos de um Latossolo em Mato Grosso do Sul. **Revista Ceres**. v. 60, p. 772-784, 2013.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGI, B. J. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**. v. 200 - 201, p. 77-84, 2013.

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; LIRA JÚNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, p. 951-960, 2010.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**. v. 45, p. 1-12, 2015b.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, p. 1103-112, 2013.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. 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, p. 668-681, 2015a.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**. v. 117, p. 201-210, 2011.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Saeafs, 1996. 446p.

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

REYNOLDS, W. D. & ELRICK, D. E. Constant head well permeameter (vadose zone). In: J. h. Dane & G. C. Topp, Eds, Methods of soil analysis, part 4, physical methods, p. 844-858. **Soil Science Society of America**, Inc., Wisconsin, 2002.

ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences (version 5.1 for windows).**Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.

ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; RAMOS, M. L. G.; OLIVEIRA, A. S.; BARTHOLO, G. F. Qualidade físico-hídrica de um Latossolo sob irrigação e braquiária em lavoura de café no cerrado. **Coffee Science**. v. 9, p. 516-526, 2014.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, C. A.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p. 11-21, 2008.

SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um argissolo da região do sub médio São Francisco: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 24, p. 875-884, 2000.

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; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. DE. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Embrapa, 2013. 353p.

SERRANO. J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial variability and temporal stability of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture. **Precision Agriculture**. v. 36, p. 1-19, 2016.

SILVA, E. J.; SILVA, P. C. C.; AMORIM, F. F.; BRITO, R. B. F.; PAMPONET, B. M.; REZENDE, J. O. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo distrófico coeso e crescimento radicular de Brachiaria decumbens submetido à subsolagem e fertilização. **Comunicata Scientiae**. v.6, p.385-395, 2015.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p. 597-608, 2015.

SILVA, L. F. S. **Atributos físicos e micromorfológicos da estrutura de um Latossolo vermelho distroférrico típico submetido ao manejo agrícola**. 2011. 214f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, p. 15-22, 2010.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; 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**. v. 34, p. 659-667, 2010.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. & BARBIERI, D. M. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. **Scientia Agrícola**. v. 63, p. 161-168, 2006.

STATSOFT. **STATISTICA 7.0**.Tulsa: StatSoft, 2004.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A.A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, p. 1207-1214, 2012.

THEOCHAROPOULOS, S. P.; PETRAKIS, P. V.; TRIKATSOULA, A. Multivariate analysis of soil grid data as a soil classification and mapping tool: the case study of a homogeneous plain in Vagia, Viotia, Greece. **Geoderma**. v. 77, p. 63-79, 1997.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. & LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 22, p. 573-581, 1998.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geoestatistics to spatial studies of soil proprieties. **Advances in Agronomy**. v. 38, p.45-94, 1985.

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

ZUFFO, V. J.; F. R. PIRES; R. BONOMO, E. L. VITÓRIA, A. F. CELIN AND E. O. J. SANTOS. Effects of tillage systems on physical properties of a cohesive yellow argisol in the northern state of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, p.1372-1382, 2013.

Capitulo II – Propriedades estruturais de solos cultivados com cana-de-açúcar sob manejos na Zona da Mata de Pernambuco

RESUMO

A estrutura do solo representa um dos principais indicadores das variações exercidas por diferentes práticas de preparo do solo. A retenção de água, o movimento, o desenvolvimento radicular, a difusão de oxigênio estão relacionados com o sistema poroso do solo (SPS), e comandam as condições relacionadas as diversas condições da biota do solo. Estudos sobre a influência de sistemas de preparo no solo, avaliando sua estrutura são importantes para o estudo do seu impacto na qualidade do solo. Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho foi explorar o uso de ferramentas tradicionais e alternativas para caracterizar as mudanças no sistema poroso do solo, causadas por sistemas de preparo associados às práticas de irrigação e de sequeiro, na camada superficial. Assim, foi avaliada a profundidade de 0,0-0,1 m e coletadas 32 amostras por sistema de manejo associados às práticas de preparo do solo em plantio direto e convencional. Dados da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) e da distribuição do tamanho de poros (ferramentas tradicionais) foram usados como parâmetros de avaliação. A tomografia computadorizada (µTC) foi utilizada como técnica alternativa, que possibilitou a distinção do número, volume e forma de macroporos, além da reconstrução de volume de poros em 3D. A distribuição de poros a partir da CCRAS modificada pela função spline cubic possibilitou identificar variações a partir dos manejos estudados e particularidades especificas entre os sistemas irrigado e de sequeiro, a partir das varrições bimodais e trimodais dos poros. O método da µTC de raios-X apresentou-se como ferramenta valiosa para quantificação rápida e de alto rendimento na caracterização da porosidade dos solos, além também de fornecer parâmetros de diagnose visual a partir de imagens tridimensionais.

Palavras-chave: tomografia computadorizada; CCRAS; porosidade; plantio direto.

ABSTRACT

The soil structure represents one of the main indicators of the variations exerted by different soil preparation practices. Water retention, movement, root development, oxygen diffusion are related to the porous soil system (PSP), and control the conditions related to the various conditions of the soil biota. Studies on the influence of soil preparation systems, evaluating their structure, are important for the study of their impact on soil quality. In this sense, the general objective of this work was to explore the use of traditional and alternative tools to characterize the changes in the porous system of the soil, caused by systems of preparation associated to irrigation and rainfed practices, in the superficial layer. Thus, the depth of 0.0-0.1 m was evaluated and 32 samples were collected per management system associated to the tillage practices in no-tillage and conventional tillage. Soil water retention curve (SWRC) and pore size distribution (traditional tools) were used as evaluation parameters. Computed tomography (CT) was used as an alternative technique, which allowed for the differentiation of the number, volume and shape of macropores, as well as 3D pore volume reconstruction. The pore distribution from the CCRAS modified by the spline cubic function allowed to identify variations from the studied maneuvers and specific peculiarities between the irrigated and rainfed systems, from the bimodal and trimodal pore variations. The μCT method of X-rays presented as a valuable tool for fast and high-throughput quantification in soil porosity characterization, as well as providing visual diagnostic parameters from three-dimensional images.

Keywords: computed tomography; CCRAS; porosity; No tillage; Soil structure.

INTRODUÇÃO

Atualmente não existem desafios modernos para a humanidade que não estejam direta ou indiretamente relacionados aos solos ou aos diferentes processos que envolvem os fenômenos relacionados a práticas de gestão. O reconhecimento da importância primordial dos solos foi recentemente sintetizado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), fazendo com que 2015 fosse referenciado como o Ano Internacional dos Solos.

As características de distribuição do sistema poroso são importantes indicadores de qualidade do solo, destacando o volume total, distribuição de tamanho e forma dos espaços porosos. Estes determinam muitos processos do solo e funções, como o armazenamento de água e sua transmissão, difusão de oxigênio, atividade microbiana e resistência mecânica do solo à penetração das raízes, além também de se evitar problemas ambientais, como os processos erosivos (KODESOVÁ et al., 2011; MUNKHOLM et al., 2012; MUNKHOLM et al., 2013; PIRES et al., 2017). Pesquisas atuais demonstram que as descrições da distribuição de tamanho de poros são muito úteis para a compreensão de uma série de processos que ocorrem no seu interior, como a estabilidade estrutural, movimento de água e de solutos, além do sequestro de carbono (LIPIEC et al., 2006; LIPIEC et al., 2012). Portanto, os estudos sobre as características dos poros do solo são extremamente úteis para avaliar a estrutura e qualidade do solo.

A distribuição do tamanho de poros associada ao estudo de sua continuidade espacial controlam aspectos como a retenção e infiltração de água (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). Poros de diferentes tamanho representam funções distintas dentro do sistema solo. Poros com diâmetro cilíndrico > 50 µm são classificados como poros de transmissão e aqueles < 50 µm como poros de ligação residual. Enquanto os primeiros

são responsáveis pelo movimento de ar e drenagem do excesso de água, estes últimos proporcionam retenção e difusão de íons em soluções. Poros com tamanho intermediário entre 0,50 e 50 µm são responsáveis pela retenção da água capilar e posterior liberação (LAL & SHUKLA, 2004).

O uso da distribuição do tamanho de poros para inferir sobre as mudanças estruturais exercidas pelas diferentes práticas de cultivo, é um fenômeno que está se tornando comum no campo da ciência do solo (AMER et al., 2009; DAL FERRO et al., 2014).

No campo da ciência do solo, alguns métodos têm sido propostos com a finalidade de determinar a distribuição do tamanho de poros, dentre estes se destaca a porosimetria por intrusão de mercúrio. Este, é uma ferramenta útil para a quantificação da porosidade do solo em uma ampla gama de diâmetro de poro e em resposta ao preparo do solo e fertilização (CASSARO et al., 2011; DAL FERRO et al., 2012), tipos de uso da terra (HAJNOS et al., 2006; WAIRIU & LAL,2006), e compactação (LIPIEC et al., 2012).

Tradicionalmente, o método da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) tem sido amplamente utilizado em todo o mundo para caracterizar a distribuição de poros (AMER et al., 2009; STINGACIU et al., 2010; RAB et al., 2014). Este método envolve a medição em laboratório do conteúdo de água no solo retido a partir de diferentes potenciais matriciais de água no solo, inferindo na porosidade do solo, usando a relação entre o diâmetro dos poros e fluxo de líquido. No entanto, este método não proporciona uma distribuição dos poros maiores que 300 µm de diâmetro, nem a sua continuidade espacial no sistema poroso (Citação).

Avanços na aplicação da tomografia computadorizada (µTC) para avaliação distribuição de poros têm surgido como uma nova ferramenta de pesquisa para

investigar a distribuição espacial e diâmetros de poros, pois baseia-se na avaliação estrutural dos solos a partir de imagens 2D ou 3D (ANDERSON et al., 2010; VAZ et al., 2011; BORGES et al., 2012; MUNKHOLM et al., 2013).

A µTC é interessante porque é uma técnica não-invasiva que possibilita a caracterização dos poros em macro e microagregados (PAGENKEMPER et al., 2015). Entretanto devidos as limitações na resolução em escala de imagens, a técnica de tomografia computadorizada é uma ferramenta ainda limitada devido ao fato de caracterizar apenas poros de tamanho limite à macroporos.

Até certo ponto, os macroporos, denominados poros de transmissão, são de importante relevância nos critérios de avaliação da estrutura do solo e processos que ocorrem nesse meio poroso (RAB et al., 2014). Como finalidade de destaque, os macroporos apresentam características marcantes e direta na infiltração de água no solo, aeração, além de crescimento e difusão de oxigênio ao sistema radicular dos vegetais (JURY & HORTON, 2004).

A sua formação é influenciada pela: atividade de raízes, ciclos de umedecimento e secamento que ocasionam o fenômeno de histerese, ação biótica do solo e principalmente ações antrópicas as quais estão relacionadas aos tipos de manejo do solo e sistemas de cultivo (PIRES et al., 2008a).

Os sistemas de cultivo associados às diferentes práticas de preparo do solo, apresentam influência direta na distribuição do tamanho de poros, levando à modificações estruturas drásticas dependendo do planejamento e forma de preparo do solo (CHENKO et al., 2011).

PIRES et al. (2017), avaliando a qualidade estrutural de solos submetidos a diferentes sistemas de cultivo, observaram importantes alterações na estrutura de um Latossolo em sistema de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). Os autores

concluíram que maiores valores de porosidade para PD em relação ao PC, em todas as profundidades analisadas, é indicação dos danos causados na estrutura do solo pela maior perturbação em sistema de PC, principalmente para a camada superior (0-20 cm).

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho foi explorar o uso de ferramentas tradicionais e alternativas para caracterizar as mudanças no sistema poroso do solo, causadas por sistemas de preparo associados às práticas de irrigação e de sequeiro, na camada superficial.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do meio físico

O estudo foi realizado na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina - PE (7º51'13"S, 35º14'10"W), situado na região da Zona da Mata Pernambucana e caracterizada como a região de maior expressividade na produção de cana no estado.

O município de Carpina encontra-se inserido, geologicamente, na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos do Complexo Salgadinho, da Suíte Serra de Taquaritinga, do Complexo Vertentes e do Grupo Barreiras (CPRM, 2005). O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo Ams, tropical chuvoso de monção, com verão seco e altitude média de 180 m.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, de textura franco-argilo-arenosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (SANTOS et al., 2013) e um Haplohumult Hardsetting (SOIL SURVEY STAFF, 2014). Critérios adicionais de informações dos atributos físicos e

químicos antes da implantação do experimento são apresentados de acordo com DONAGEMA et al. (2011) (Tabela 1).

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo da área amostral antes da instalação do experimento

Variáveis	Valor/Teor/Classificação
pH (H_2O)	4,60
H+Al (cmolc dm^{-3})	4,40
Al[(1)] (cmolc dm^{-3})	0,50
H[(2)] (cmolc dm^{-3})	3,90
Ca[(1)] (cmolc dm^{-3})	1,30
Mg[(1)] (cmolc dm^{-3})	0,30
K[(3)] (cmolc dm^{-3})	0,10
Na[(3)] (cmolc dm^{-3})	0,03
CTC (cmolc dm^{-3})	6,13
V (%)	28,21
m (%)	22,44
Carbono orgânico total (%)	0,96
Matéria orgânica (%)	1,66
P[(3)] (mg dm^{-3})	9,00
Fe (mg dm^{-3})	92,60
Cu (mg dm^{-3})	0,60
Zn (mg dm^{-3})	5,30
Mn (mg dm^{-3})	22,40
Areia Total (g kg^{-1})	656,50
Areia Fina (g kg^{-1})	168,20
Areia Grossa (g kg^{-1})	488,30
Silte (g kg^{-1})	91,00
Argila (g kg^{-1})	252,50
Classe textural	Franco-Argilo-Arenosa
Grau de Floculação (%)	11,85
Grau de Dispersão (%)	85,15
Densidade de partículas (Mg m^{-3})	2,61
Densidade do Solo (Mg m^{-3})	1,55
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,41
Macroporosidade (m^3 m^{-3})	0,14
Microporosidade (m^3 m^{-3})	0,27
Capacidade de Campo (m^3 m^{-3})	0,24
Ponto de Murcha Permanente (m^3 m^{-3})	0,17

[(1)] Extrator KCl 1 mol/L; [(2)] Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0. [(3)] Extrator Mehlich^{-1};CTC = Capacidade de Troca de Cátions; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio.

A área agrícola utilizada no ensaio foi implantada em sistema convencional de cultivo e em Plantio direto (neste sistema o maquinário agrícola passou uma vez para a abertura de sulcos), e foi preparada para implantação do experimento em junho de 2014.

O manejo para renovação do canavial consistiu na dessecação da socaria utilizando o herbicida Glyfosate® na dosagem de 4,0 L ha^{-1}. A correção do solo com calcário dolomitíco (PRNT 79,3 %, CaO 33,6 %, MgO 17,8 %) em superfície, realizada com a aplicação de 3,5 t/ha a lanço dois meses antes do plantio da cana-de-açúcar. A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases e realizada de modo à saturação de bases atingir 60%.

Após a abertura dos sulcos, o plantio foi realizado manualmente no mês de Agosto de 2014, utilizando-se rebolos de três gemas, distribuídos em sulcos com oito metros de comprimento, para que se atingisse uma densidade de plantio de 16 a 18 gemas por metro linear.

O cultivo da cana-de-açúcar sob sistema de irrigado, foi conduzido sob irrigação plena durante todo o período de instalação do experimento. Utilizaram-se aspersores com dois bocais (4,0 x 2,8 mm) e vazão nominal de 1,29 m^3 h^{-1} dispostos em campo num espaçamento de 12 x 12 m. Foram realizadas irrigações a cada dois dias, sendo a lâmina de irrigação calculada pelo somatório da evapotranspiração da cultura suprimindo-se eventuais precipitações no período.

A evapotranspiração da cultura foi calculada com base no produto do coeficiente da cultura pela evapotranspiração de referência, sendo esta obtida de maneira indireta por meio do Tanque Classe A de acordo com Allen et al. (1998). A lâmina total de irrigação foi de 786 mm, enquanto a precipitação foi de 1029 mm. Os dados da distribuição da precipitação, evapotranspiração e a lamina bruta total de irrigação encontram-se na (Figura 1).

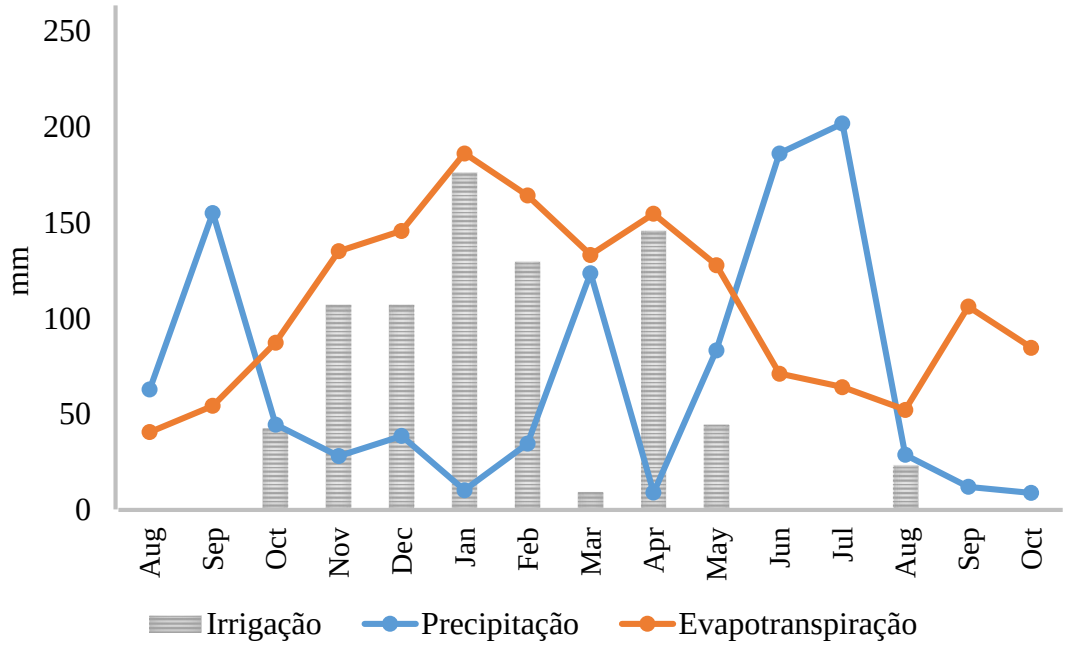


Figura 1. Distribuição de precipitação, irrigação e evapotranspiração durante o período de cultivo da cana planta.

Amostragem de solos

A amostragem dos solos foi realizada em janeiro de 2016. Em cada sistema de uso (irrigado e sequeiro) conforme apresentado na Figura 2, foram coletadas amostras nas entrelinhas de cultivo, usando um padrão de grid amostral com dimensões de 56 x 35 m (1960 m²), com espaçamento regular de 7 m entre os pontos, fornecendo um total de 32 pontos em cada área de estudo, totalizando 64 amostras.

Embora os sistemas radiculares de cana-de-açúcar podem chegar a camadas mais profundas do solo, limitamos a nossa avaliação a 0,1 m, pois a maioria das raízes estão concentrados nesta camada e esta é a zona onde alterações das propriedades físicas do solo são mais significativas e que são mais facilmente modificadas pelo uso da terra e práticas de gestão (BALL-COELHO et al., 1992 e KANNO et al., 1999).

Para avaliação da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) foram coletadas amostras de solos (n=32), em estrutura preservada, utilizando-se anéis

volumétricos fabricado em acrílico, com dimensões de 7,5 x 7,5 cm (altura e diâmetro), que foram usados nos ensaios físico-hídricos.

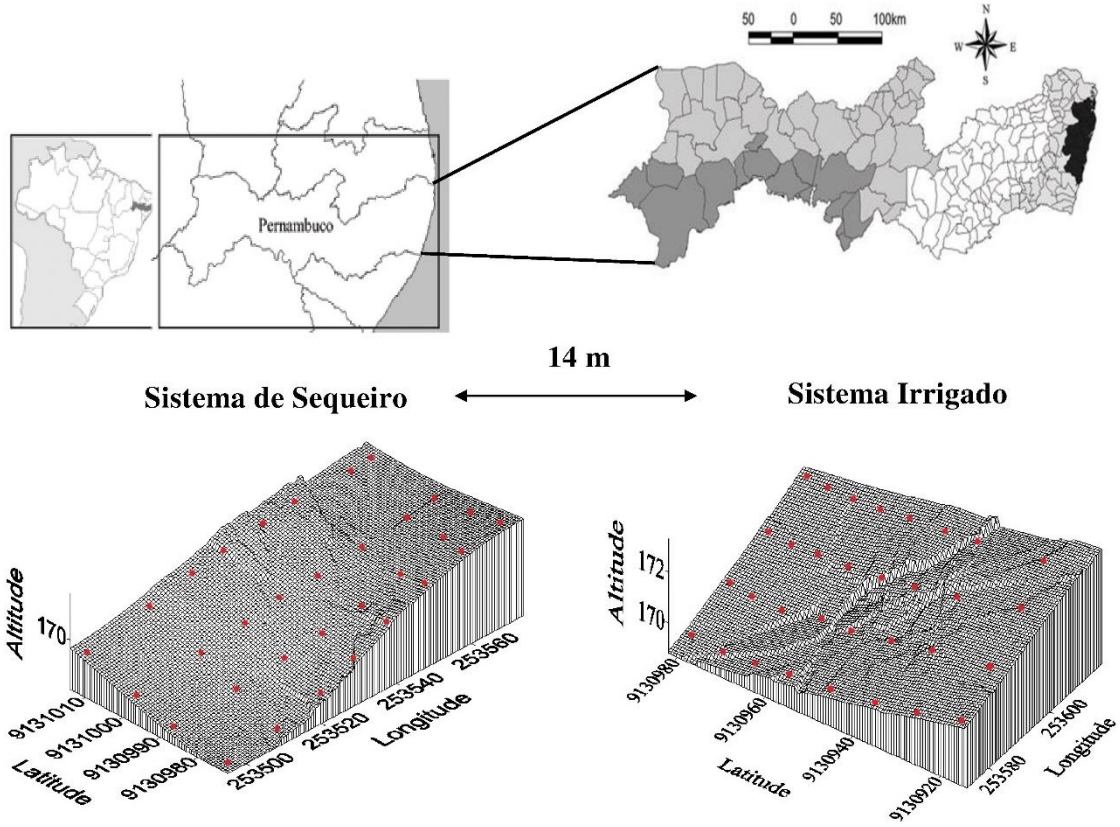


Figura 2. Localização da área experimental e modelo digital de elevação (MDE) em área de cana-de-açúcar sob manejo na Zona da Mata de Pernambuco.

A amostragem foi realizada pela inserção dos anéis com auxílio de amostrador tipo Uhland, mas por inserção motorizada (cuja patente está em fase final de depósito, não sendo possível fornecer maiores detalhes). Tal procedimento garante a menor perturbação da amostra dentro do anel, durante o processo de sua inserção ao solo.

O volume de solo excedente no cilindro foi removido cuidadosamente aparando as superfícies superior e inferior da amostra, com o propósito de deixá-las planas para se ter certeza de que o volume do solo estivesse igual ao volume interno do cilindro.

As amostras foram coletadas perto de seu limite de plasticidade, uma vez que o teor de água do solo é muito importante para minimizar os efeitos de impactos no momento da amostragem, adotando-se como critério o pré umedecimento e posterior coleta, depois de uma período de 6 horas cessada a drenagem de água.

Curva característica de retenção de água no solo (CCRAS)

A obtenção dos dados para construção da CCRAS foi realizada utilizando-se uma mesa de tensão, aplicando-se as seguintes tensões: 10; 30; 40; 50; 60 e 100 cm de coluna de água (cca). Para equilíbrio das tensões > 100 cca, neste caso, 800 cca, foi usada placas de cerâmica em câmara de Richards (Soil Moisture Equipament Comercial).

O procedimento para saturar as amostras consistiu na ascensão capilar, colocando-se as amostras em bandeja, forradas com espuma (2 cm de espessura), onde foi adicionada água desaerada, lenta e continuamente até que o nível de água atingisse 2/3 da altura do cilindro. Este procedimento foi realizado durante um período de 1 ou 2 dias para permitir a saturação completa do solo, evitando a presença de bolhas de ar aprisionadas nos poros, que pudesse comprometer a extração de água conforme as tensões aplicadas em mesa de tensão e câmara extratora de Richards.

Após o procedimento de saturação, as amostras de solo foram submetidas à tensões de coluna de água, conforme já comentado. Após o equilíbrio termodinâmico, o conteúdo de água volumétrico – θ (umidade volumétrica) foi obtido (HILLEL, 1998).

Para a construção da CCRAS, os demais θ, associados aos seus respectivos potenciais matriciais (Ψ) foram estimados de acordo com VAN GENUCHTEN (1980), utilizando o software “Retention curve” - RetC (VAN GENUCHTEN et al., 1991). Assim, obtemos os parâmetros empíricos de ajuste usando a equação (1):

$$\theta = \theta r + \frac{(\theta s - \theta r)}{[1 + (a\,.\,\Psi)n]m} \qquad (1)$$

em que: θ é a umidade volumétrica, cm^3cm^{-3}; θr é a umidade volumétrica residual do solo, cm^3cm^{-3}; θs é a umidade volumétrica saturada, cm^3cm^{-3}; Ψ é o potencial de água do solo; α é um parâmetro de escala inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros, cm^{-1}; N e m são parâmetros de forma da curva de retenção de água no solo; m = 1 - 1 / n, 0 < m < 1, de acordo com VAN GENUCHTEN (1980).

Modelo baseado na CCRAS – Função Spline Cubic

Para a caracterização da frequência de distribuição de poros por tamanho a partir da CCRAS, os dados de cada curva determinados experimentalmente θ (h) (umidade do solo em função do potencial mátrico) foram transformados em *S* (h) (primeira derivada a partir da CCRAS).

Uma função spline cubic resultou em uma curva suave S (LN h) (logaritmo neperiano do potencial mátrico aplicado) por meio dos dados experimentais (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). Supõe-se que θr (umidade residual de correção) é o teor de água das amostras de solo. Tendo uma curva suave S (LN h), a curva ∂S (ln (h)) / ∂ ln(h) foi calculada para a construção da curva de distribuição de poros baseada na função de capacidade de água (LIBARDI, 1995).

A curva idêntica à distribuição de tamanhos do poro foi determinada e convertida para o raio do poro (r) usando a relação r = 1490/ h, com r e h expressos em mm e cm, respectivamente (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994).

Após a conversão de d e h em r dados, dθ / d (LNh*)* versus r, esta função representará a equação para a caracterização da distribuição e equação matemática da correlação de poros a partir da CCRAS (KUTÍLEK et al., 2006).

Análise Tomográfica (µCT)

As amostras coletadas em anéis de acrílico e descritas anteriormente foram secas em estufa de circulação forçada, na temperatura de 40 °C, para minimizar interferências dos filmes de água na atenuação dos raios-X. Após o período de secagem as amostras foram escaneadas utilizando-se tomógrafo de raios X modelo Nikon XT-H 225 ST, pertencente ao Grupo de Pesquisa do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX), instalado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE).

Na pré-fase de escaneamento da amostra no processo de aquisição de dados foram utilizados como parâmetros a tensão de 150 kV, com uma corrente de 226 µA, tempo de exposição de 500 ms. A resolução espacial das imagens foi de 50 µm (50 x 50 µm²) e também foi utilizado um filtro de cobre com espessura 0,5 mm para minimizar os fótons de baixa energia e interferências externas.

O processo de reconstrução das imagens foi realizado em 3D utilizando o CTPro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV) em um subvolume de interesse de 800 x 800 x 800 voxels, com resolução de 50 µm (50 x 50 x 50 µm³). A partir do software VGStudio MAX 2.2 (Volume Graphics, Heidelberg, Alemanha), as imagens foram convertidas para a escala de Hounsfield, onde o ar apresenta o valor de 0 e a água o valor igual a 1000. Em seguida, aplicou-se o filtro de Gauss para reduzir o ruído nas imagens. Além disso, para minimizar o ruído relativo aos artefatos em imagens de µCT, estes foram submetidos a um tratamento usando um plugin de propósito especial ImageJ (HECK, 2009).

O processo de segmentação foi baseado a partir da geração de histogramas nas escalas de cinza de cada conjunto de imagens seguindo a metodologia descrita em

ELLIOT & HECK (2007); JEFFERIES et al. (2014). Tal processo resultou numa imagem binária, na qual poros e região sólida foram respectivamente representados por pixels brancos e negros (escala binária).

A resolução espacial para a reconstrução das imagens foi de 60 µm, onde apenas foram detectados poros com r > 30 µm, poros estes que compõem parte da macroporosidade do solo (Ma) (DREWRY et al., 2008). Para as imagens µCT, a Ma é dada pela equação (2):

$$\mathrm{Ma} = \frac{\mathrm{Vp}}{\mathrm{Vt}} \tag{2}$$

em que: Vp representa o volume de voxels vazios; Vt é o volume de amostra total (voids + voxels sólidos).

Com o critério de melhor caracterizar a frequência de distribuição do volume pertencente aos macroporos, as análises de distribuição de macroporos (MAP) classificaram tais poros em diferentes intervalos de volume: 0-0,001; 0,001-0,01; 0,01-1e >1 mm^3.

A forma dos poros foi obtida apenas em poros com volume de 0,002 - 32,4 mm^3 (8-15 x 10^4 voxels) conforme destacam JEFFERIES et al. (2014). Tal segregação é justificada devido ao arranjo de voxels não possibilitar medir o tamanho de eixos para dimensões ≤ 8 voxels de poros. Entretanto, os poros ≥ 15 x 10^4 voxels estão associados a domínios vazios e forma irregular. Os MAP com dimensões que permitiram a medição dos três eixos principais foram classificados de acordo BULLOCK et al. (1985). Assim, as formas dos poros foram classificadas como: Esferoidal (Es.); Canal (Ca.); Discóide (Di.) e Laminar (La.). Quando um dos eixos de um poro específico não podia ser determinado pelo software, este poro não era classificado de acordo com a sua forma; sendo nesse caso, denominado de poro não classificado (NC).

Análise estatística

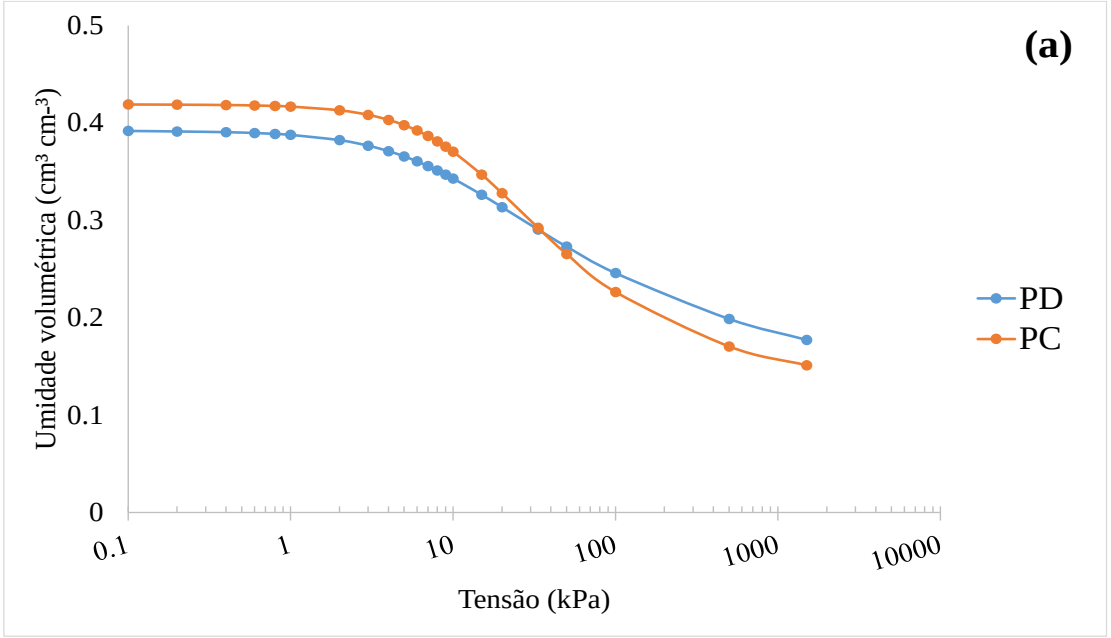
Todos os cálculos estatísticos foram realizados usando o software Statistica versão 7.0 (STATSOFT, 2004). Antes da análise, a homogeneidade das variâncias foi inspecionada utilizando o teste de homocedase de Levene e teste de Normalidade. Obtidos os pré-requisitos, os dados foram submetidos à ANOVA e quando significativos submetidos ao teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CCRAS e distribuição do tamanho de poros

Como foi descrito, a CCRAS e a derivada da CCRAS ajustada através da função spline cubic KUTÍLEK et al. (2006); LIPIEC et al. (2006) foram usadas para fornecer informações sobre as modificações que as diferentes práticas de gestão introduzidas influenciaram na estrutura do solo (Figuras 3 e 4).

Inicialmente fazendo um breve comparativo entre as práticas de cultivo em plantio direto e convencional associadas aos sistemas de sequeiro (Figura 3b) e irrigado (Figura 4b), observa-se que ambos os sistemas de cultivos demonstram características relacionadas ao domínio estrutural, fato este identificado pelos diferentes picos de inflexão nas curvas de distribuição de tamanho de poros.



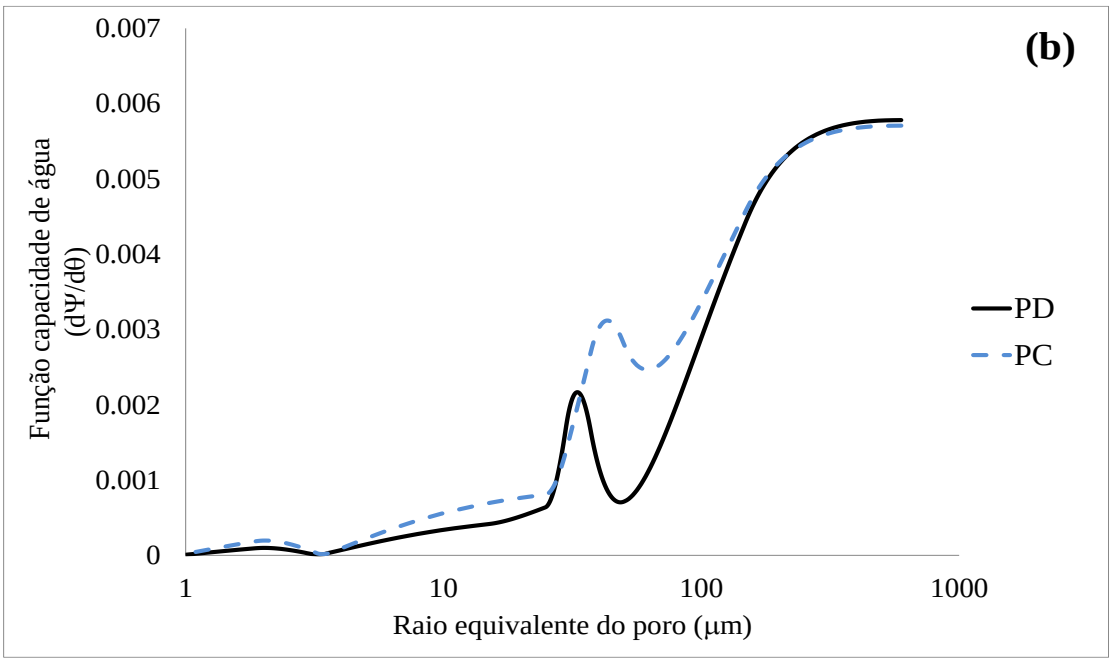


Figura 3. Distribuição do tamanho de poros em solo sob cultivo de cana-de-açúcar sob sequeiro: (a) curva característica de retenção de água no solo (CCRAS); (b) derivada da CCRS ajustada.

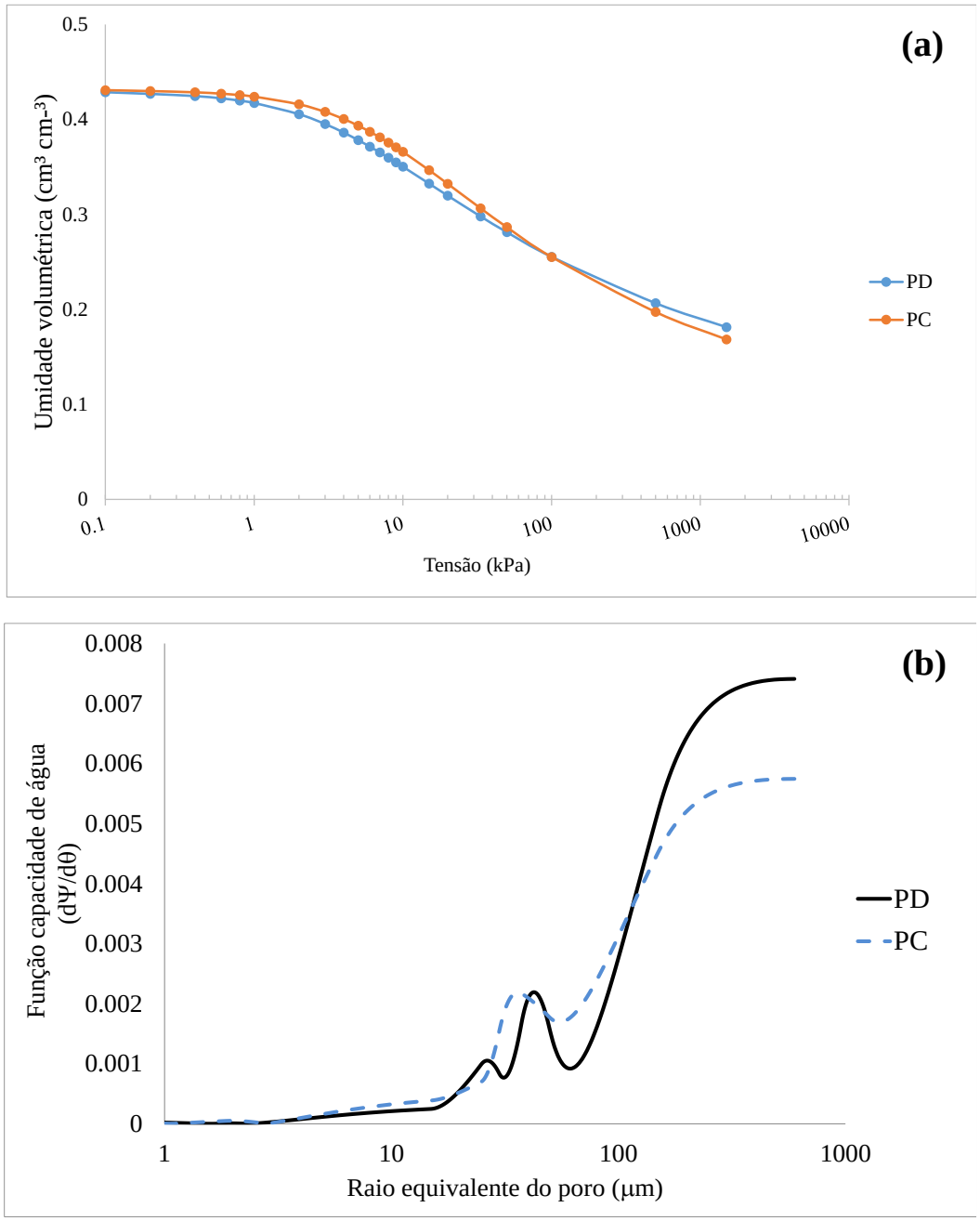


Figura 4. Distribuição do tamanho de poros em solo sob cultivo de cana-de-açúcar sob irrigação: (a) curva característica de retenção de água no solo (CCRAS); (b) derivada da CCRS ajustada.

As CCRAS para os sistemas de cultivo em sequeiro e irrigado, Figuras 3a e 4a respectivamente, indicam semelhanças em sua forma de distribuição, estando estas associadas em função das mesmas áreas de cultivo estarem sob domínio de um Argissolo Amarelo distrocoeso. Entretanto, observa-se que ocorrem maiores valores de porosidade total no sistema sob sequeiro, em que o PC foi superior ao PD (Figura 3a). Esse resultado foi induzido diretamente pela perturbação do solo, em que, a estrutura foi desagregada favorecendo um aumento da porosidade total nesta camada superficial, levando a uma maior pulverização da estruturação do solo e os agregados/torrões formados favoreceram assim um aumento no volume de macroporos, conforme a estabilização deste sistema com o tempo, como também observado em TAVARES FILHO & TESSIER, (2009); CASSARO et al. (2011); PIRES et al. (2017), que avaliaram a estruturação de solos induzidos à diferentes práticas de cultivo.

Avaliando a caracterização da distribuição de poros em Argissolo sob diferentes manejos IMHOFF et al. (2010) constataram que em sistemas sob PC, a rede de poros apresentou um maior número de poros grandes (macroporos), hidraulicamente ativos, que fazem com que os solos apresentem melhor dinâmica de água e gases e proporção similar de poros de armazenamento de água, em comparação com sistemas que não incluem preparo do solo (PD).

Com relação a isto, no sistema de cultivo sob irrigação (Figura 4a), ocorreu efeito similar aos observados por IMHOFF et al. (2010) nas CCRAS quando comparado o PC e PD. Nestes sistemas, o efeito da irrigação, durante toda a fase de cultivo, favoreceu a maior estabilidade do sistema estrutural dos solos e manutenção da porosidade, mesmo em nos locais em que não houve preparo do solo.

Conforme destacam MUNARETO et al. (2010); BEUTLER et al. (2012) o efeito da irrigação, em decorrência dos manejos aplicados, nem sempre afetaram

acentuadamente as propriedades estruturais dos solos. Entretanto o mesmos autores ainda afirmam que em ambientes sob cultivo em sequeiro, as práticas de preparo do solo são exigidas para que se ofereça condições iniciais de desenvolvimento ao sistema radicular das plantas.

Estes resultados combinados sugerem que o PC foi a prática de manejo que promoveu as maiores modificações nas características de retenção de água no solo, principalmente sob cultivo de sequeiro; enquanto que no cultivo sob irrigação, os resultados foram semelhantes. Particularmente, este comportamento observado no PC sob sistema de sequeiro, mostra que, apesar de haver uma maior porosidade, este sistema também está propício à uma maior perda de água na camada superficial, muito em função do maior volume de seus macroporos.

Estudos realizados por CASSARO et al. (2011); PORTELLA et al. (2012) sugerem que os solos sob sistemas de PD e sequeiro, sejam submetidos a estas condições por um período mais prolongado, para que ocorram efeitos mais acentuados nas propriedades estruturais do solo, de modo que a manutenção da palhada favoreça a maior umidade e consequentemente o aumento no volume de microporos associado a uma redução de macroporos.

Seguindo o procedimento descrito por KUTILEK et al. (2006), as curvas de distribuição do tamanho de poros foram calculadas e apresentadas nas Figuras 3b e 4b. Inicialmente, fazendo um breve comparativo entre as práticas de cultivo em plantio direto e convencional, associadas aos sistemas de sequeiro (Figura 3b) e irrigado (Figura 4b), observa-se que ambos os sistemas de cultivos demonstram características relacionadas ao domínio estrutural, fato este identificado pelos diferentes picos de inflexão nas curvas de distribuição de tamanho de poros.

Como as curvas ao longo de todos os poros investigados (Figuras 3b e 4b) nos manejos sob sistema de irrigação e em sequeiro sob PD e PC apresentam três e dois picos de inflexão, sendo consideradas trimodais e bimodais, respectivamente, pois apresentam domínio estrutural do solo, pelo fato de apresentarem diferentes características de tamanho de poros elementares.

Nota-se que no sistema de cultivo em sequeiro (Figura 3b) o domínio de poros variou na faixa de: 1 a 5 µm (primeiro pico), 5 a 50 µm (segundo pico) e 50 a 90 µm (terceiro pico). Neste caso específico, o primeiro pico, e parte do segundo pico até 25 µm, correspondem aos microporos do solo (< 25 µm); e o terceiro pico, aos macroporos do solo (> 25 µm), comportamento este observado em ambas as curvas de distribuição referentes ao PD e PC. A diferença marcante fica por conta da faixa de umidade calculada com base na função de capacidade de água (JURY et al., 1991; LIBARDI, 1995), em que houve maior índice na curva referente ao PC, no segundo pico de distribuição.

A maior variação de poros de tamanho superiores e volume de umidade como observados no PC sob sistema de sequeiro, indicam que nas condições atuais, por ser um solo distrocoeso, para o seu preparo se faz necessária práticas para que se obtenha sucesso na instalação do cultivo, pois quando comparado ao PD houve uma maior variação nestes índices, indicando assim que o efeito de preparo do solo favoreceu a uma melhor estruturação do solo na camada superficial. Este fato está relacionado a pulverização de microagregados e formação de macroagregados pelo desenvolvimento de torrões devido às práticas de preparo do solo.

Outra característica que pode ser levantada a respeito dos melhores resultados obtidos pelo PC no sistema sob sequeiro, é de que o PD oferece impedimento ao desenvolvimento radicular na camada de 0,08-0,15 m, gerando efeito denominado

“pé-de-plantio direto”, ou seja, nestas condições, o maior volume de poros com raio equivalente aos microporos influenciam tal comportamento da rede porosa do solo, conforme destacam REICHERT et al. (2007).

Os resultados obtidos corroboram os de CASSARO et al. (2011); OGUNWOLE et al. (2015), que encontram variação trimodal de poros e volume de macroporos próximos ao do presente estudo, na mesma camada (superficial), caracterizando assim, que variações trimodais de poros, indicam a uma tendência para solos com maior arranjo do sistema poroso. Estes autores, avaliando práticas de plantio direto e convencional do solo, sugerem que as práticas de gestão de preparo do solo modificam a sua estrutura, mas, quando se trata de plantio direto, este sistema requer um maior tempo para se obter resultados satisfatórios, já que os seus efeitos sobre a estruturação do solo são mais perceptíveis em longo prazo.

No sistema sob irrigação (Figura 4b), observa-se efeito inverso ao observado no sistema em sequeiro (Figura 3b), em que a maior variação na distribuição de poros referente ao domínio estrutural encontra-se no manejo sob PD. A faixa de distribuição do raio médio variou de 1 a 20 µm (primeiro pico), 20 a 50 µm (segundo pico), 50 a 80 µm (terceiro pico), estando estes resultados, superiores aos encontrados por PIRES et al. (2008b); PIRES et al. (2017) em condições de diferentes práticas de gestão de preparo do solo. Já para o PC, a distribuição apresentou comportamento bimodal, com raio equivalente entre 1 e 50 µm (primeiro pico) e > 50 µm (segundo pico).

Neste tipo de sistema percebe-se que o efeito da irrigação foi eficiente em manter a homogeneização do perfil na camada de 0,0-0,1 m, mesmo sem haver práticas de preparo do solo e muito em função do volume de água aplicado durante o cultivo. Desse modo, nesta pesquisa, o efeito das práticas de irrigação em solos sob PD contribuem para a formação de uma estrutura mais estável do solo, o que por sua vez

favorece a minimização dos efeitos de degradação dos solos. Nota-se também que a umidade, baseada na função de capacidade de água, foi maior no PD, indicando assim que este resultado foi influenciado pela natureza conservacionista do sistema associado à irrigação constante, e armazenamento de água nos microporos.

Análise Tomográfica (µCT) – Sistema sob irrigado

Forma de poros

Os resultados referentes a análise tomográfica para forma de poros, distribuição por intervalo de classe de MAP e número de MAP no sistema sob irrigação são apresentados na Figura 5 e Tabela 2.

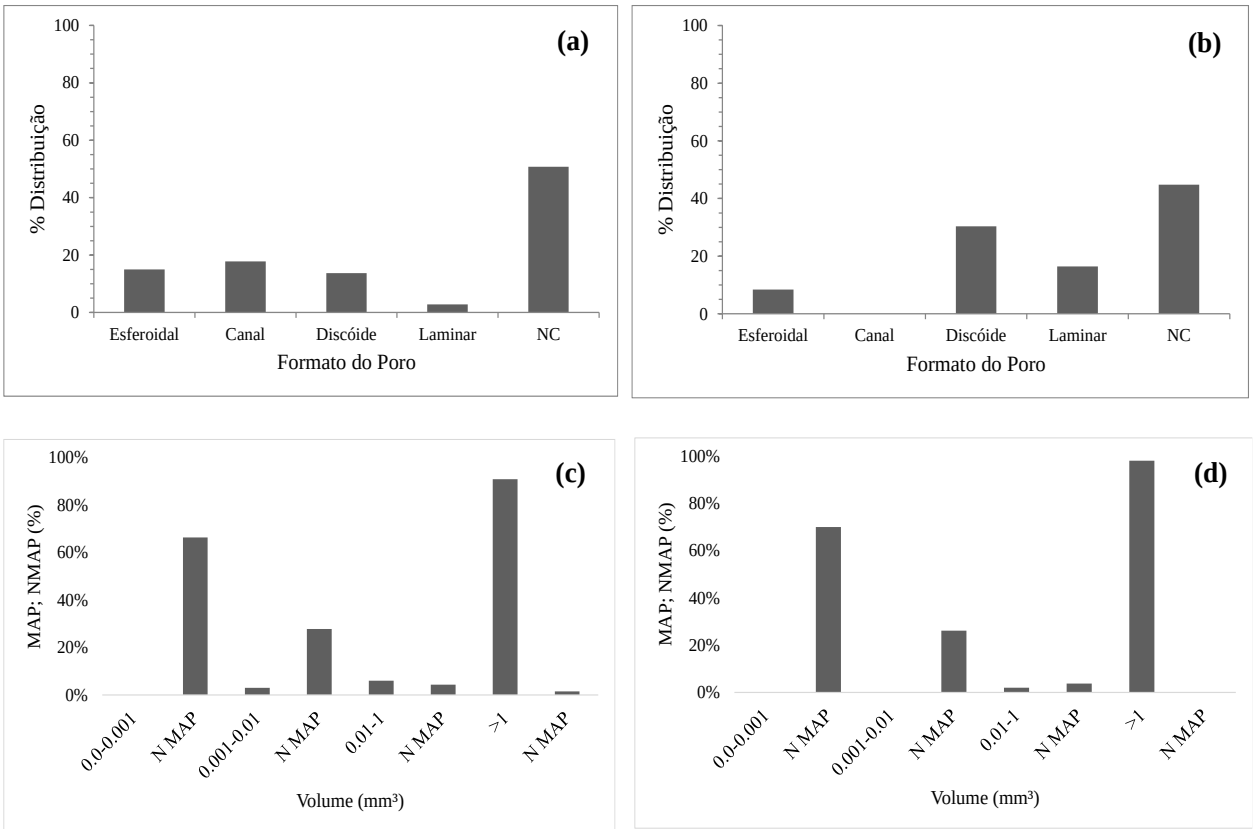


Figura 5. Distribuição da macroporosidade e formato de poro no sistema irrigado sob manejo de plantio direto e convencional, onde: (a) representa formas dos macroporos sob plantio direto; (b) representa formas dos macroporos sob sistema convencional; (c) distribuição normalizada de macroporos por intervalo e número desses poros, identificada em sistema de plantio direto; (d) distribuição normalizada de macroporos por intervalo e número desses poros identificada em sistema de plantio convencional.

Tabela 2. Valores médios da distribuição de formas de poros, MAP e NMAP por intervalos de classe

Parâmetros de forma	PD	PC
	---------- % ----------	
Esferoidal	14,98 a	8,43 b
Canal	17,78 a	0,0 b
Discoide	13,71 b	30,38 a
Laminar	2,79 b	16,41 a
NC	50,74 a	44,78 b
CV (%)	11,79	
---------- Distribuição de MAP e NMAP (%) ----------		
0,0-0,001	0,0 a	0,0 a
NMAP/0,0-0,001	66,37 b	69,94 a
0,001-0,01	3,0 a	0,0 b
NMAP/0,001-0,01	27,81 a	26,16 a
0,01-1	6,0 a	2,0 b
NMAP/0,01-1	4,32 a	3,73 a
>1	91,0 b	98,0 a
NMAP/>1	1,41 a	0,17 b
CV (%)	9,48	

PD = Plantio Direto; PC = Preparo Convencional; MAP = Macroporos; NMAP = Número de Macroporos; CV = Coeficiente de Variação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p \geq 0,05$).

Para aqueles macroporos que apresentaram continuação espacial nos eixos x, y e z, com tamanho representativo variando entre 0,002-32,4 mm^3, foi possível identificá-los quanto a sua forma geométrica (Figura 5a e 5b, Tabela 2).

No manejo sob PD (Figura 5a, Tabela 2), observa-se que 3-18% puderam ser classificados quanto a sua forma, representando assim 49,26% de formas detectáveis, sendo as formas esferoidal, canal e discoide as mais representativas; e a laminar, que foi a forma pouco representativa para este sistema. Quanto aos poros não classificados, estes representaram 50,74%, justificando assim a alta contagem de macroporos sem formas detectáveis pela µCT, sendo esta uma limitação desta técnica.

Em relação ao manejo sob PC (Figura 5b, Tabela 2), podemos constatar que apenas as formas esferoidal, discoide e laminar foram detectadas neste sistema de

manejo, representando assim 55,22% das possíveis formas identificadas neste sistema; enquanto os poros não classificados (NC) representaram 44,78%.

A alta percentagem de poros NC, como observados nos manejos aplicados, principalmente no PD, pode ser um indicativo da maior ramificação do sistema radicular, exercido pela maior estruturação do solo durante o período de cultivo, em que pode ter favorecido a maior continuação espacial destes poros, que foram alongando à tamanho superiores, em que os eixos x, y e z não puderam ser captados, conforme o software utilizado e resolução da imagem.

A maior complexidade de formas de poros, como as encontradas no manejo sob plantio direto (Figura 5a, Tabela 2), contempla a maior homogeneização deste tipo de manejo, por apresentar diferentes formas de poros que irão contribuir para os diferentes processos no interior do solo, desde a difusão de oxigênio para o sistema radicular, até possível drenagem e aeração do solo. As formas de poros dominantes neste manejo foram a esferoidal e canal, com 14,98% e 17,78%, respectivamente.

A maior predominância de formas de poros esferoidal e canal, também foram detectadas por CARDUCCI et al. (2014); BORGES (2015), no qual afirmam que estas formas de poros estão associadas à atividade biológica do solo, a partir da ação de organismos vivos e raízes, que neste caso têm participação fundamental na formação de bioporos.

Desta forma, o efeito da irrigação sob o manejo em PD favoreceu uma condição adequada, muito em função da possível formação e homogeneização de formas de poros, consideradas adequadas e de características de características que comprovam a melhor qualidade física do solo sob este manejo.

No manejo sob PC (Figura 5b, Tabela 2) observa-se a não ocorrência de poros na forma canal, sendo este um fator influenciado pelas práticas de preparo do solo e

consequente destruição destes poros estruturais. Entretanto, percebe-se dominância na forma discóide, totalizando 30,38% da distribuição. Sendo assim, podemos associar que o efeito da irrigação com as práticas de preparo do solo não foi um fator que favoreceu na maior manutenção de poros, e que as práticas de gradagem e subsolagem afetaram esta distribuição de formas, quando comparadas às obtidas no manejo em PD.

Conforme destacam HUSSAIN et al. (1998); HAJNOS et al. (2006); BORGES (2015), as formas de poros estão associadas diretamente ao tipo de solo ou ao manejo ao qual estão são submetidos. No caso da presente pesquisa, como os manejos estão sob a mesma mancha de solo (Argissolo Distrocoeso), aparentemente associa-se que o efeito de preparo do solo exerceu tais condições de mudanças estruturais.

Distribuição de MAP e do NMAP

A partir dos gráficos da distribuição do número de macroporos (NMAP) e classificação de macroporos por intervalos de classe (Figura 5c e 5d, Tabela 2), pode-se observar que no manejo em PD (Figura 5c, Tabela 2) 66,37% do NMAP apresentam volume de 0,0-0,001 mm^3; 27,81%, volume de 0,001-0,01 mm^3; 4,32%, volume de 0,01-0,1 mm^3 e 1,48%, volume > 1 mm^3.

Com relação ao PC (Figura 5d, Tabela 2), podemos verificar um comportamento semelhante a respeito do NMAP, com volume de 0,0-0,001 mm^3 representando aproximadamente 69%; NMAP com volume de 0,001-0,01 mm^3, com índice de 26,16%; e 3,73%, para NMAP com volume de 0,01-0,1 mm^3, tendo-se volume desprezível para aqueles NMAP > 1mm^3.

Em relação à distribuição por tamanho de MAP, observa-se que a conexidade da macroporosidade nos solos sob sistema de PD, especificamente para poros >1mm^3, foi

de aproximadamente 91%; enquanto que no PC foi de 98%. Pode-se considerar que os poros < 1 mm^3 são desprezíveis em relação à sua contribuição na maior porosidade detectável via µCT.

Tais resultados obtidos nesta pesquisa corroboram os de BORGES (2015) e PIRES et al. (2017), que encontraram maior MAP em poros com volumes entre 1 e 1000 mm^3 em solos submetidos à manejos sob plantio direto e preparo convencional.

Esta relação de MAP, com maior volume, como detectado nos manejos sob PD e PC, indicam, de acordo com HILLEL (1998), um resultado importante no que se refere a maior capacidade destes poros de maior volume favorecerem a drenagem e a aeração do solo.

Estes poros > 1mm^3, que fazerem parte da macroporosidade, são denominados de poros estruturais ou inter-agregados (DEXTER & RICHARD, 2009). Neste sentido, pode-se afirmar que estes poros são de grande importância por sua especificidade, por influenciar diretamente todos os processos dinâmicos que envolvem a movimentação de água e gases, além de afetar diretamente o crescimento radicular, e as propriedades mecânicas, que são estreitamente relacionadas à distribuição da geometria espacial desses poros (MUNKHOLM et al., 2012).

Apesar de serem considerados como desprezíveis, o volume de MAP < 1mm^3, tanto no sistema de PD e como no de PC, foi sempre superior aos observados nos estudos realizados por CASSARO et al. (2011); BORGES (2015); PIRES et al. (2017). Este comportamento encontrado para as condições desta pesquisa pode ser um indicativo da maior preservação de poros de tamanho menores, durante todo o processo de amostragem. De fato, a coleta em anéis de acrílico, realizada via inserção motorizada destes ao solo, promoveu, provavelmente, menor perturbação no sistema poroso durante o processo de amostragem, levando à maior preservação destes poros. Nos trabalhos de

CASSARO et al. (2011); BORGES (2015); PIRES et al. (2017), como em tantos outros, o modo da inserção de anéis ao solo é realizada de forma tradicional, na qual o conjunto anel-amostra é submetido a impactos para sua introdução em profundidade, que podem levar a desestruturação da amostra, com perdas preferenciais de determinados poros.

Porosidade referente a macroporosidade

Em relação à distribuição da macroporosidade (Ma) entre os manejos de PD e PC (Figura 6), ocorre predomínio de Ma para o sistema em PD com 12,81% enquanto que para o PC este valor foi de 7,9%, indicando assim que o revolvimento do solo, mesmo que mínimo, promoveu redução e homogeneização desses poros.

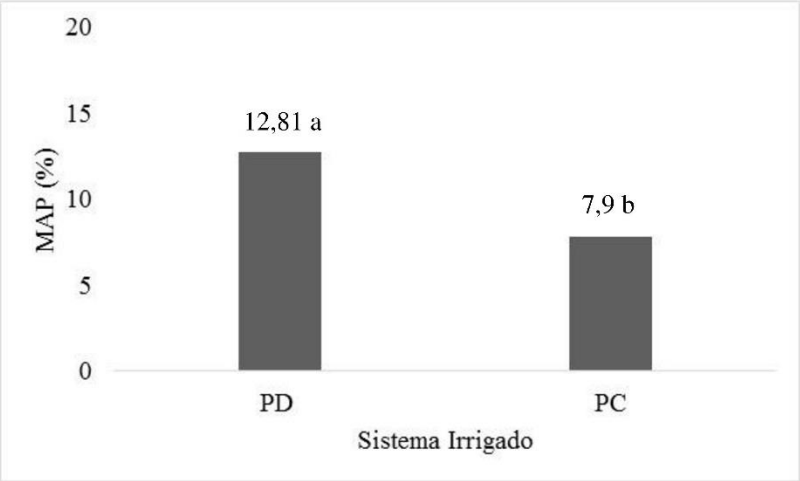


Figura 6. Distribuição da macroporosidade (%) em sistema de PD e PC sob irrigação.

Esta natureza de distribuição obtida para o PD apenas contrasta a importância em preservar as características estruturais dos solos, mas nestas condições desde que apresentem uma condição especifica como foi a situação implantada da irrigação. Resultados semelhantes foram detectados por CASSARO et al. (2011); RODRIGUES et al. (2011); BORGES (2015); PIRES et al. (2017) avaliando solos submetidos a

diferentes manejos em que a associação de práticas que visam a melhor manutenção da qualidade estrutural, fornecem resultados satisfatórios a longo prazo.

Visualização qualitativa – 3D

A partir das Figuras 7 e 8 é possível observar a rede de distribuição dos macroporos nos manejos em PD e PC.

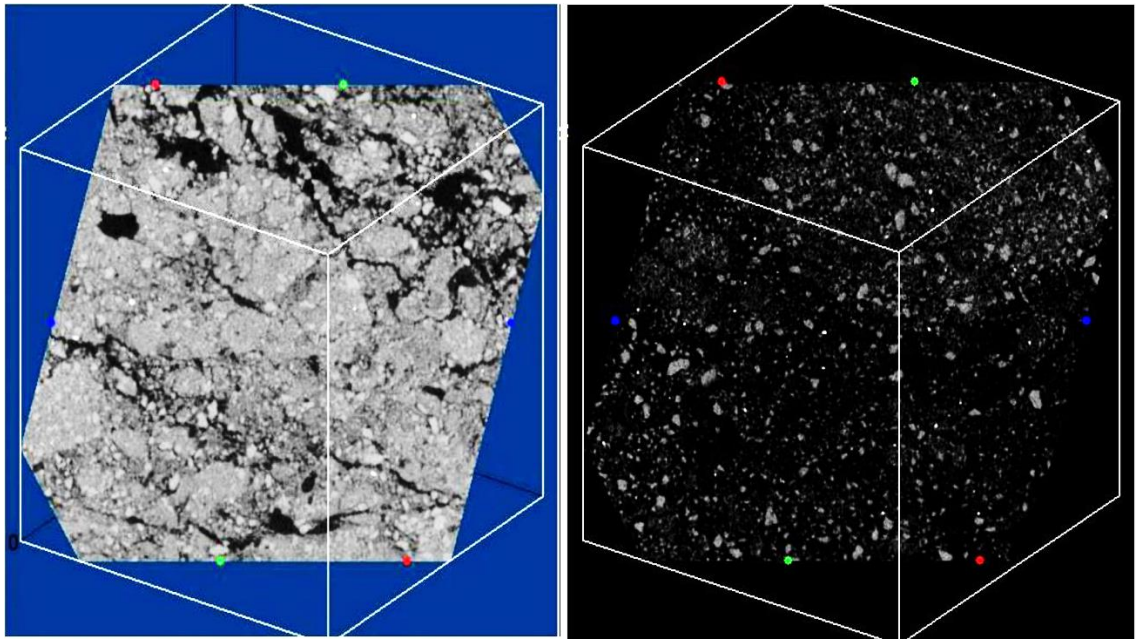


Figura 7. Volume 3D da distribuição da rede de macroporos detectáveis em sistema de PD sob irrigação.

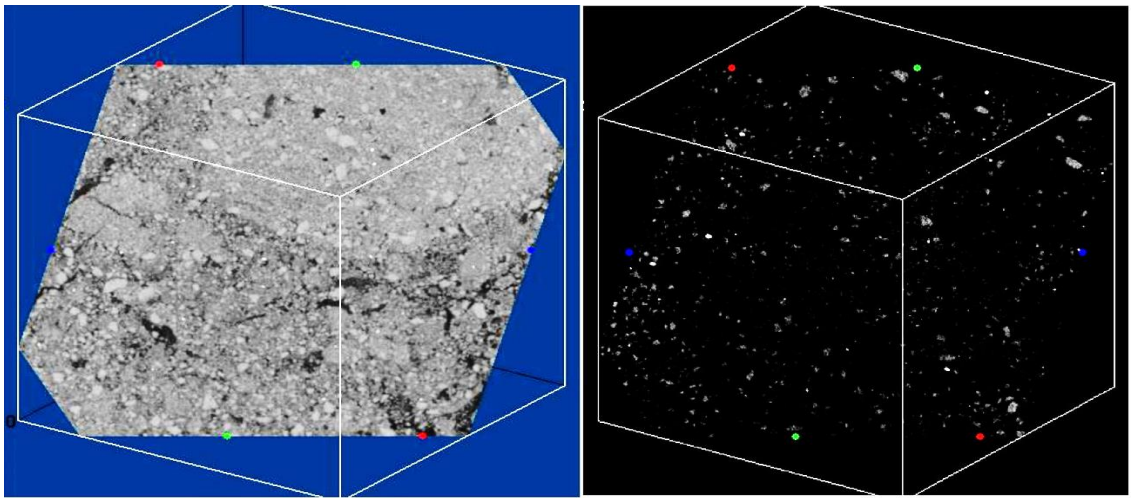


Figura 8. Volume 3D da distribuição da rede de macroporos detectáveis em sistema de PC sob irrigação.

Como já detectado anteriormente, percebe-se que a maior distribuição destes MAP ocorre no manejo sob a condição de PD associado à irrigação (Figura 7), pois a rede de macroporos é mais conexa e interligada em todo o volume amostrado.

Fator contrário foi observado no PC (Figura 8), em que a rede de MAP é menos conexa, podendo tal fator influenciar na tortuosidade deste poros, além de dificultar o caminho preferencial de água no interior do solo.

Avaliando o uso da tomografia computadorizada de raios X para a quantificação da macroporosidade em solos de pastagem RAB et al. (2014) detectaram maior macroporosidade na camada de 0,0-0,10 m.

No sistema de PC para o manejo em irrigado (Figura 8), possível compactação exercida pelo preparo do solo e formação com o tempo do "pé-de-grade", pode favorecer o fechamento de poros maiores e redução da macroporosidade e a conectividade dos poros. Neste caso, as técnicas tradicionais podem não ser suficientemente sensíveis para detectar a pequena redução da densidade do solo, fato como pode ser observado a partir das técnicas de tomografia computadorizada, quando se baseia na avaliação qualitativa, que utiliza a análise de imagens.

Podemos constatar que o maior volume de MAP, de tamanho > $1mm^3$, detectados anteriormente no PC (Figura 5d), é justificado a partir da análise de imagens, em que este maior volume de MAP, especificamente aqueles de maior diâmetro, estão na condição de poros isolados e não conectados à rede de distribuição, levando assim a um sistema menos tortuoso, conforme destacam SHANTI et al. (2014) que avaliaram a tortuosidade e conectividade de rede de poros.

Análise Tomográfica (µCT) – Sistema sob sequeiro

Visualização qualitativa – 3D

A partir dos procedimentos padrões de segmentação de imagens, aplicados ao manejo em sistema sob sequeiro, não foi possível identificar o volume representativo ao NMAP e MAP > 0,001 mm^3, como foi calculado no caso do sistema sob irrigação. Desta forma, podemos associar tal condição à maior concentração de poros (microporos) neste sistema de uso associados as práticas de PC e PD.

Portanto, ficamos impedidos de calcular a forma de tais poros, já que a continuação espacial destes não é capaz de captar e distinguir os eixos x, y e z, além também do volume representativo da contribuição dos macroporos no volume total. Com base nestas condições, pode-se reconstruir o volume 3D das amostras analisadas e então fazer as inferências a respeito da variação qualitativa do sistema em sequeiro associado às práticas de gestão de manejo do solo.

Com os volumes reconstruídos em 3D (Figuras 9 e 10), podemos compreender a distribuição estrutural do solo nos manejos em PD e PC no sistema de cultivo em sequeiro.

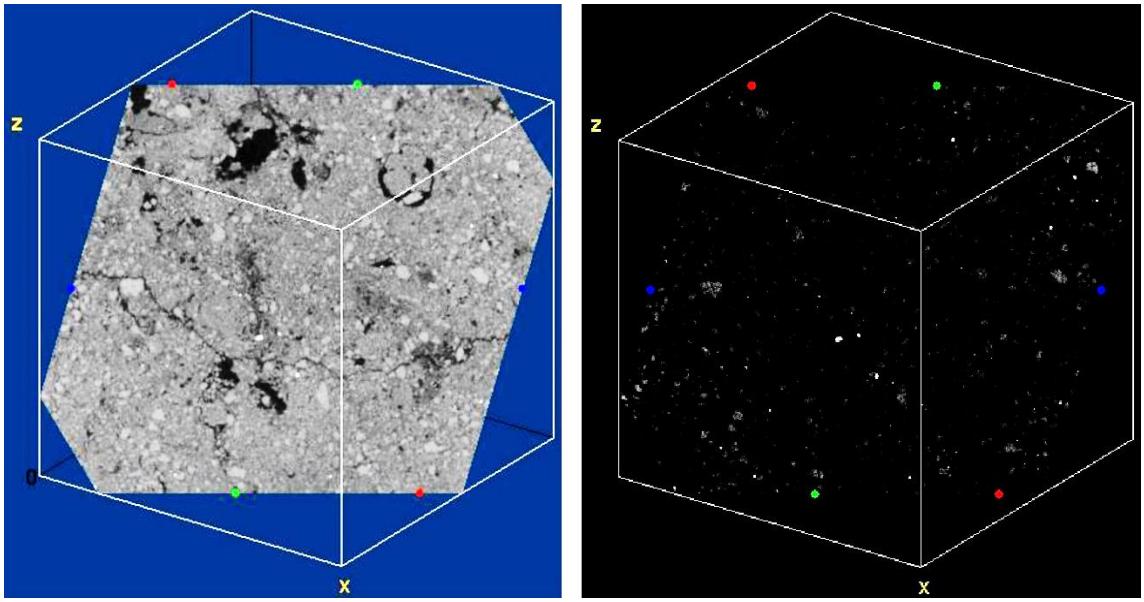


Figura 9. Volume 3D da distribuição da rede de macroporos detectáveis em sistema de PD sob sequeiro.

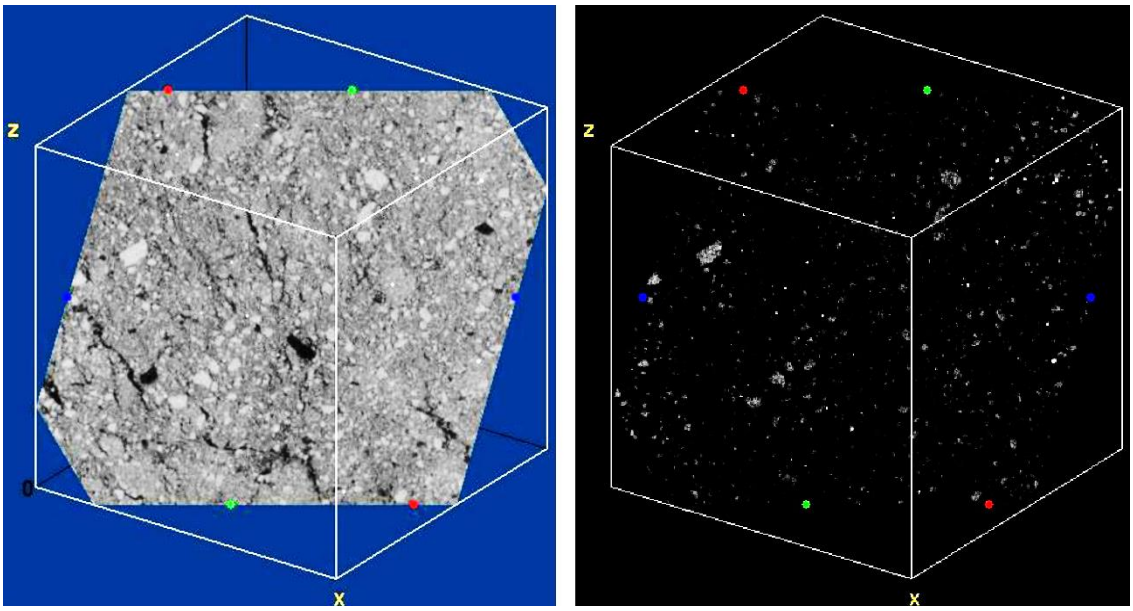


Figura 10. Volume 3D da distribuição da rede de macroporos detectáveis em sistema de PC sob sequeiro.

Diferente das condições descritas anteriormente no sistema sob irrigação, em que o manejo da água favoreceu as condições físicas do solo em sistema de PD, nesta situação particular, pode-se observar, a partir da Figura 9, que o sistema em sequeiro

sob PD apresentou um domínio estrutural com poros de tamanhos muito reduzidos, além da aparência de uma estrutura mais compacta, influenciados pelos maiores valores de RP e DS (ver Capítulo 1, Tabela 2).

Em relação ao PC (Figura 10), houve uma relação inversa, ou seja, o PC favoreceu a uma condição mais adequada ao solo no sistema em sequeiro, possibilitando condições de desenvolvimento às plantas quando não houver condições adequadas para as práticas de irrigação.

O cultivo sob PD (Figura 9), apesar da característica específica do solo não favorecer condições adequadas, induz a concluir que, a partir das reconstruções em volume 3D, aparentemente este tratamento apresentou um maior grau de compactação, o que impede a circulação de ar e água em seu meio, reunindo assim condições para deixar o solo praticamente impermeável, o que inviabiliza vários mecanismos no seu interior.

Conforme destacam TAVARES et al. (2012) grandes áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região Nordeste, mais especificamente no estado de Pernambuco, estão sob domínio dos Tabuleiros Costeiros e apresentam solos com caráter distrocoeso. Na situação do presente estudo, conforme já descrito, o caráter distrocoeso do solo, mesmo se apresentando em um grau ainda não muito evoluído, indica, a partir da análise visual das imagens, que as práticas de preparo do solo se fazem necessárias, pois a gradagem e subsolagem, mesmo considerando a camada superficial de 0,0-0,1 m, na condição do presente estudo, a longo prazo, favoreceram as melhores condições de distribuição estrutural (Figura 10).

Solos submetidos ao uso intensivo como as práticas de preparo do solo, geralmente apresentam condições estruturais reduzidas, em decorrência da maior compactação e perturbação, ocasionadas pelo uso de máquinas e implementos agrícolas,

ausência de material orgânico e de como as partículas estão distribuídas no solo, pois esta organização das partículas sólidas é que define a estrutura do solo, bem como, o espaço poroso entre elas (LOSEKANN, 2009).

Entretanto, algumas particularidades como o tempo de recuperação destas propriedades dos solos, pode ser um fator favorável na avaliação estrutural de solos submetidos a PC. Com relação a isto, a amostragem foi realizada após 20 meses da implantação do experimento, possibilitando assim tempo para que houvesse maior arranjamento da estrutura micro-agregada do solo, já que não possibilitou a quantificação de poros maiores que 0,001 mm^3.

Observando a maior distribuição de poros de tamanho pequenos no PC (Figura 10), podemos então afirmar que o preparo do solo modificou a estrutura macroagregada durante a fase de implantação, levando a uma reorganização da rede de poros, com formação de microagregados, mas por se tratar de um solo distrocoeso, esta condição foi novamente reestabelecida. Tal fato pode ser observado a partir das fissuras detectadas na imagem (Figura 9 e 10), que são indicativos do processo de reestruturação destes solos, a partir da ação de raízes, favorecendo assim a formação de poros de tamanhos maior e estrutura macroagregada.

Estudos realizados por MARCOLAN et al. (2007) avaliando recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento, encontraram resultados que comprovam haver aumento no volume de macroporos e porosidade total, após um período de quatro anos, e que os atributos físicos do solo apresentaram maior uniformidade no preparo convencional, porém com menor estabilidade de agregados.

Desta forma, o revolvimento do solo modificou inicialmente a estrutura, mas com o tempo percebe-se que houve a reconsolidação de sua estrutura, pois a ausência de revolvimento nas épocas seguintes favoreceu a estabilização de poros.

Em alguns trabalhos são mencionados que as práticas de preparo do solo, influenciam diretamente na estrutura do solo, reduzindo drasticamente a macroporosidade e porosidade total, para solos cultivados em sistemas de manejo convencional em comparação ao plantio direto (SILVA et al., 2000), contradizendo os resultados obtidos neste estudo e corroborando os de SILVEIRA NETO et al. (2006), que encontraram resultados satisfatório para solos submetidos à manejo em sistema convencional de cultivo.

Conforme destacam GANTZER & ANDERSON (2002); KIM et al. (2010); VAZ et al. (2011); MUNKHOLM et al. (2013); RAB et al. (2014); BOTTINELLI et al. (2016), estes vêm destacando a importância do uso da tomografia computadorizada na avaliação estrutural dos solos submetidos à diferentes práticas de manejo, bem como o grau de magnitude destas práticas nas características do solos. Concluem ainda que tal método é considerado adequado quando se pretende entender estes efeitos em microescala e avaliar as informações a respeito das modificações estruturais de forma direta.

CONCLUSÕES

Os resultados sugerem que as práticas de gestão adotadas são capazes de modificar a estrutura do solo em condições específicas, visto que o efeito da irrigação favoreceu a uma condição mais estruturada do solo submetido ao PD, onde a partir das técnicas adotadas de avaliação, podem-se entender melhor estes mecanismos, desde a forma de poros até a distribuição de macroporos por quantidade e volume, em intervalo de classes.

No sistema sob sequeiro, as práticas de preparo do solo favoreceram a uma melhor condição estrutural, fato este que pode estar associado ao tempo.

O método da tomografia computadorizada de raios-X apresenta uma valiosa ferramenta para fornecer quantificação rápida e alta qualidade na caracterização da porosidade em solos, além também de fornecer um parâmetro de diagnose visual, a partir de imagens tridimensionais.

REFERÊNCIAS

AMER, A. M. M.; LOGSDON, S. D.; DAVIS, D. Prediction of hydraulic conductivity as related to pore size distribution in unsaturated soils. **Soil Science**. v. 174, p. 508–515, 2009.

ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; KUMAR, S.; GANTZER, C. J.; RACHMAN, A. **CT- measured macropore parameters for estimating saturated hydraulic conductivity at four study sites**. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane. p. 13–16, 2010.

BEUTLER, A. N.; MUNARETO, J. D.; RAMÃO, C. J.; GALON, L.; DIAS, N. P.; POZZEBON, B. C.; RODRIGUES, L. A. T.; MUNARETO, G. S.; GIACOMELI, R.; RAMOS, P. V. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 1601-1607, 2012.

BORGES, J. A. B.; PIRES, L. F.; PEREIRA, A. B. Computed tomography to estimate the representative elementary area for soil porosity measurements. **Scientific World Journal**. v. 27, p. 1–10, 2012.

BORGES, J. A. R. **Tamanhos elementares representativos de atributos do solo via atenuação de raios gama e tomografia computadorizada**. Tese (Doutorado em Ciências – Área de concentração: Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, 119f, 2015.

BOTTINELLI, N.; ZHOU, H.; BOIVIN, P.; ZHANG, Z. B.; JOUQUET, P.; HARMANN, C.; PENG, X. Macropores generated during shrinkage in two paddy soils using X-ray micro-computed tomography. **Geoderma**. v. 265, p. 78-86, 2016.

BULLOCK, N. P.; FEDOROFF, A.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for Soil Thin Section Description**. 1st ed. Waine Research, 1985.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; ROSSONI, D. F.; COSTA, A. L.; HECK, R. J. Spatial variability of pores in Oxidic Latosol under a conservation management system with different gypsium doses. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 445-460, 2014

CASSARO, F. A. M.; BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; SAAB, S. D. C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil Tillage and Research**. v. 111, p. 175–179, 2011.

DAL FERRO, N.; DELMAS, P.; DUWIG, C.; SIMONETTI, G.; MORARI, F. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilization treatments. **Soil Tillage and Research**. v. 119, 13–21, 2012.

DAL FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil Tillage and Research**. v. 140, p. 55–65, 2014.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bimodal pore size distributions. **Soil Tillage and Research**. v. 103, p. 113-118, 2009.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**.2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Australian Journal of Soil Research**. v. 46, p. 237-256, 2008.

ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. 2007. A comparison of 2D vs 3D thresholding of X-ray CT imagery. **Canadian Journal Soil Science**. v. 87, p. 405-412, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

GANTZER, C. J.; ANDERSON, S. H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. **Soil Tillage and Research**. v. 64, p. 101–111, 2002.

HAJNOS, M.; LIPIEC, J.; SWIEBODA, R.; SOKOŁOWSKA, Z.; WITKOWSKA-WALCZAK, B. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods. **Geoderma**. v. 135, p. 307–314, 2006.

HECK, R. J. **X-ray computed tomography of soil**. In: Ribeiro, M. R., Nascimento, C. W., do Filho, M.R.R., Cantalice, J. R. B. (Eds.). Tópicos Em Ciência Do Solo (Topics in Soil Science). SBCS, Viçosa, pp. 31–70, 2009.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. Academic Press, London. 1998.

HUSSAIN, I.; OLSON, K. R.; SIEMENS, J. C. Long-term tillage effects on physical properties of eroded soil. **Soil Science**. v. 163, p. 970–981, 1998.

IMHOFF, S.; GHIBERTO, P. J.; GRIONI, A.; GAY, J. P. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. **Geoderma**. v. 158, p. 268–274, 2010.

JEFFERIES, D. A.; HECK, R. J.; THEVATHASAN, N. V.; GORDON, A. M. Characterizing soil surface structure in a temperate tree-based intercropping system using X-ray computed tomography. **Agroforestry Systems**. v. 88, p. 645–656, 2014.

JURY, A. W.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 328 p.

JURY, W. A.; HORTON, R. C. N. **Soil physics**. 6th. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2004.

KIM, H. M.; ANDERSON, S. H.; MOTAVALLI, P. P.; GANTZER, C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**. v. 260.p. 244–251, 2010.

KODEŠOVÁ, R.; JIRKU, V.; KODEŠ, V.; MÜHLHANSELOVÁ, M.; NIKODEM, A.; ŽIGOVÁ, A. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland. **Soil Tillage and Research**. v.111, p. 154–161, 2011.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D. R., 1994. Soil hydrology: Texbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines. **Catena Verlag**. p.370, 1994.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of Soil Physics**. CRC Press, New York, 2004.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Do Autor, 1995. 497 p.

LIPIEC, J. K.; HAJNOS, M.; ŚWIEBODA, R. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. **Geoderma**. v. 180, p. 20-27, 2012.

LIPIEC, J. K.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil Tillage and Research**. v. 89, p. 210-220, 2006.

LOSEKANN, M. E. **Caracterização, classificação e indicadores de qualidade em localidades de agricultura familiar do Estado do Rio Grande do Sul**. 2009. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARCOLAN, A. L.; ANGHIONI, I.; FRAGA, T. I.; LEITE, J. G. D. B. Recuperação de atributos físicos de um Argissolo em função do seu revolvimento e do tempo de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31, p. 571-579, 2007.

MUNARETO, J. D.; BEUTLER, A. N.; RAMÃO, C. J.; DIAS, N. P.; RAMOS, P. V.; POZZEBON, B. C.; ALBERTO, C. N.; HERNANDES, G. C. Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 45, p. 1499-1506, 2010.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil Tillage and Research**. v. 127, p. 85–91, 2013.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**. v.182, p. 22–29, 2012.

OGUNWOLE, J. O.; PIRES, L. F.; SHEHU, B. M. Changes in the structure of a Nigerian soil under different land management practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p. 830–840, 2015.

PAGENKEMPER, S. K.; ATHMANN, M.; UTEAU, D.; KAUTZ, T.; PETH, S. The effect of earthworm activity on soil bioporosity investigated with X-ray computed tomography and endoscopy. **Soil Tillage and Research**. v. 146, p. 79-88, 2015.

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 Tillage Research**. v. 165, p. 66-79, 2017.

PIRES, L. F.; CASSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil Tillage and Research**. v. 100, p. 72–77, 2008a.

PIRES, L. F.; COOPER, M.; CASSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DIAS, N. P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, p. 297–304, 2008b.

PORTELLA, C. M. R.; GUIMARÃES, M. F.; FELLER, C.; FONSECA, I. C. B.; TAVARES FILHO, J. 2012. Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 1868-1877, 2012.

RAB, M. A.; HALING, R. E.; AARONS, S. R.; HANNAH, M.; YOUNG, I. M.; GIBSON, D. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma**. v. 213, p. 460-470, 2014.

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. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49–134.

RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira De Ciência do Solo.** v. 35, p. 105–114, 2011.

SHANTI, N. O.; CHAN, V. W. L.; STOCK, S. R.; DE CARLO, F.; THORNTON, K.; FABER, K. T. X-ray micro-computed tomography and tortuosity calculations of percolating pore networks. **Acta Materialia**. v. 71, p. 126-135, 2014.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; P, BLANCANEAUX. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 35, p. 2485-2492, 2000.

SILVEIRA NETO, A. N.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v. 36, p. 29-35, 2006.

STATSOFT. **STATISTICA 7.0**.Tulsa: StatSoft, 2004.

STINGACIU, L. L.; WEIHERMULLER, S. HABER-POHLMEIER, S.; STAPF, H.; VEREECKEN, A. T, POHLMEIER. Determination of pore size distribution € and hydraulic properties using nuclear magnetic resonance relaxometry: A comparative study of laboratory Methods. **Water Resource Research**. v. 46, p. 123-134, 2010.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 33, p. 1837–1844, 2009.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A.A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, p. 1207-1214, 2012.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**. v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T. H.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils**. US Salinity Laboratory and USDA Agricultural Research Service. 1991, 85 p.

VAZ, C. M.; DE MARIAB, I. C.; LASSO, P. O. Evaluation of an advanced benchtop microcomputed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian Oxisols. **Soil Science Society American Journal**. v. 75, p. 832–841, 2011.

VAZ, C. M.; DE MARIAB, I. C.; LASSO, P. O. Evaluation of an advanced benchtop micro-computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian Oxisols. **Soil Science Society American Journal**. v. 75, p. 832–841, 2011.

WAIRIU, M.; LAL, R. Tillage and land use effects on soil microporosity in Ohio, USA and Kolombangara, Solomon Islands. **Soil Tillage and Research**. v. 88, p. 80-84, 2006.

CONCLUSÕES GERAIS

O monitoramento da qualidade estrutural dos solos é um dos fatores de extrema importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos diferentes sistemas de cultivo. Diante disto, estudos que se utilizam de ferramentas com alta resolução no processamento de imagens, favorecendo a melhor identificação e quantificação, dos efeitos ocasionados pelas práticas de preparo do solo, em diferentes solos, são fundamentais por possibilitar a ampliação do conhecimento sobre a formação e desenvolvimento da estrutura e, consequentemente, da rede de poros do solo, tornando-se importantes ferramentas para adaptar de forma condizente, o manejo do solo, em busca do desenvolvimento de uma produção canavieira de forma adequada.

O uso de ferramentas geoestatísticas possibilitou a identificação da estrutura de dependência espacial nos manejos em sequeiro e irrigado, e os mapas temáticos de krigagem favoreceu a identificação da distribuição dos atributos físico-hídricos ao longo da área amostral. A densidade amostral favoreceu o conhecimento de amostragem e possibilitou subsidiar em trabalhos futuros para a mesma área de estudo, em que a variação de 1 a 15 pontos seria considerado adequado para caracterizar os atributos físicos estudados.

A caracterização da estrutura do solo com base na porosidade, mostrou-se adequada quando associada os métodos de CCRAS associada a modificações via modelos de funções matemáticas. Entretanto, o uso das TC raios-x foi uma técnica mais evasiva, por proporcionar a identificação via imagens em 3D das alterações exercidas pelas práticas de preparo do solo associadas a irrigação e sequeiro.