



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - SOLOS E NUTRIÇÃO
DE PLANTAS

CARLOS VÍTOR OLIVEIRA ALVES

**ÍNDICE $S_{RELATIVO}$ COMO AVALIADOR DA QUALIDADE FÍSICA E SUA
RELAÇÃO COM ATRIBUTOS DA FRAÇÃO POROSA DE UM CAMBISSOLO**

FORTALEZA

2013

CARLOS VÍTOR OLIVEIRA ALVES

**ÍNDICE S_{RELATIVO} COMO AVALIADOR DA QUALIDADE FÍSICA E SUA RELAÇÃO
COM ATRIBUTOS DA FRAÇÃO POROSA DE UM CAMBISSOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

A478i

Alves, Carlos Vitor Oliveira.

Índice S_{relativo} como avaliador da qualidade física e sua relação com atributos da fração porosa de um cambissolo. / Carlos Vitor Oliveira Alves. – 2013.

74 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, Fortaleza, 2013.

Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Física do solo. 2. Agricultura irrigada. 3. Chapada do Apodi. I. Título.

CDD 631.4

CARLOS VÍTOR OLIVEIRA ALVES

**ÍNDICE S_{RELATIVO} COMO AVALIADOR DA QUALIDADE FÍSICA E SUA RELAÇÃO
COM ATRIBUTOS DA FRAÇÃO POROSA DE UM CAMBISSOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Aleksandro dos Santos Brito
Instituto Federal Baiano (IF Baiano)

Aos meus pais, pelos ensinamentos de vida e por terem me guiado nesta trajetória que hoje sigo.

DEDICO

Aos meus irmãos pelo apoio e companheirismo desde sempre.

À Valéria, pelo apoio, e principalmente, amor incondicional.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares;

À Deus por ter me dado força e perseverança;

Ao meu tio Clodoaldo Alves, pois sem ele nada teria ocorrido;

Ao meu orientador Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação e ensinamentos científicos;

Aos meus velhos amigos dessa longa jornada vivida em meio acadêmico. Em especial àqueles que se fizeram presentes: Elimário Teixeira, Leandro Dias, Nielson Machado, Naiara Célida, Yuri Caires; e

Aos meus novos amigos e conhecidos, pelo ótimo convívio, às vezes áspero; mas nem só de flores nascem as grandes amizades. Em especial: Ailton Mascarenhas, Alisson Simplicio, Alves Filho, Bruna Iwata, Cleyton Saialy, José Filho, José Wilson, Juciane Maria, Maykon Souza, Petterson Costa, Rafael Tassinari, Régis Braz, Ronaldo Oliveira; e

Ao Alcione Freire, pela ajuda nas análises enquanto estive fora e em outros momentos em que precisei dele;

A todos os professores do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará, por todos os ensinamentos transmitidos;

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará;

Ao professor Paulo Leonel Libardi, pelo conhecimento transmitido e orientação durante o período em que estive na ESALQ/USP; e

Aos demais professores da ESALQ/USP com quem tive o prazer de assistir aulas e/ou conviver;

Ao pessoal do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, pelo ótimo convívio e momentos de descontração;

À CAPES, pela concessão da bolsa durante o período do curso;

À FUNCAP - Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro via Projeto DCR - 0024-00013.01.00/10; à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio ao mestrado sanduíche via Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD 125/07);

À todos que contribuíram para que esta etapa fosse concluída com êxito, e que por infortúnio da memória não citei, meus sinceros agradecimentos!

“A felicidade e a ausência de problemas estão em saber encontrar o ponto equidistante entre o fácil e o difícil, o superficial e o profundo, o prazer e a dor.”

Siddhartha Gautama

RESUMO

A Chapada do Apodi vem se destacando como um promissor polo de agricultura irrigada em virtude da potencialidade agrícola dos seus solos. Considerando o uso intensivo desses solos, e partindo da hipótese de que o S_{relativo} é sensível às alterações na estrutura do solo e, portanto, se correlaciona com os atributos da fração porosa, o presente estudo objetivou avaliar as alterações físicas de um Cambissolo sob cultivo de abacaxi e verificar a correlação entre o índice S_{relativo} e os atributos da fração porosa. A área avaliada tem em seu centro as coordenadas 5° 08' 05" S e 37° 54' 49" W e é cultivada há oito anos com abacaxi (*Ananas comosus* L. Merrill), cultivar Pérola. O suprimento de água se dá, via de regra, por sistema de irrigação do tipo gotejamento e o solo é classificado como Cambissolo. Para fins de avaliação da qualidade física, foram contempladas 2 situações do solo: sob cultivo e sob mata secundária até a profundidade de 0,3 m, nas camadas de 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Nestas camadas foram coletadas amostras de solo com estruturas deformada e indeformada para a realização das análises físicas, a saber: granulometria, densidade de partículas e do solo, permeabilidade intrínseca do solo ao ar e curva de retenção de água pelo solo (a partir desta, foram calculados os índices S e S_{relativo}). Foi avaliada a relação do índice S_{relativo} com os atributos: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, porosidade de aeração, permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros. Considerou-se o delineamento inteiramente casualizado com esquema em parcelas subdivididas 2x3x5 (duas situações de solo: sob cultivo e mata secundária; três camadas de solo: 0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m; cinco repetições). Foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados, F para a análise de variância e de Tukey para a comparação de médias dos tratamentos, todos a 5% de probabilidade. A relação entre atributos da fração porosa e o S_{relativo} foi avaliada por análises de regressão e de correlação. Concluiu-se que o índice S_{relativo} é sensível às alterações impostas à estrutura do solo e, portanto, pode ser utilizado como indicador para quantificar mudanças na disposição de seus constituintes; os demais indicadores utilizados para aferir a qualidade física do solo corroboraram o S_{relativo} ao evidenciarem que a área sob cultivo com abacaxi apresenta estrutura física melhor que a área sob mata secundária; e o índice S_{relativo} apresenta correlação com atributos da fração porosa do solo.

Palavras-chave: Física do solo. Agricultura irrigada. Chapada do Apodi.

ABSTRACT

The Apodi Plateau has emerged as a promising pole of irrigated agriculture because of its soils agricultural potential. Considering the intensive use in these soils and assuming that the S_{relative} is sensitive to these changes and is related directly to the attributes of the porous fraction, this study aims to evaluate changes in physical quality of a Cambisol under pineapple crop and measure the relationship between S_{relative} index and porous fraction attributes. The area to be assessed at its center has the 5° 08' 05" S and 37° 54' 49" W coordinates. This is an area planted eight years ago with pineapple (*Ananas comosus* L. Merrill) Pearl cultivar. The water supply is usually by drip irrigation and the soil is classified as Cambisol. In order to evaluate the physical quality, two soil situations were considered: under crop and native forest to a depth of 0.3 m, in the layers of 0-0.1, 0.1-0.2 and 0.2-0.3 m. In these layers disturbed and undisturbed soil samples were collected and submitted to the following physical analyses: particle size distribution, particle density, bulk density, soil air intrinsic permeability and soil water retention curve (from which S and S_{relative} indices were calculated). The relation of the S_{relative} index with the following attributes was evaluated: bulk density, porosity, macroporosity, microporosity, aeration porosity, soil air intrinsic permeability and pore continuity index. A completely randomized design was adopted with split plot scheme 2x3x5 (two soil situations: under crop and native forest; three layers: 0-0.1, 0.1-0.2 and 0.2-0.3 m; five replications). Kolmogorov-Smirnov tests were applied to verify the data normality, F for the variance analysis and Tukey for treatments means comparison, all at 5% probability. The relationship between porous fraction attributes and S_{relative} index was evaluated by regression analyses. It was concluded that S_{relative} index is sensitive to the changes imposed to the soil structure and, therefore, can be used as an indicator to quantify changes in the arrangements of its constituents; the other soil physical quality indicators agreed with S_{relative} showing that the area under pineapple cultivation has a better physical structure than the area under secondary forest; and S_{relative} index shows correlation with soil porous fraction attributes.

Keywords: Soil physics. Irrigated agriculture. Apodi Plateau.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vista superior da área experimental.	30
Figura 2 - Granulometria com os desvios-padrão da média, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	40
Figura 3 - Variação da classe textural nas áreas de amostragem.	41
Figura 4 - Densidade do solo (A) e partículas (B), com os desvios-padrão da média, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	42
Figura 5 - Porosidade total com os desvios-padrão da média, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	43
Figura 6 - Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e as tensões aplicadas (τ), para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).	46
Figura 7 - Relação logarítmica entre K_{ar} e e_{ar} para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).	47
Figura 8 - Curva de retenção da água pelo solo (CRA) das amostras com estrutura indeformada, para as áreas sob cultivo de abacaxi (A) e mata secundária (B) nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.	49
Figura 9 - Frequência acumulada de poros em função da tensão aplicada, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.	52
Figura 10 - Índice S para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	53
Figura 11 - Índice Srelativo para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Médias seguidas pela mesma letra,	

maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	55
Figura 12 - Correlação e regressão entre o Srelativo e cada atributo relacionado com a fração porosa do solo, para a camada de 0,0-0,10 m. * - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ns - não significativo a 5% de probabilidade.....	56
Figura 13 - Dispersão dos atributos físicos para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Ds: densidade do solo; N e K1: índices de continuidade de poros; Kar: permeabilidade intrínseca do solo ao ar; PT: porosidade total; Mip: microporos; Map: macroporos; S: índice S; Sr: índice Srelativo; M1: mata 0,0-0,1 m; M2: mata 0,1-0,2 m; M3: mata 0,2-0,3 m; A1: abacaxi 0,0-0,1 m; A2: abacaxi 0,1-0,2 m; e A3: abacaxi 0,2-0,3 m.....	60
Figura 14 - Dendrograma representando a dissimilaridade entre os grupos de mata secundária e cultivo de abacaxi. M1: mata 0,0-0,1 m; M2: mata 0,1-0,2 m; M3: mata 0,2-0,3 m; A1: abacaxi 0,0-0,1 m; A2: abacaxi 0,1-0,2 m; e A3: abacaxi 0,2-0,3 m.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Volume de poros e proporção macro e microporos para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m	44
Quadro 2 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, para a tensão de 10 kPa.....	45
Quadro 3 - Parâmetros da equação de regressão de $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e porosidade bloqueada (ε_b) para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária, nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m	48
Quadro 4 - Índice de continuidade de poros (K_1) para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, para a tensão de 10 kPa.....	49
Quadro 5 - Teores de água no solo na θ_s , CC, PMP e a AD para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.	51
Quadro 6 - Autovalores e porcentagem explicada por cada componente.....	57
Quadro 7 - Correlação entre as variáveis e componentes principais e sua respectiva contribuição para cada componente.	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Cultura do abacaxi	17
2.2 Qualidade do solo	17
2.3 Indicadores de qualidade física do solo	19
2.3.1 <i>Densidade do solo</i>	20
2.3.2 <i>Porosidade</i>	20
2.3.2.1 <i>Porosidade de aeração</i>	21
2.3.3 <i>Curva de retenção de água no solo</i>	22
2.3.4 <i>Índice S</i>	23
2.3.5 <i>Índice S_{relativo}</i>	25
2.3.6 <i>Permeabilidade ao ar e índice de continuidade de poros</i>	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Local do experimento	29
3.2 Caracterização da área experimental.....	29
3.3 Amostragem	29
3.4 Análises laboratoriais.....	31
3.4.1 <i>Granulometria</i>	31
3.4.2 <i>Densidade das partículas</i>	31
3.4.3 <i>Densidade do solo</i>	31
3.4.4 <i>Porosidade</i>	31
3.4.5 <i>Permeabilidade intrínseca do solo ao ar</i>	32
3.4.5.1 <i>Índices de continuidade dos poros</i>	33
3.4.6 <i>Curva de retenção de água no solo</i>	34
3.4.7 <i>Índice S</i>	35
3.4.8 <i>Índice S_{relativo}</i>	35
3.4.9 <i>Análise estatística</i>	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Textura do solo	39
4.2 Densidade do solo e de partículas.....	41

4.3 Porosidade do solo	43
4.4. Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros	44
4.5 Curva de retenção de água no solo.....	49
4.5.1 Frequência acumulada de poros	51
4.7 Índice S	52
4.8 Índice $S_{relativo}$.....	54
4.8 Estatística multivariada	57
5 CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICES	71

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, atualmente, há uma necessidade no aumento da produção de alimentos visando atender às necessidades do mercado interno e suprir a demanda internacional de uma população que cresce a passos largos. Muito embora não seja necessária a incorporação de novas áreas ao processo produtivo, ainda existem focos de desmantamento, substituindo matas naturais por culturas anuais e/ou perenes.

A Chapada do Apodi, localizada na região semiárida do nordeste do Brasil, mais precisamente no estado do Ceará, na divisa com o Rio Grande do Norte, apresenta predominância de solos com elevado conteúdo de elementos nutritivos para as plantas, boa disponibilidade de mananciais, que viabiliza a prática da irrigação, e topografia plana. Todas estas potencialidades da região para a fruticultura irrigada têm atraído agroindústrias e favorecido a instalação de um mercado de insumos, além de permitir o estabelecimento de cadeias de produção de frutas. No Ceará, grandes áreas privadas irrigadas e importantes projetos públicos irrigados, como o Projeto Jaguaribe/Apodi (5.393 ha) e Tabuleiro de Russas (10.666 ha), já se destacam no aspecto produtivo.

Diante das condições favoráveis, a Chapada do Apodi vem se destacando como um promissor polo de fruticultura. No entanto, as atividades agrícolas vêm se desenvolvendo sem serem acompanhadas por estudos que revelem o impacto causado pelas diferentes formas de exploração agrícola no ambiente, principalmente no solo e na água. Ressalte-se que parte da atividade agrícola da região visa o mercado externo, que exige, além da qualidade do produto colhido, a minimização do impacto ambiental e uso de práticas agrícolas conservacionistas na sua produção. Nesse âmbito, a exploração de fruteiras em regime de irrigação tem se destacado nacionalmente quanto à sua produtividade e exportação.

Nos últimos anos, pesquisadores da área de ciência do solo têm se preocupado com o tema qualidade do solo, procurando identificar e selecionar indicadores associados a determinadas funções que o mesmo possa desempenhar e definir valores quantitativos desses indicadores. Nesse contexto, um índice de avaliação da qualidade física do solo, na verdade um aprimoramento de outro já existente, pode ser usado para mensurar mudanças impostas ao solo. Trata-se do S_{relativo} (FREIRE, 2012), uma derivação do conhecido índice S definido por Dexter (2004a; 2004b; 2004c).

Desse modo, principiando os estudos relacionados a este novo indicador de qualidade física, partindo da hipótese de que o S_{relativo} é sensível às alterações na estrutura do

solo e, portanto, se correlaciona com os atributos da fração porosa, o presente estudo objetivou avaliar as alterações físicas de um Cambissolo sob cultivo de abacaxi e verificar a correlação que existe entre o índice S_{relativo} e atributos relacionados com a fração porosa (densidade do solo, porosidade, permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade dos poros).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do abacaxi

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L. Merrill) pertence à família Bromeliaceae e tem sua origem no continente americano (Brasil e Paraguai). É uma monocotiledônea, herbácea e perene. Apresenta sistema radicular profuso e pequeno, alcançando até 15 cm de profundidade; o caule apresenta gemas que garantem a reprodução da planta (SEAGRI, 1999).

Sendo uma planta de clima tropical, o abacaxi apresenta crescimento ótimo e melhor qualidade do fruto na faixa de temperatura de 22 a 32 °C, com amplitude térmica diária de 8 a 14 °C, e chuvas de 1.200 a 1.500 mm anuais, bem distribuídas. A planta exige boa luminosidade, com insolação anual ótima de 2.500 a 3.000 horas, ou seja, 6,8 a 8,2 horas de luz solar por dia. Umidade relativa do ar média anual de 70% ou superior é desejável (EMBRAPA, 2003).

O abacaxizeiro é muito sensível ao encharcamento do solo, que pode prejudicar o seu crescimento e produção. Portanto, boas condições de aeração e de drenagem do solo são requisitos básicos para o seu cultivo, inclusive por favorecerem o desenvolvimento do sistema radicular da planta. É importante a escolha de um terreno plano ou de pouca declividade (até 5%), de preferência com profundidade efetiva acima de 70 cm, textura média (areno-argilosa) ou arenosa, pH 4,5 a 5,5 e de fácil drenagem (EMBRAPA, 2003).

2.2 Qualidade do solo

A discussão sobre qualidade do solo se intensificou no início dos anos 1990, quando a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental, começou a externar nas publicações a preocupação com a degradação dos recursos naturais, a sustentabilidade agrícola e a função do solo nesse contexto (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Indicadores de qualidade do solo são propriedades, processos e características físicas, químicas e biológicas que, após quantificação, passam a ser usadas para monitorar mudanças na qualidade do solo. A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade ou especificidade do solo de exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e humana de uma maneira sustentável (DORAN; PARKIN, 1994).

O termo sustentabilidade comumente é empregado em definições de qualidade do solo. De acordo com Reichert, Reinert e Braida (2003), refere-se àquilo que se pode sustentar, isto é, conservar a mesma posição. Assim, pode-se definir sustentabilidade como a propriedade de algo que se autossustenta ou que deve ser sustentado. No entanto, o sistema solo-planta é um sistema termodinâmico aberto em que ocorrem trocas de energia e matéria com o meio envolvente e há produção de entropia, caracterizando um estado de não equilíbrio (ADDISCOTT, 2010).

O conceito de qualidade do solo tem várias abordagens entre pesquisadores da área de ciência do solo. Segundo Larson e Pierce (1994) a qualidade do solo como uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas que fornece os meios para a produção vegetal e animal, para regular o fluxo de água no ambiente e para servir como um filtro ambiental na atenuação e degradação de componentes ambientalmente danosos ou perigosos.

Embora seja amplamente aceita que a qualidade do solo é consequência de aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, há, amiúde, uma negligência com relação aos aspectos físicos, o que, na opinião de Dexter (2004a), caracteriza-se em um grande equívoco, haja vista que o declínio da qualidade física dos solos é evidente em áreas agrícolas, influenciando, inclusive, em suas condições químicas e biológicas. Além disso, as condições químicas e biológicas do solo podem ser mal interpretadas na ausência de seus aspectos físicos. Há, também, a recomendação da inclusão de indicadores visuais na avaliação da qualidade do solo (USDA, 1996).

Definir e quantificar a qualidade do solo não tem sido uma tarefa fácil, uma vez que este conceito é bastante amplo e se refere a uma gama de atributos que são dependentes de interações no ecossistema e da variabilidade espacial e temporal (LIMA; PILLON; LIMA, 2007).

2.3 Indicadores de qualidade física do solo

Por ser impraticável a medição de todas as propriedades do solo, foi proposto um grupo mínimo de variáveis do solo que permitam, quando mensuradas, avaliar a qualidade do solo (USDA, 2001). Evidentemente que condições específicas exigem indicadores específicos, de tal modo que é possível haver variação de indicadores de local a local, não invalidando, porém, o caráter universal dessa proposta.

A proposta de indicadores de qualidade física do solo feita por USDA (1996) inclui espessura da camada superficial, textura, densidade do solo, porosidade, estabilidade dos agregados, encrostamento e compactação, relacionados com limitação ao crescimento radicular, emergência de plântulas, infiltração da água no solo e movimento de água dentro do perfil. O USDA (2001) relaciona estrutura do solo (relacionada com a retenção e transporte de água e nutrientes, habitat para microrganismos, erosão), profundidade do solo e de raízes (estimativa de produtividade potencial, compactação), infiltração e densidade do solo (movimento de água, porosidade e trabalhabilidade do solo), capacidade de armazenagem e disponibilidade de água. Esses, e mais outros, são os indicadores de qualidade física do solo utilizados por pesquisadores. Não obstante, os indicadores mais utilizados, por apresentarem maior correlação com o comportamento agrícola do solo, são aqueles diretamente ligados à sua estrutura.

Para Jong van Lier (2012), diversos indicadores simples de qualidade física do solo têm sido propostos e testados em relação a conjuntos de dados experimentais, sendo distinguidos em indicadores objetivos (imediatos), que são objetivamente definidos e mensuráveis - por exemplo, estabilidade de agregados e densidade do solo -, e os subjetivos (mediatos), que dependem da definição de outras grandezas para serem determinados - por exemplo, o teor de água disponível e o intervalo hídrico ótimo. Ressalta ainda que o uso desses indicadores de qualidade do solo é, implicitamente, de origem empírica e permite, no máximo, uma avaliação relativa da sua qualidade em função de determinado manejo, mas dificilmente tem-se a abrangência para comparar a qualidade absoluta de solos diversos.

A estrutura do solo é, talvez, a sua característica mais importante. Dela dependem a infiltração da água no solo, a capacidade de armazenamento e de fluxo de água, aeração, temperatura do solo e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. A biota e seus produtos orgânicos contribuem para o desenvolvimento da estrutura e, conseqüentemente, para um controle na dinâmica do carbono orgânico presente no solo. O tempo de residência

do carbono orgânico e a taxa de decomposição são fatores chave que influenciam o aumento efetivo da agregação. O cultivo intensivo do solo e o seu preparo em condições inadequadas de umidade são os principais responsáveis pela degradação de sua estrutura (BRONICK; LAL, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2011).

2.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo é um atributo físico sensível às diferentes práticas de manejo e sua alteração pode ser detectada em uma pequena escala temporal (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Sua influência vai desde a distribuição do espaço poroso do solo, com eventuais reduções em macroporosidade e aumentos de microporosidade, até a dinâmica da água no solo, modificando de forma negativa a permeabilidade do solo e taxa de infiltração de água, refletindo maior susceptibilidade à erosão (LIMA *et al.*, 2005; BERTOL *et al.*, 2004). A densidade do solo apresenta correlação positiva com a microporosidade e negativa com a macroporosidade e porosidade total (CUNHA *et al.*, 2011).

Comumente, a densidade é o parâmetro utilizado para descrever a compactação do solo. Se o solo é compactado, há um acréscimo na densidade do solo e um proporcional decréscimo na porosidade. No entanto, valores absolutos são incompatíveis para caracterização da compactação do solo em relação à produtividade da cultura quando se compara diferentes solos, uma vez que os valores ótimos e críticos de densidade para o desenvolvimento das culturas são dependentes do tipo de solo (KELLER; HÅKANSSON, 2010). A manutenção de uma adequada quantidade de material orgânico no solo resulta em formação de agregados estáveis, aumentando o índice de agregação, reduzindo a densidade do solo e a resistência à penetração do solo (CELIK *et al.*, 2010).

2.3.2 Porosidade

É um índice que quantifica a fração do volume do solo ocupada por poros e apresenta relação inversa à densidade do solo. Libardi (2012) cita que o tamanho do poro é caracterizado como o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo

poro. A classificação dos poros do solo é definida empiricamente, de acordo com Richards (1965), em microporos, poros cujo diâmetro é inferior a 50 μm , e macroporos, os que apresentam diâmetro maior ou igual a 50 μm .

As raízes das plantas necessitam encontrar no solo um ambiente favorável, a fim de que possam desenvolver-se de modo adequado a exercer suas funções. Esse ambiente favorável é refletido pela estrutura do solo, a qual deve permitir o ótimo desenvolvimento radicular, favorecer a permanência de água em quantidades necessárias às plantas e facilitar a aeração do solo (TORMENA *et al.*, 1998).

A distribuição dos poros na matriz do solo desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, determinando a evolução espacial e temporal dos processos que envolvem o movimento de água no solo. Assim sendo, a distribuição dos poros por seus tamanhos condiciona o comportamento físico-hídrico do solo, influenciando sua potencialidade agrícola (CUNHA *et al.*, 2010).

Em estudo sobre a conversão de áreas naturais de cerrado em sistemas de cultivo, Wendling *et al.* (2012) concluíram que tal conversão acarretou modificação negativa na porosidade total do solo, com o sistema de plantio direto de sorgo, quando comparado com a vegetação natural, pastagem e floresta de *pinus*, apresentando a maior densidade e, conseqüentemente, menor porosidade total.

2.3.2.1 Porosidade de aeração

A porosidade de aeração, também chamada de porosidade livre de água, é um índice que revela o quanto do volume da amostra do solo é volume de ar num determinado instante (LIBARDI, 2012).

Embora o mínimo de ar no solo que possa ser considerado como limitante ao desenvolvimento das plantas dependa da geometria porosa e do nível de atividade biológica no solo (GUPTA *et al.*, 1989), já foi observado que porosidade de aeração inferior a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ limita o crescimento radicular (VOMOCIL; FLOCKLER, 1966), com consequência direta sobre a produtividade das culturas (VOORHEES, 1983).

A porosidade de aeração destaca-se, portanto, como uma das propriedades mais importantes em relação ao desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas (TORMENA *et al.*, 1998).

Bavoso *et al.* (2012) avaliaram a resiliência física de dois Latossolos sob sistema de plantio direto em distintos estados de compactação e submetidos a quatro ciclos de umedecimento e secamento. A porosidade de aeração apresentou uma recuperação parcial após os ciclos, que pode estar correlacionada a solos com maior teor de argila, pois estes apresentam maior resiliência em relação à estrutura porosa que solos arenosos.

2.3.3 Curva de retenção de água no solo

É a representação gráfica da relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão ou potencial mátrico correspondente. Tem uma aplicabilidade muito ampla, por exemplo, em estudos da distribuição dos poros por tamanho, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, condutividade hidráulica e balanço hídrico. Além disso, dela derivam indicadores físicos da qualidade do solo, por exemplo, índices S e S_{relativo} (LIBARDI, 2012; SÁ *et al.*, 2010; FREIRE, 2012).

A distribuição do tamanho de poros no solo pode ser obtida por meio da curva de retenção. No entanto, Collis-George (2012) chama a atenção sobre a limitação dos resultados obtidos por meio da utilização dessa técnica em que pode haver subestimação e superestimação da dimensão e quantidade de poros.

É importante ressaltar que o arranjo poroso do solo, resultante do modo como se deu a estruturação, tem maior influência sobre o comportamento da curva de retenção de água no solo em sua faixa mais úmida, tensões menores ou iguais à 100 kPa. À medida que o solo vai perdendo água, a estrutura vai perdendo importância e surge um novo componente – a textura do solo – com maior influência na relação teor de água e energia com que a água se encontra no solo. A curva de retenção de água no solo não é uma constante, sendo a textura, estrutura e a histerese os fatores mais influentes em seu comportamento (REICHARDT; TIMM, 2012; AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008).

A curva de retenção de água pode ser obtida pelo processo de secagem da amostra previamente saturada ou por umedecimento gradual da amostra. As curvas obtidas por esses dois processos podem apresentar alguma diferença, devido ao fenômeno da histerese, que pode ser atribuído à não uniformidade dos poros individuais com relação a fenômenos capilares, bolhas de ar que permanecem fixas nos macroporos e a contração e expansão de

argilas durante o secamento e o molhamento (COSTA; OLIVEIRA; KATO, 2008; REICHARDT; TIMM, 2012).

O método clássico de determinação da curva de retenção é por meio do uso da câmara de pressão de Richards. A determinação do ponto de equilíbrio entre pressão aplicada e a água retida no solo, contato amostra-placa, o longo tempo de medida exigido para as medidas e o custo do equipamento são algumas dificuldades associadas ao método (TAVARES *et al.*, 2008). Uma forma simplificada para obtenção da curva de retenção de água é por meio da utilização de funções de pedotransferência (SILVA *et al.*, 2008).

No ajuste da curva de retenção, quanto maior o número de pontos, mais representativa esta será, e mais oneroso é o levantamento. Na seleção dos pontos para o traçado da curva de retenção não existe critério padronizado; portanto, sem um critério de seleção estatístico definido, curvas de retenção de água não representativas podem ser obtidas (SILVA *et al.*, 2006).

2.3.4 Índice S

Definido como sendo igual à inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, o índice S, proposto por Dexter (2004a; 2004b; 2004c), é mais um indicador de qualidade física do solo. Para Dexter e Bird (2001), o conteúdo de água ótimo para o cultivo encontra-se próximo ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo.

A interpretação dos resultados obtidos para este índice classifica o solo como sendo muito bom ($S \geq 0,050$); bom ($0,050 > S \geq 0,035$); ruim ($0,035 > S \geq 0,02$) e muito ruim ($S < 0,02$). O limite entre solos com boa e má qualidade estrutural ocorre em valor de $S = 0,035$. Deve-se salientar que estes valores são arbitrários e obtidos para solos poloneses (DEXTER, 2004a; DEXTER, 2004c).

Para solos do cerrado brasileiro, o valor do índice S mais apropriado à divisão entre o solo de boa qualidade estrutural e solo com tendência a se tornar degradado é de 0,045, enquanto que valores de S menores que 0,025 indicam solos muito degradados fisicamente (ANDRADE; STONE, 2009).

Maiores valores de S são indicativos de solos com melhor estruturação e, conseqüentemente, melhor distribuição do espaço poroso; no ponto de inflexão é mensurada a

porosidade microestrutural do solo, que pode ser utilizada como indicativo de qualidade, uma vez que essa é facilmente alterada pelo manejo (DEXTER, 2004a). Apesar de o índice S não apresentar valores limite de qualidade física que independam do tipo de solo e ambiente, este pode ser devidamente utilizado para comparar, dentro de um mesmo pedossistema, um solo sob diferentes usos ou manejos agrícolas (JONG VAN LIER, 2012).

Dexter e Czyz (2007) observaram a capacidade do S em quantificar as propriedades físicas do solo, relacionando a qualidade estrutural e o crescimento de plantas, além da capacidade do S em prever sobre a condutividade hidráulica, a compactação, o efeito do cultivo na produção de torrões, a resistência à penetração de raízes, a disponibilidade de água para as plantas e a estabilidade do solo.

O índice S, embora seja um indicador de qualidade física recém desenvolvido, tem tido uma boa aceitação perante os pesquisadores, principalmente os brasileiros, como evidencia Jong van Lier (2012). Diversos estudos têm demonstrado a viabilidade da sua utilização como indicador de qualidade física do solo, apesar deste não ter sido desenvolvido para solos brasileiros (ARAUJO-JUNIOR *et al.*, 2013; CUNHA *et al.*, 2011; FREIRE, 2012; PEREIRA *et al.*, 2012).

Em sistema de plantio direto as plantas de cobertura afetam favoravelmente o índice S ao criarem poros biológicos de alta funcionalidade na aeração e infiltração de água no solo (ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2009). Cunha *et al.* (2011), visando determinar a influência das plantas de cobertura nos atributos físicos do solo, afirmam que o índice S mostrou-se adequado como indicador de qualidade física, pois se correlacionou de maneira significativa e negativamente com a densidade do solo, microporosidade, resistência à penetração, e positivamente com a macroporosidade, porosidade total e teor de matéria orgânica do solo. Silva *et al.* (2012), demonstram que o índice S apresentou uma boa correlação com a densidade e porosidade do solo, em um estudo visando mensurar a qualidade estrutural de um Latossolo submetido a manejo intensivo.

Para Pereira *et al.* (2012), já existem evidências da degradação do solo pelo seu uso intensivo e manejo inapropriado na área do Jaguaribe-Apodi, no estado do Ceará. Avaliando se este uso do solo nas áreas irrigadas causou a degradação das propriedades físicas sensíveis, os autores utilizaram o índice S e demonstraram que este foi sensível ao avaliar as diferentes áreas de cultivo em relação à vegetação natural, obtendo valores significativamente menores para solos cultivados.

Embora haja boa aceitação com relação ao índice S, ainda existem lacunas a serem preenchidas a seu respeito. Freire (2012) chama atenção para limitações relacionadas

ao índice, quando este é utilizado para distinguir efeitos relacionados a sistemas de manejo de solos pertencentes à classe arenosa.

Uma série de fatores podem influenciar no valor do índice S. Existe diferença no valor do S quando se utiliza a umidade do solo com base em volume ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em vez da umidade com base em massa (kg kg^{-1}), sugerida por Dexter (2004a), e, para mesma unidade de medida da umidade do solo, não há diferença nos valores do S para qualquer unidade de tensão. No entanto, a não utilização da transformação de $\ln(h)$ acarreta menores valores para o índice (MAIA, 2011).

Araujo-Junior *et al.* (2013) utilizaram a curva de retenção de água no solo, base volume, para melhorar as respostas do índice S à compactação do solo, pois a compactação ocasionou uma modificação no conteúdo de água volumétrico, enquanto que o conteúdo gravimétrico não sofreu alteração. Sugerem ainda que, para a utilização da unidade com base em volume, sejam alterados os valores de referência. Para a definição do limite inferior de referência, foram obtidas regressões lineares entre a macroporosidade (adotando-se $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como volume crítico de aeração) e o índice S.

2.3.5 Índice S_{relativo}

O índice S_{relativo} (FREIRE, 2012) é definido como a razão entre o valor do índice S obtido com a curva de retenção de água no solo, considerando a estrutura do solo não deformada, e o S de referência, cuja obtenção se dá a partir da curva de retenção de água no solo elaborada utilizando amostra com estrutura deformada. A curva de referência representa a situação em que a retenção de água no solo é influenciada unicamente pelo arranjo das partículas em função da textura do solo. Desta forma, o S_{relativo} possibilita separar o efeito da porosidade estrutural na curva de retenção de água do solo.

A interpretação para este indicador é que, se o S_{relativo} apresentar maior valor, o solo tem melhor qualidade física. Em síntese, o valor de S_{relativo} acima e abaixo de 1 indica, respectivamente, melhora e piora da estrutura do solo em relação à situação de referência; valor igual a 1 indica que a estrutura do solo não é alterada (FREIRE, 2012).

Avaliando índices de qualidade física para um Cambissolo em sistema de manejo, Freire (2012) afirma que o índice S_{relativo} mostrou ser sensível para distinguir os sistemas de

manejo do solo e também profundidades dentro de um mesmo sistema. O S_{relativo} detectou diferença significativa entre as camadas, fato que não foi possível perceber pelo índice S.

2.3.6 Permeabilidade ao ar e índice de continuidade de poros

A permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) representa a facilidade com que o solo pode efetuar trocas gasosas, sendo que a organização estrutural, umidade, conectividade entre poros, tamanho e quantidade, são parâmetros influentes na sua determinação. Deste modo, a K_{ar} pode ser utilizada para avaliar possíveis alterações decorrentes da adoção de diferentes manejos (CAVALIERI *et al.*, 2009) e caracterizar a porosidade do solo (IVERSEN *et al.*, 2001).

O resultado das alterações estruturais decorrentes do tráfego de máquinas e de animais, bem como dos sistemas de uso e manejo dos solos e culturas, é encontrado na modificação da macroporosidade do solo, responsável pelo processo de drenagem da água e fluxo de gases no solo (MOREIRA *et al.*, 2012).

O aumento do conteúdo de água no solo reduz o volume de poros ocupados por ar, bem como os canais condutores de ar (RODRIGUES *et al.*, 2011), ou seja, a permeabilidade ao ar apresenta uma relação direta, porém, inversamente proporcional com o conteúdo de água presente no solo (SILVA *et al.*, 2009).

Tang *et al.* (2011), ao analisarem os efeitos de parâmetros do solo sobre a permeabilidade do solo ao ar, afirmam que esta tem sido reconhecida como um dos parâmetros mais adequados para avaliação do grau de compactação dos solos. Ainda neste estudo, concluíram que a permeabilidade ao ar decresce à medida que a porosidade de aeração decresce e a saturação relativa aumenta.

McQueen e Shepherd (2002) sugerem que o limite crítico da permeabilidade do solo ao ar seja de 10^{-12} m^2 ($K_{ar} = 1 \text{ } \mu\text{m}^2$); valores inferiores a este podem ser limitantes para o crescimento das plantas (SILVA *et al.*, 2009).

Leite (2011) observou que a permeabilidade do solo ao ar não se mostrou sensível às diferenças entre os atributos físicos dos tratamentos ao estudar a qualidade física do solo cultivado com goiabeira irrigada na Chapada do Apodi, quando comparado com uma mata nativa. Ressalta-se que, mesmo a área de mata apresentando maior quantidade de macroporos, não foi constatada maior permeabilidade ao ar neste solo. Para Cavalieri *et al.* (2009), a

continuidade e conectividade dos poros é mais importante do que o volume de poros e macroporos.

Há um índice de continuidade de poros (K_1) proposto por Groenevelt, Kay e Grant (1984) a partir da razão entre a permeabilidade ao ar (K_{ar}) e a porosidade de aeração (ε_{ar}). De acordo com os mesmos autores, esta razão é uma técnica útil para determinar se as variações do K_{ar} podem ser atribuídas somente às diferenças da porosidade de aeração ou estão relacionadas com aspectos geométricos da porosidade, tais como tortuosidade, tamanho, distribuição e continuidade. Vale ressaltar que a tortuosidade dos poros influencia o transporte de água, soluto e gases no solo (MOLDRUP *et al.*, 2001).

Freire (2012), estudando a qualidade física do solo sob cultivo de mamoeiro irrigado na Chapada do Apodi, com o intuito de avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo (cultivo em camalhão e em sulco), afirma que os valores do índice de continuidade de poros, em consonância com a permeabilidade ao ar, contribuíram para a melhor qualidade física do sistema de cultivo em camalhão em comparação à mata nativa, relacionando esta melhora à maior macroporosidade apresentada no sistema sob cultivo. Para a permeabilidade ao ar houve uma tendência de redução em profundidade para os sistemas cultivados, fato que não ocorreu para a mata, em que todas as camadas foram semelhantes. Essa variabilidade é explicada por o sistema sob cultivo ter as camadas superficiais revolvidas, e as mais profundas permanecerem intactas, igualmente à mata.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

A área avaliada quanto à qualidade física do solo está localizada na Chapada do Apodi, no município de Limoeiro do Norte. O clima da região é caracterizado como quente e semiárido. Apresenta temperatura média anual de 28,5 °C, mínima de 22 °C e máxima de 35 °C. A precipitação média anual é de 772 mm com distribuição irregular do período chuvoso e a insolação é de 3.030 horas/ano. Pela energia disponível, há uma possibilidade de que a evapotranspiração possa atingir até 3.215 mm; a umidade relativa média anual é em torno de 62%. O relevo é plano, apresentando declividade dominante inferior a 2% (DNOCS, 2012).

3.2 Caracterização da área experimental

Trata-se de uma área cultivada de forma convencional há oito anos com abacaxi (*Ananas comosus* L. Merrill), cultivar Pérola. O preparo do solo consiste sempre de uma aração e uma gradagem, visando facilitar o plantio e desenvolvimento radicular do abacaxizeiro. O solo é classificado como Cambissolo (IPECE, 2012). O espaçamento utilizado é de 80 cm x 50 cm, entre linhas e entre plantas, respectivamente. O suprimento de água se dá, via de regra, por sistema de irrigação do tipo gotejamento. A aplicação dos nutrientes ocorre via fertirrigação, utilizando sulfato de magnésio, ureia, sulfato de potássio e 300 litros de composto orgânico semanalmente. A mata, aqui denominada mata secundária, por ter sido cultivada em época remota, dista cerca de 1000 m da área cultivada com abacaxi.

3.3 Amostragem

Para fins de avaliação da qualidade física foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e indeformada levando em consideração duas situações do solo: sob

cultivo e sob mata secundária (Figura 1), até a profundidade de 0,3 m, nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Além da coleta destas amostras, com o objetivo de abranger a maior variação possível de densidade do solo, também foram coletadas na área experimental (inclusive nos locais por que passam os rodados das máquinas e implementos, na camada de 0,0-0,1 m) mais 10 amostras de solo com estrutura indeformada.

Figura 1 - Vista superior da área experimental.



Fonte: Google Earth (A = abacaxi, M = mata).

As amostras com estrutura indeformada foram coletadas utilizando amostrador tipo Uhland, em anéis de aço (0,05 m de altura x 0,05 m de diâmetro). Após coleta, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará – UFC, para a realização das análises físicas (granulometria, densidade de partículas e do solo, permeabilidade intrínseca do solo ao ar e curva de retenção de água).

3.4 Análises laboratoriais

3.4.1 Granulometria

Determinada pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). Utilizou-se hidróxido de sódio (NaOH) 1 N para a dispersão de 20 g de terra fina seca ao ar (TFSA). O silte e argila foram separados por sedimentação, de acordo com a Lei de Stokes.

3.4.2 Densidade das partículas

Determinada pelo método do balão volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986a), que tem por princípio determinar o volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico, contendo 20 g de terra fina seca em estufa à 105 °C (TFSE).

3.4.3 Densidade do solo

Determinada em amostras de solo com estrutura indeformada, coletadas com amostrador tipo Uhland (utilizando cilindros de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro) e secas a 105 °C até massa constante (BLAKE; HARTGE, 1986b).

3.4.4 Porosidade

Conhecendo-se a densidade do solo e de partículas, calculou-se a porosidade pela equação

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right), \quad (1)$$

sendo α a porosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ρ_p e ρ_s as densidades de partículas e do solo (kg m^{-3}), respectivamente. A microporosidade (poros com diâmetro $<50 \mu\text{m}$) foi determinada mediante aplicação de tensão de 6 kPa, em que os poros com diâmetro igual ou superior a $50 \mu\text{m}$ são drenados até que seja atingido o equilíbrio. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (DANIELSON e SUTHERLAND, 1986).

A porosidade de aeração (ε_{ar}) foi determinada pela equação

$$\varepsilon_{ar} = \alpha - \theta, \quad (2)$$

sendo α a porosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ a umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo.

3.4.5 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar foi determinada baseando-se no método da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946; NEVES *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2009; SILVEIRA *et al.*, 2011). Pelo anel volumétrico, contendo a amostra de solo com estrutura indeformada, equilibrada nas tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 kPa, fez-se passar uma quantidade de ar correspondente a uma pressão no reservatório de 1 kPa. Ao atingir o equilíbrio, foi medido o tempo gasto para o ar passar através da amostra; todas as medidas foram tomadas eletronicamente utilizando-se o software *PermeAr v.1.0* (SILVEIRA *et al.*, 2011). O coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}) foi determinado a partir da equação

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad (3)$$

sendo K_{ar} o coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2), V o volume de ar no reservatório (m^3), η a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s), L a altura do anel volumétrico (m), A a secção transversal da amostra de solo (m^2), P_{atm} a pressão atmosférica (Pa) e S o coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

3.4.5.1 Índices de continuidade dos poros

Os valores de permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) foram relacionados aos valores de porosidade de aeração (ε_{ar}) utilizando-se a equação de Kozeny-Carman de um modo semelhante ao de Ahuja *et al.* (1984),

$$K_{ar} = M\varepsilon_{ar}^N, \quad (4)$$

sendo M e N constantes empíricas. Os autores consideraram o valor de N como um índice de continuidade de poros, o qual reflete o aumento da permeabilidade intrínseca do solo ao ar, K_{ar} , com o aumento da porosidade de aeração, ε_{ar} , ou a diminuição da tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo. A porosidade de aeração ε_{ar} corresponde à diferença entre a porosidade total estimada pela equação (1) e o conteúdo de água medido em cada potencial. A relação de K_{ar} e ε_{ar} foi ajustada para a forma logarítmica da equação (4)

$$\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}. \quad (5)$$

De acordo com Rodrigues *et al.* (2011), na equação (5), a relação linear pode ser caracterizada pela inclinação da reta (N), pelo intercepto com o eixo $\log K_{ar}$, no qual o $\log \varepsilon_{ar} = 0$ (M), e pelo intercepto com o eixo $\log \varepsilon_{ar}$, em que $\log K_{ar} = 0$ (ε_b). O intercepto com o eixo $\log \varepsilon_{ar}$ (em que $K_{ar} = 1 \mu\text{m}^2$) é definido como a permeabilidade ao ar limitante e foi mencionado por Ball *et al.* (1988) e Schjønning *et al.* (2002) como o volume de poros de aeração bloqueados no solo que não faz parte do transporte convectivo de ar. Assim, ε_b é o valor de porosidade de aeração ε_{ar} abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa em consequência da descontinuidade da rede de poros de aeração. Partindo da equação (4), ε_b foi obtido pela equação

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N}. \quad (6)$$

Também foi utilizado o índice de continuidade de poros K_1 , proposto por Groenevelt, Kay e Grant (1984), a partir da razão entre K_{ar} e ε_{ar}

$$K_1 = \frac{K_{ar}}{\varepsilon_{ar}}. \quad (7)$$

3.4.6 Curva de retenção de água no solo

Para as amostras com estrutura deformada, utilizadas para a determinação do índice S_{relativo} , a curva de retenção de água foi obtida considerando o conteúdo de água na saturação igual à porosidade total do solo; para os pontos de baixas tensões (2, 4, 6, 8 e 10 kPa), o conteúdo de água foi determinado mediante o uso do funil de Haines; os demais pontos (33, 100, 700 e 1500 kPa), em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). O ajuste da curva foi feito pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980),

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad (8)$$

em que θ_r e θ_s são, respectivamente, os conteúdos de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa), α um escalonador do ϕ_m , e m e n parâmetros relacionados ao formato da curva. Para o ajuste dos dados, foi utilizado o software Soil Water Retention Curve (SWRC), versão 3.0 (beta), fixando-se as variáveis θ_s e θ_r , sendo estas, respectivamente, o conteúdo de água correspondente à saturação e umidade residual (esta obtida na tensão de 1500 kPa). Adotou-se o método iterativo de Newton-Raphson para o ajuste dos parâmetros α , m e n , sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO *et al.*, 2001).

Para o cálculo da água disponível para as plantas (AD), foram consideradas a umidade na condição de capacidade de campo (CC), na tensão de 10 kPa, e a umidade no ponto de murcha permanente (PMP), que corresponde à umidade residual (θ_r), na tensão de 1500 kPa, pela equação

$$AD = CC - PMP. \quad (9)$$

3.4.7 Índice S

Quanto ao índice S, Dexter e Czyz (2007) sugerem que, a partir da equação de van Genuchten (1980), pode-se escrever o conteúdo de água gravimétrico (u) como uma função do potencial mátrico

$$u = (u_{sat} - u_{res}) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} + u_{res} . \quad (10)$$

Para o cálculo do índice S, primeiramente, deve-se derivar a equação (10) duas vezes em relação ao logaritmo da tensão ($\ln h$) e, igualando-a a zero, obtém-se o módulo do potencial de água (h_i) no ponto de inflexão como sendo

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{m} \right]^{\frac{1}{n}} . \quad (11)$$

Substituindo-se o resultado da equação (11) na equação (10), tem-se o conteúdo de água no ponto de inflexão (u_i) dado por

$$u_i = (u_{sat} - u_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + u_{res} . \quad (12)$$

Dessa forma, a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão (índice S) é calculada em termos dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) pela equação

$$S = -n(u_{sat} - u_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} . \quad (13)$$

3.4.8 Índice $S_{relativo}$

O $S_{relativo}$ foi obtido a partir da razão

$$S_{relativo} = \frac{S_{estrutura\ não\ deformada}}{S_{estrutura\ deformada}} , \quad (14)$$

em que o $S_{estrutura\ não\ deformada}$ se refere ao manejo considerado e o $S_{estrutura\ deformada}$ à referência.

O S utilizado como referência foi obtido a partir da curva de retenção de água para o solo da mata secundária, construída por meio de amostra de solo com estrutura deformada. Para tal, duas amostras de TFSA de cada camada, previamente tamisadas em peneira com abertura da malha de 2 mm, foram acondicionadas em anéis de aço (0,05 m de altura x 0,05 m de diâmetro). A disposição deu-se de modo que as partículas se arransassem normalmente, sem a necessidade de preestabelecer um valor de densidade.

Os parâmetros de ajuste dos dados ao modelo de van Genuchten (1980) foram obtidos por meio da rotina “Solver” do software Microsoft Excel®. As variáveis u_r e u_s foram fixadas, sendo, respectivamente, a umidade residual obtida na tensão de 1500 kPa e umidade na saturação, ambas à base de massa. Os parâmetros α , m e n foram ajustados pelo método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO *et al.*, 2001).

3.4.9 Análise estatística

Todos os dados foram inicialmente analisados pela estatística descritiva para verificar a existência de valores periféricos (“outliers”) que comprometessem o comportamento médio dos parâmetros avaliados. O delineamento estatístico adotado foi o inteiramente casualizado com esquema em parcelas subdivididas 2x3x5 (duas situações de solo: sob cultivo e mata secundária; três camadas de solo: 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m; cinco repetições). Também foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados, F para a análise de variância e de Tukey para a comparação de médias dos tratamentos, todos a 5% de probabilidade (SILVA, 2013).

Foram utilizadas técnicas multivariadas para melhor analisar o conjunto de dados das variáveis em estudo (XLSTAT, 2013). Os atributos considerados, para as camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, de ambas as situações de solo, foram: argila, silte, areia, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}), índices de continuidade de poros (K_1 e N), índice S e índice $S_{relativo}$. O conjunto de dados, com distribuição normal, foi padronizado ($\mu = 0$; $\sigma^2 = 1$) para se dar o mesmo peso a cada variável. Após este procedimento, utilizou-se a técnica de análise dos componentes principais (ACP) e a análise de agrupamentos (AA).

A ACP foi realizada levando-se em consideração o nível de 5% de significância, com a correlação de Pearson sendo utilizada para a criação da matriz de similaridade e posterior obtenção dos autovalores e autovetores. Para a AA, considerou-se a distância euclidiana como método de medição da dissimilaridade entre os dados e o método de Ward para o agrupamento.

Os dados de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, $\log K_{ar}$, K_1 e índice S obtidos com as 10 amostras coletadas além daquelas pertinentes aos tratamentos foram considerados em conjunto com os obtidos com as cinco amostras da camada superficial do solo cultivado e com as cinco amostras da camada superficial do solo sob mata secundária, totalizando, portanto, dados de 20 amostras. Foram descartadas 4 amostras desse conjunto. Em seguida, foram realizadas análises de regressão (considerando o modelo de regressão linear) e de correlação para verificar a relação entre o índice $S_{relativo}$ (variável dependente) e cada atributo da fração porosa do solo (variável independente). Aplicou-se o teste t, aos níveis de 1 e 5% de probabilidade, para testar a significância dos coeficientes angular (b) e de correlação (r).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Textura do solo

A composição granulométrica dos solos é apresentada na Figura 2. Os teores de argila apresentaram diferença significativa dentro de cada camada do solo na área sob cultivo de abacaxi e na mata secundária, com exceção da camada de 0,0-0,1 m. O mesmo comportamento foi evidenciado na fração areia, que, por sua vez, apresentou maior teor na camada superficial, decrescendo à medida em que aumentava a profundidade e os teores de argila. Para o silte, ocorreu interação entre os sistemas e camadas avaliadas apenas para a camada de 0,0-0,1 m. Os quadros contendo as análises de variância e teste F para argila, areia e silte estão presentes nos apêndices A, B e C, respectivamente.

O aumento de argila em profundidade para a área sob cultivo de abacaxi está relacionado ao manejo adotado, uma vez que este apresenta influência direta na eluviação de argila em profundidade, como já relatado por Centurion *et al.* (2004) e Fuller *et al.* (1995). Dantas *et al.* (2012), avaliando as alterações nos atributos físicos e químicos de um Cambissolo Vermelho Amarelo eutrófico típico sob diferentes usos e manejos no perímetro irrigado Jaguaribe/Apodi - Ceará, observaram que em áreas cultivadas irrigadas ocorreram maiores valores de argila dispersa em água, quando comparadas com suas respectivas matas nativas.

Com base na análise granulométrica, a classificação textural dos solos (Figura 3) foi determinada utilizando o triângulo textural contido em Santos *et al.* (2005). As camadas de 0,0-0,1 m, para o sistema da mata secundária e de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, para o abacaxi, foram classificadas como sendo de textura Franco-argilo-arenosa. As demais camadas, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, para o sistema da mata, e 0,2-0,3 m para o abacaxi, se enquadraram na classe de textura Franco-argilosa.

Figura 2 - Granulometria com os desvios-padrão da média, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

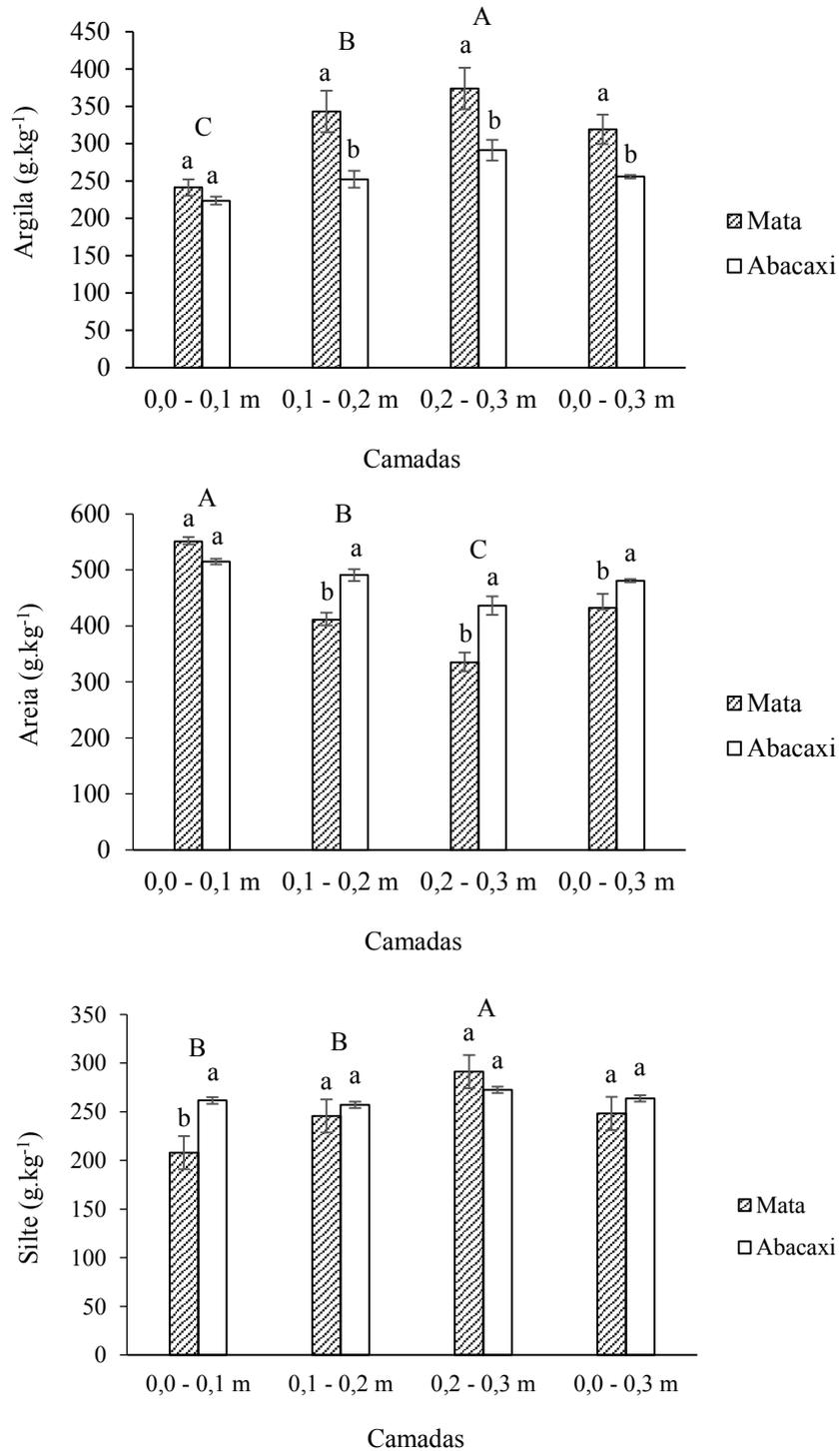
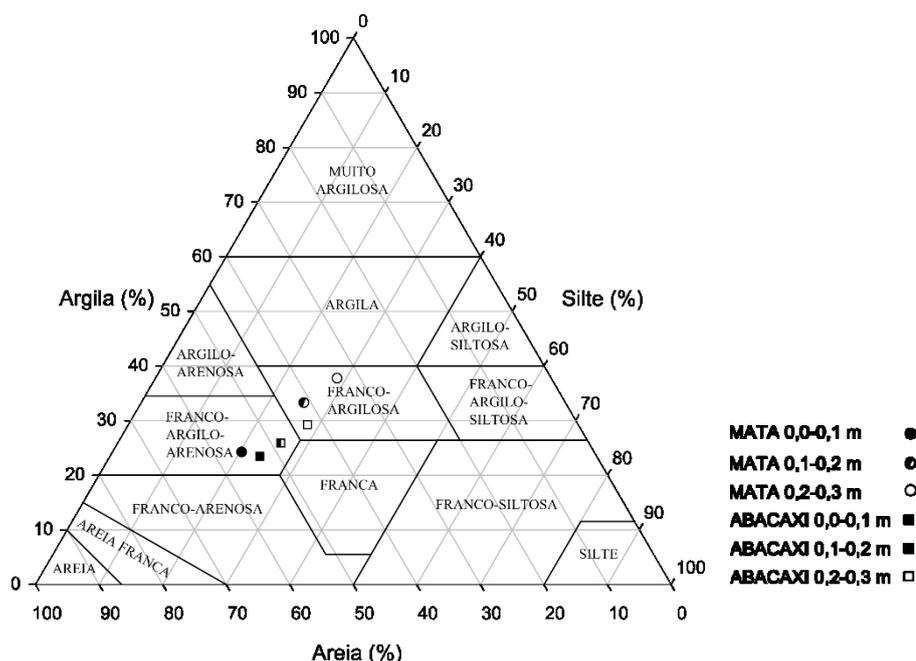


Figura 3 - Variação da classe textural nas áreas de amostragem.



4.2 Densidade do solo e de partículas

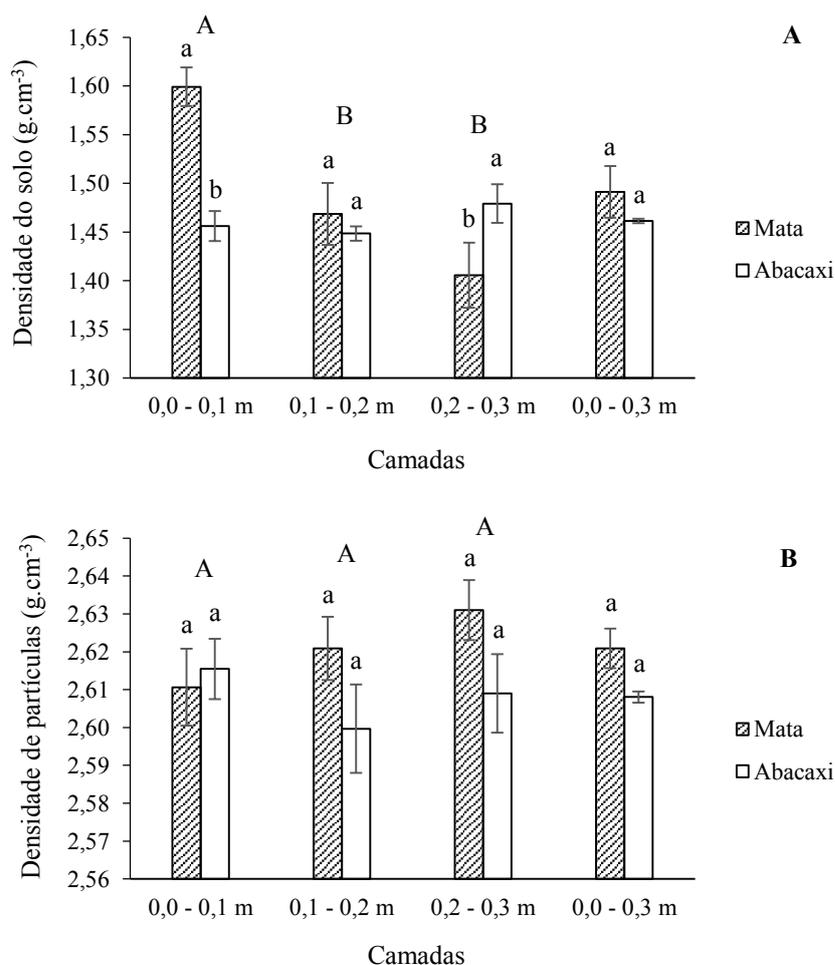
A densidade do solo (ρ_s), Figura 4A, apresentou diferença significativa entre as camadas analisadas nas distintas situações de solo. Os quadros contendo as análises de variância e teste F para densidade do solo e de partículas estão presentes nos apêndices D e E, respectivamente. De acordo com o USDA (1999), o valor de ρ_s ideal para as classes texturais encontradas seria abaixo de $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ e o limite crítico seria $1,75 \text{ g cm}^{-3}$. Os valores aqui obtidos apresentam-se acima deste valor, porém, inferiores ao limite crítico em que ocorre restrição ao desenvolvimento radicular das plantas.

Comparativamente, o sistema sob cultivo de abacaxi se apresentou com melhor condição física em relação à mata secundária. A camada de 0,0-0,1 m do solo sob mata secundária apresentou valor superior às demais, estando de acordo com os encontrados por Freire (2012), ao avaliar a qualidade física do solo sob cultivo de mamoeiro irrigado na Chapada do Apodi, em um Cambissolo.

Em estudos pretéritos realizados na mesma região e mesma classe do solo avaliado no presente estudo (MOTA *et al.*, 2008; MOTA, 2010) a densidade do solo variou de $1,46 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,67 \text{ g cm}^{-3}$, para a camada de 0,0-0,1 m, corroborando os resultados obtidos. Para Mota (2010), são comuns valores elevados de densidade do solo nas camadas superficiais nos solos da região estudada.

A análise estatística para a densidade das partículas (ρ_p) não apresentou diferença significativa, como pode ser visualizado na Figura 4B. Os valores de ρ_p estão intimamente ligados à composição mineralógica do solo e ao seu teor de material orgânico (RÜHLMANN *et al.*, 2006; LEPSCH, 2011); portanto, dependem da constituição do solo e, como esta varia relativamente pouco de solo para solo, ρ_p não varia de modo excessivo entre diferentes solos (REICHARDT; TIM, 2012). Para Mota *et al.* (2008), a densidade das partículas é um atributo estático, considerando-se que mudanças só são perceptíveis ao se considerar um longo período de tempo.

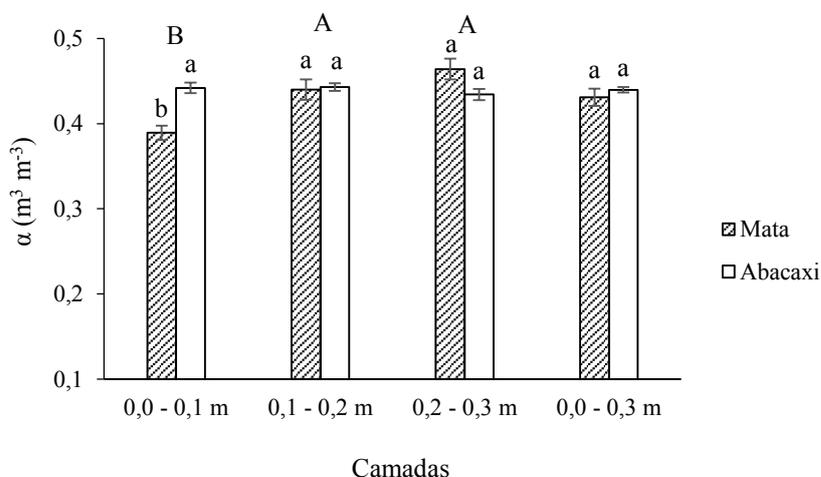
Figura 4 - Densidade do solo (A) e partículas (B), com os desvios-padrão da média, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



4.3 Porosidade do solo

A porosidade total do solo (α) é apresentada na Figura 5. Os quadros contendo a análise de variância e teste F para a porosidade total estão presentes no apêndice F. Apenas a camada de 0,0-0,10 m apresentou diferença significativa entre os valores de porosidade total para os tratamentos avaliados. Como já mencionado, seção 4.2, esta camada da mata secundária apresentou a maior ρ_s dentre todas as situações e camadas avaliadas. O valor da porosidade obtido para esta camada confirma a relação inversa existente entre a densidade do solo e a porosidade, como já observado em outros trabalhos (WENDLING *et al.*, 2012; CUNHA *et al.*, 2011).

Figura 5 - Porosidade total com os desvios-padrão da média, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



O Quadro 1 contém os valores encontrados para porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Para Kiehl (1979), a proporção ideal para a distribuição de macroporos e microporos do solo é de 1:2, ou seja, uma parte de macroporos para cada duas partes de microporos. As proporções encontradas para o presente estudo variaram de 1:2,5 a 1:4, para as áreas de abacaxi e mata secundária, respectivamente.

O volume de macroporos nas camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m para a área da mata secundária indica restrição ao desenvolvimento das culturas quando se leva em consideração o valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como referencial mínimo para a maioria das culturas (GRABLE; SIEMER, 1968). Pode-se esperar uma baixa taxa de infiltração de água e capacidade de troca

gasosa neste solo, uma vez que a aeração e drenagem são função dos macroporos (LIBARDI, 2012), além da restrição ao fluxo de nutrientes na zona de desenvolvimento radicular (SILVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2012). No entanto, o maior volume de microporos desta camada de solo lhe confere uma maior capacidade de retenção de água (RODRIGUES *et al.*, 2011) e, dependendo da energia com que está retida, essa água pode, ou não, ser prontamente disponível para as plantas.

Para a área sob cultivo de abacaxi, foram encontrados os maiores valores de porosidade total e macroporosidade, destacando-se a camada de 0,0-0,1 m, fato que é justificado pelo manejo convencional adotado no cultivo (CRUZ *et al.*, 2003; LIPIEC *et al.*, 2006), enquanto que a camada de 0,2-0,3 m da área da mata secundária apresentou o maior volume de microporos.

Quadro 1 - Volume de poros e proporção macro e microporos para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m

Sistemas	Camadas	Porosidade Total	Macroporos	Microporos	Ma:Mi
	----- m -----	----- % -----			
Mata	0,0 – 0,1	38,92	7,59	31,33	1:4,1
	0,1 – 0,2	43,99	9,63	34,36	1:3,6
	0,2 – 0,3	46,40	10,27	36,13	1:3,5
Abacaxi	0,0 – 0,1	44,20	12,26	31,93	1:2,5
	0,1 – 0,2	44,30	11,75	32,55	1:2,8
	0,2 – 0,3	43,42	11,47	31,94	1:2,8

4.4. Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros

Os valores da permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) para a tensão de 10 kPa são apresentados no Quadro 2. Utilizou-se essa tensão pelo fato de a área em estudo apresentar um sistema de irrigação por gotejamento; sendo assim, presume-se que a umidade seja mantida sempre próxima à condição da capacidade de campo. A análise estatística (Apêndice G) revelou que não houve interação significativa entre os sistemas e as camadas avaliadas.

Para o solo da mata secundária, a camada de 0,0-0,1 m apresentou maior K_{ar} , com um decréscimo em profundidade, porém, sem diferença estatística. É interessante destacar que nesta camada foi encontrada a maior ρ_s , e conseqüente menor macroporosidade para o

sistema. Visto que K_{ar} é influenciada pela porosidade de aeração, continuidade e tortuosidade dos poros, de fato esta camada apresentou uma maior conectividade entre poros, refletindo maior K_{ar} .

De forma geral, o sistema sob cultivo de abacaxi apresentou valores superiores de K_{ar} em todas as camadas avaliadas, em comparação à mata secundária. As alterações na estrutura e, conseqüentemente, no espaço poroso, decorrentes das práticas culturais adotadas (TORMENA *et al.*, 1998), influenciam na dinâmica da troca gasosa por incrementarem o volume de macroporos, resultando em maior K_{ar} (BALL *et al.*, 1998; RODRIGUES *et al.*, 2011). Freire (2012) constatou que solos cultivados, por apresentarem suas camadas superficiais revolvidas e com maior volume de macroporos, apresentam mais área disponível ao fluxo de ar em relação à mata.

Foi verificado que a camada de 0,1-0,2 m, sob cultivo de abacaxi, apresentou maior valor médio de K_{ar} que a camada de 0,0-0,1 m, refletindo alteração estrutural devido ao manejo adotado nesta camada superficial. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Silveira Júnior *et al.* (2012) ao avaliarem a qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa, sob sistema de plantio direto. Nenhuma das situações estudadas apresentou limitações ao transporte convectivo de ar ao se admitir o valor referencial de limite crítico de $K_{ar} \leq 1 \mu\text{m}^2$ ($\text{Log } K_{ar} \leq 0 \mu\text{m}^2$), proposto por McQueen e Shepard (2002).

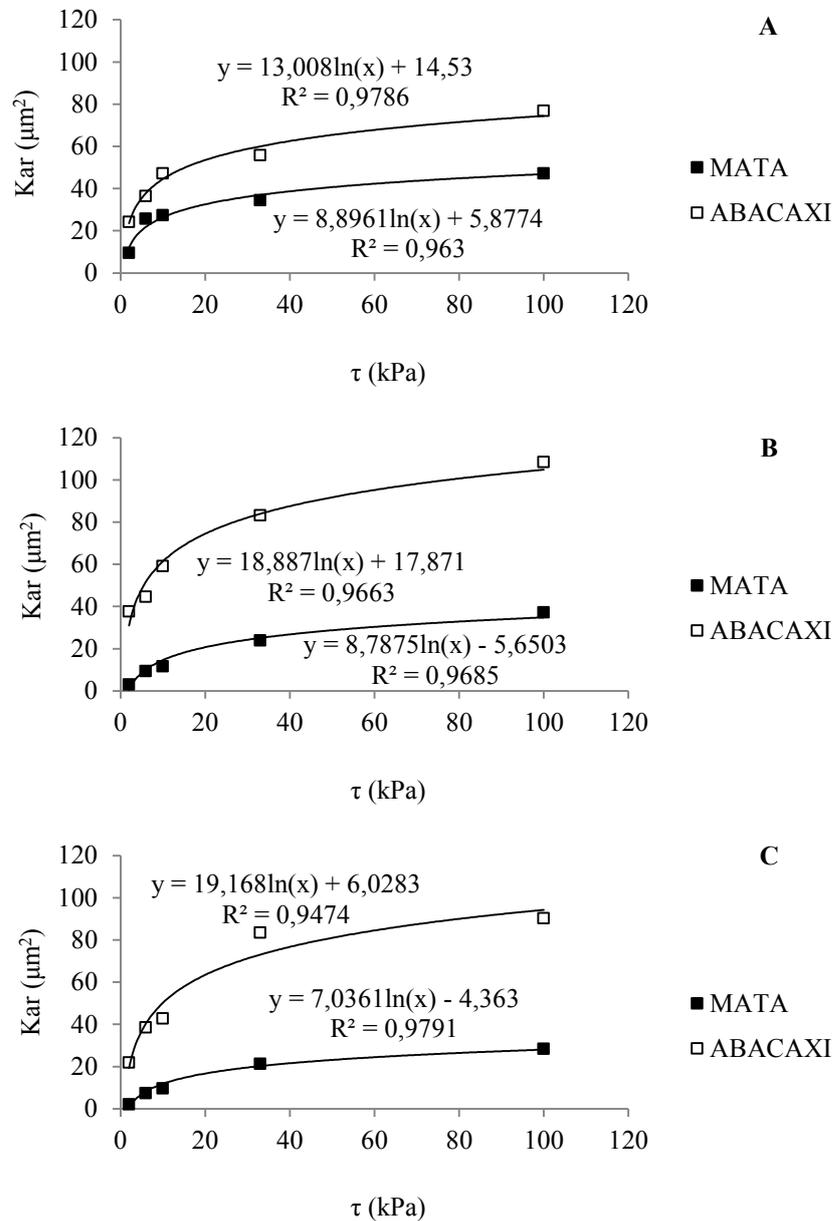
Quadro 2 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, para a tensão de 10 kPa.

Sistemas	τ (kPa)	Camadas (m)			Média
		0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	
----- $\log_{10} K_{ar}, \mu\text{m}^2$ -----					
Mata	10	1,20 Ba	0,98 Ba	0,91 Ba	1,03 B
Abacaxi		1,66 Aa	1,77 Aa	1,46 Aa	1,63 A

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre sistemas e minúscula entre camadas, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Figura 6 representa a relação entre a K_{ar} e as tensões aplicadas (τ) nas amostras de solo com estrutura indeformada. A K_{ar} apresentou correlação positiva e ajuste logarítmico em relação às tensões, para todas as situações de manejo. Ora, ao se aplicar maiores tensões, mais água é retirada do solo e, conseqüentemente, mais área fica disponível ao fluxo de gases, com aumento de K_{ar} , uma vez que este apresenta relação inversa com o conteúdo de água do solo (SILVA *et al.*, 2009). No entanto, via de regra, o aumento de K_{ar} ocorre desde que se tenha uma condição de conectividade entre os poros ou não existam poros bloqueados.

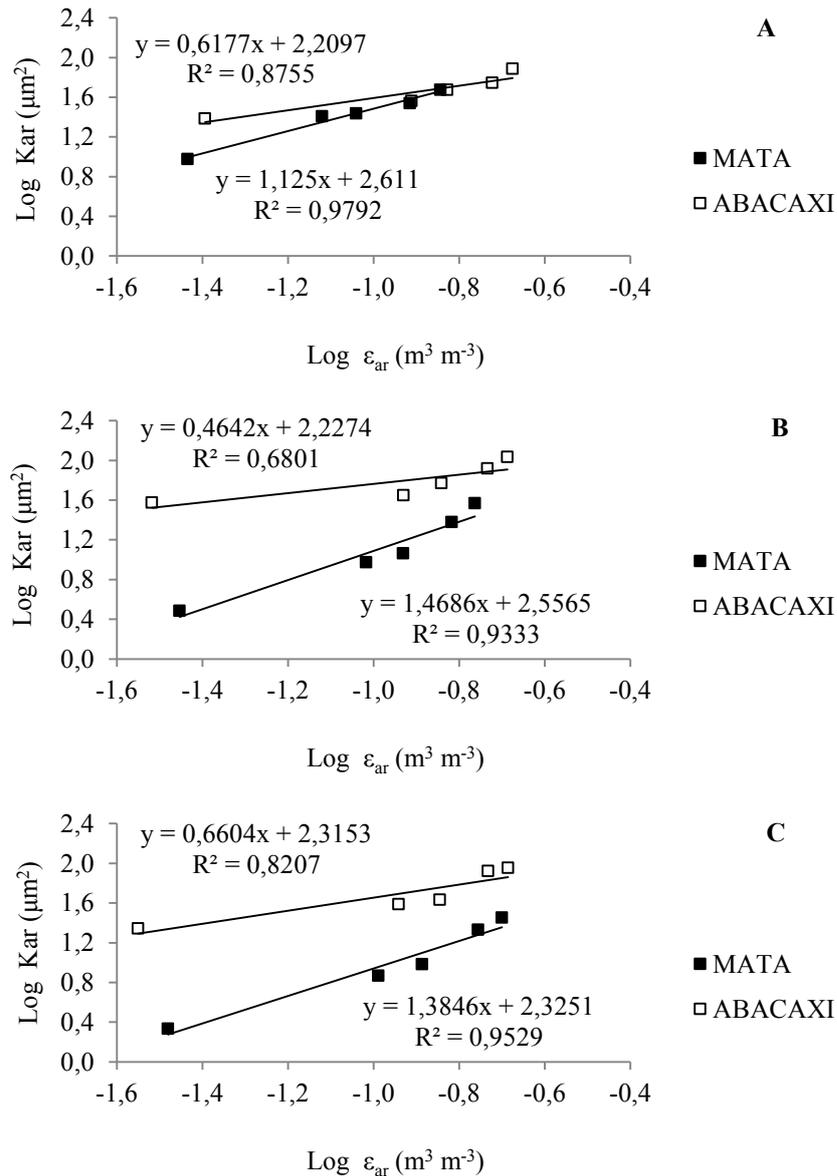
Figura 6 - Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e as tensões aplicadas (τ), para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).



O conhecimento da relação entre a porosidade de aeração (ε_{ar}) e o conteúdo volumétrico de água (θ) facilita o entendimento dos valores de K_{ar} . De fato, o aumento de θ no solo acarreta redução do volume de poros preenchidos com ar, assim como os canais condutores de ar (RODRIGUES *et al.*, 2011). O comportamento de K_{ar} em função da ε_{ar} pode ser visualizado na Figura 7. Constata-se que K_{ar} apresentou correlação positiva com ε_{ar} em todas as camadas avaliadas, apresentando no geral um bom ajuste (R^2). Para as camadas de

0,1-0,2 e 0,2-0,3 m o sistema sob cultivo de abacaxi apresentou maiores valores de K_{ar} para a mesma ε_{ar} , em relação à mata. Já na camada de 0,0-0,1 m, houve uma pequena diferença entre os sistemas avaliados.

Figura 7 - Relação logarítmica entre K_{ar} e ε_{ar} para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).



A inclinação da reta (N) entre a relação log-log de K_{ar} e ε_{ar} é proposta como um indicador ou índice de continuidade de poros (AHUJA *et al.*, 1984). Os valores do parâmetro N foram obtidos a partir da Equação 5 e são apresentados no Quadro 3. Avaliando a conectividade dos poros por meio dos valores de N, tem-se que o solo sob mata apresentou melhor condição física em relação ao sob cultivo de abacaxi. Apesar deste resultado, a

continuidade de poros não refletiu maiores valores de K_{ar} , sendo, possivelmente, a macroporosidade o fator limitante do solo sob mata. Este resultado contradiz Cavalieri *et al.* (2009), que afirmam que a continuidade e conectividade dos poros é mais importante que o volume de poros e macroporos. Apesar de encontrarem baixo volume de porosidade de aeração em amostras de solo com estrutura indeformada, Schjøning *et al.* (1999) obtiveram valores de K_{ar} iguais ou superiores a solos com sua estrutura previamente deformada e com maior volume de poros de aeração.

Quadro 3 - Parâmetros da equação de regressão de $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e porosidade bloqueada (ε_b) para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária, nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Sistemas	Camadas	Log M	N	R ²	ε_b
	m	----- m ² -----			%
Mata	0,0-0,1	2,61	1,13	0,98	0,5
	0,1-0,2	2,56	1,47	0,93	1,8
	0,2-0,3	2,33	1,38	0,95	2,1
Abacaxi	0,0-0,1	2,21	0,62	0,90	0,0
	0,1-0,2	2,23	0,46	0,68	0,0
	0,2-0,3	2,32	0,66	0,82	0,0

Os índices de continuidade de poros podem ser indicadores da movimentação tridimensional da água e do ar no solo, uma vez que estima a quantidade de poros que são efetivamente utilizados para esses fluxos (SILVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2012). Valores altos indicam um sistema poroso com alta capacidade para transportar gases, elevada continuidade ou pouca tortuosidade de poros (SCHJØNING *et al.*, 1999).

Conforme Schjøning *et al.* (2002), valores elevados de N estão relacionados à complexidade da estrutura do solo. Portanto, a condição sob mata secundária apresentou uma maior complexidade estrutural comparativamente à área sob cultivo, muito provavelmente, devido ao manejo convencional adotado nesta área.

O solo sob cultivo de abacaxi apresentou menor volume de poros de aeração bloqueados (ε_b) em comparação à mata secundária, ou seja, no solo sob mata há maior volume de poros desconectados, que não estão disponíveis ao fluxo de gases. A magnitude de K_{ar} é influenciada pela magnitude de ε_{ar} , bem como pela distribuição por tamanho, continuidade e tortuosidade dos poros. A razão entre K_{ar} e ε_{ar} , além de ser um outro parâmetro indicativo do índice de continuidade de poros (K_1), revela se as diferenças entre K_{ar} são atribuídas apenas às

diferenças entre ε_{ar} ou estão relacionadas a aspectos geométricos da porosidade (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984).

Os valores do K_1 estão presentes no Quadro 4 e indicam claramente as diferenças entre os valores de continuidade de poros obtidos por meio do parâmetro N. Fato semelhante ocorreu para Freire (2012). De acordo com o autor, a aparente contradição entre ambos os parâmetros se deve a que o parâmetro N é resultado de uma faixa de tensão (2, 6, 10, 33 e 100 kPa), portanto, com um caráter abrangente, ao passo que o K_1 é obtido pontualmente para cada tensão de água no solo.

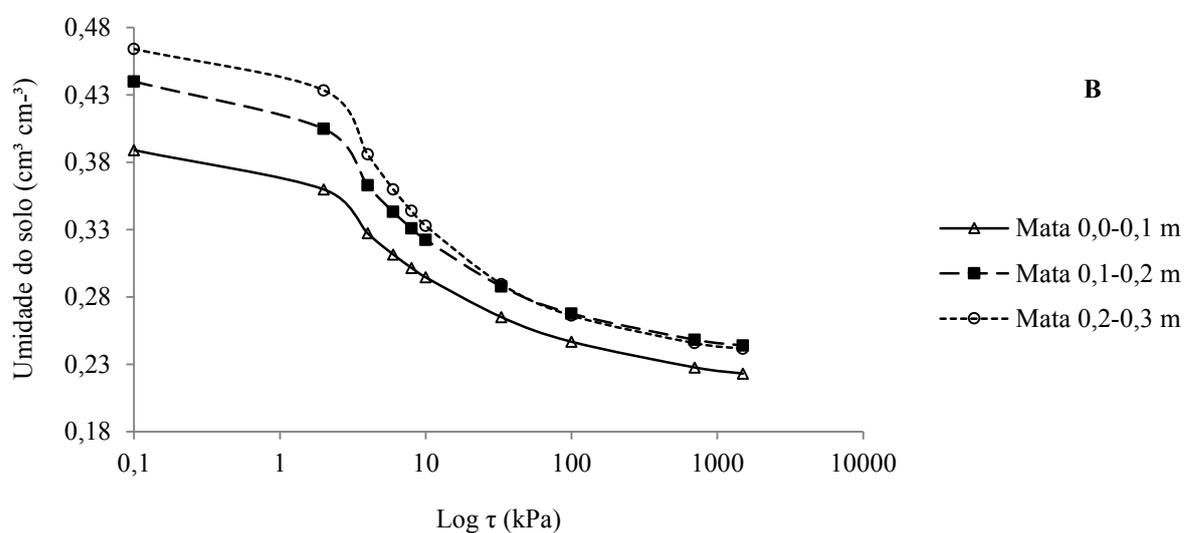
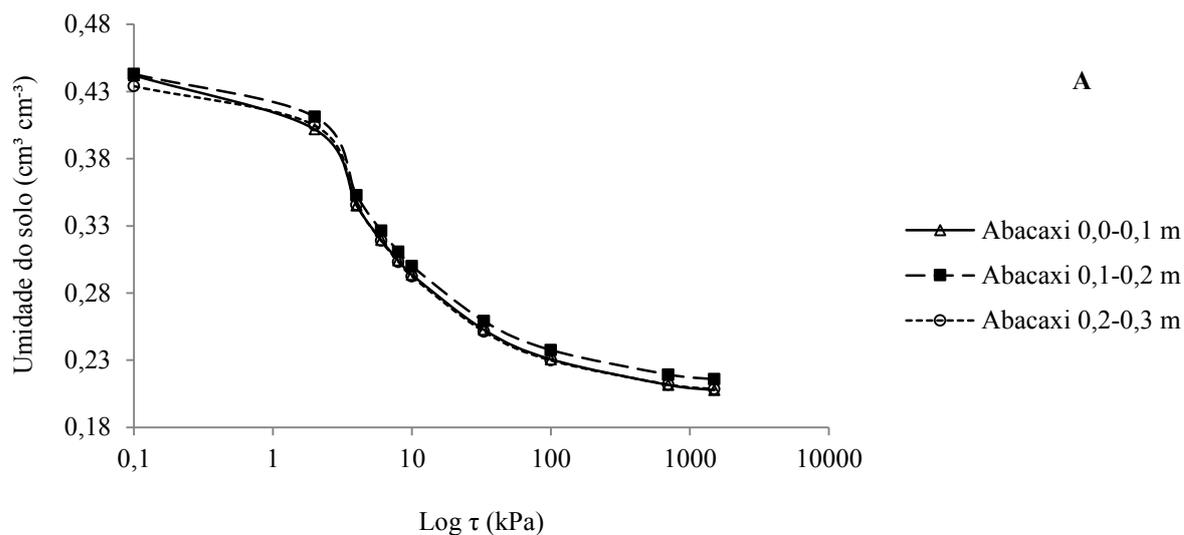
Quadro 4 - Índice de continuidade de poros (K_1) para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, para a tensão de 10 kPa.

Sistemas	τ (kPa)	Camadas (m)		
		0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3
----- $\log_{10} K_1, \text{mm}^2$ -----				
Mata	10	2,45	1,99	1,87
Abacaxi		2,50	2,62	2,43

4.5 Curva de retenção de água no solo

As curvas de retenção de água (CRA) no solo para as distintas situações e camadas avaliadas são apresentadas na Figura 8; todos os parâmetros do ajuste dos dados, utilizados pela equação de van Genuchten (1980), para as curvas das amostras com estrutura indeformada e deformada, estão presentes no Apêndice H. O conteúdo de água correspondente à umidade no ponto de saturação (θ_s), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e o teor de água disponível (AD), para cada curva, podem ser vistos no Quadro 5.

Figura 8 - Curva de retenção da água pelo solo (CRA) das amostras com estrutura indeformada, para as áreas sob cultivo de abacaxi (A) e mata secundária (B) nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.



O solo sob cultivo de abacaxi (Figura 8A) se mostrou uniforme para as curvas em todas as camadas avaliadas, chegando a ocorrer sobreposição para as camadas de 0,0-0,1 e 0,2-0,3 m. A uniformidade em relação às frações granulométricas influencia na semelhança entre as curvas, no entanto, este fato não segue uma regra geral (MOTA *et al.*, 2008)

Com base na Figura 8B, a camada de 0,0-0,1 m do solo sob mata secundária foi a que mais se distinguiu dentre os tratamentos; sua umidade no ponto de saturação (θ_s) e a AD apresentaram os menores resultados (Quadro 5), estando relacionados à sua elevada densidade (Figura 4) e menor volume de macroporos (Quadro 1). Ainda neste tratamento, a camada de 0,2-0,3 m destacou-se de forma positiva pelos resultados para umidade no ponto de saturação (θ_s), na CC e o maior teor de AD, refletindo o seu maior teor de argila (Figura 2) e o maior volume de microporos (Quadro 1).

Klein e Libardi (2002), estudando as alterações na densidade do solo e sua implicação na porosidade total e de aeração, relatam que estas alterações promoveram menor umidade no ponto de saturação e maior no ponto de murcha permanente. No entanto, essas diferenças podem interferir pouco na disponibilidade de água às plantas (AD), pois os valores de umidade próximos à saturação significam água facilmente drenável. As diferenças importantes estão nos valores de umidade próximos ao ponto de murcha permanente, pois maiores valores significam mais água disponível.

A granulometria e constituição do solo influenciam a capacidade de retenção de água, pois as forças de adsorção dependem da espessura do filme de água que recobre as partículas, a qual varia com sua superfície específica. De modo geral, os solos com elevados teores de argila e/ou material orgânico possuem faixa mais ampla de umidade, ao passo que em arenosos esta é mais estreita (SILVA *et al.*, 2005; KITAMURA *et al.*, 2007).

Quadro 5 - Teores de água no solo na θ_s , CC, PMP e a AD para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Sistemas	Camadas	θ_s	CC	PMP	AD
	m	-----cm ³ cm ⁻³ -----			
MATA	0,0 - 0,1	0,389	0,295	0,223	0,072
	0,1 - 0,2	0,440	0,322	0,244	0,078
	0,2 - 0,3	0,464	0,333	0,242	0,091
ABACAXI	0,0 - 0,1	0,442	0,294	0,208	0,086
	0,1 - 0,2	0,443	0,300	0,216	0,084
	0,2 - 0,3	0,434	0,292	0,208	0,084

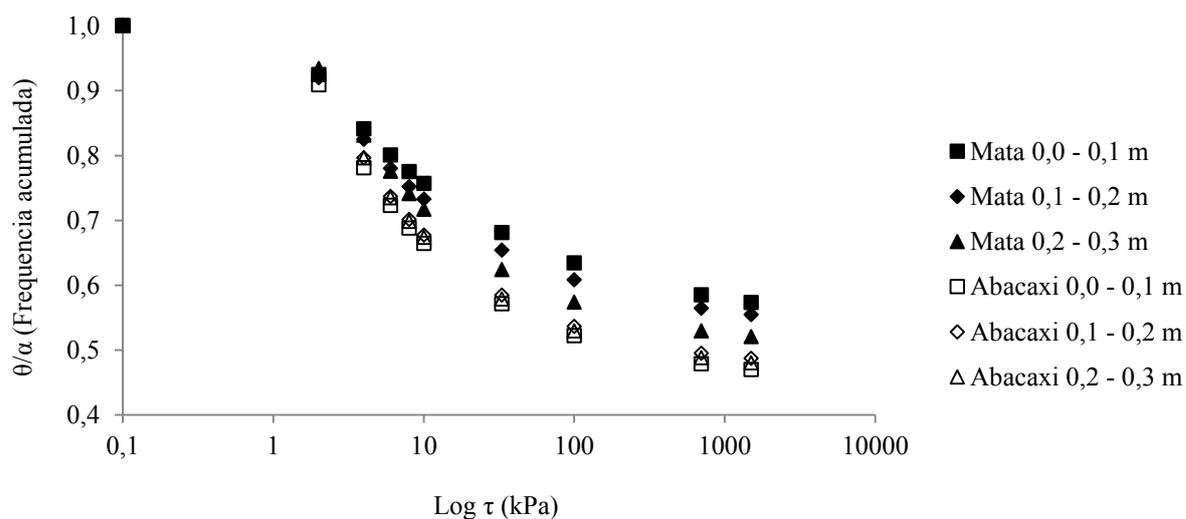
4.5.1 Frequência acumulada de poros

A frequência acumulada de poros, ou saturação relativa (Figura 9), expressa a fração cheia de solução do volume do espaço poroso de uma amostra de solo em função das tensões aplicadas na amostra de solo com estrutura indeformada. Contudo, a partir do volume de poros preenchidos com solução se pode obter o volume dos poros preenchidos com ar e em que proporção ocorre essa variação com o aumento da tensão e decréscimo de solução (LIBARDI, 2012).

Ressaltando-se a capacidade de campo, tensão de 10 kPa, uma vez que a irrigação visa manter a umidade do solo próxima a este ponto, o solo sob o cultivo de abacaxi apresenta

maior volume de poros preenchidos com ar comparativamente à mata secundária. Nesta tensão, as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária apresentam, respectivamente, em média, 33% e 26% de espaço poroso livre de água, prontamente disponíveis ao fluxo de ar.

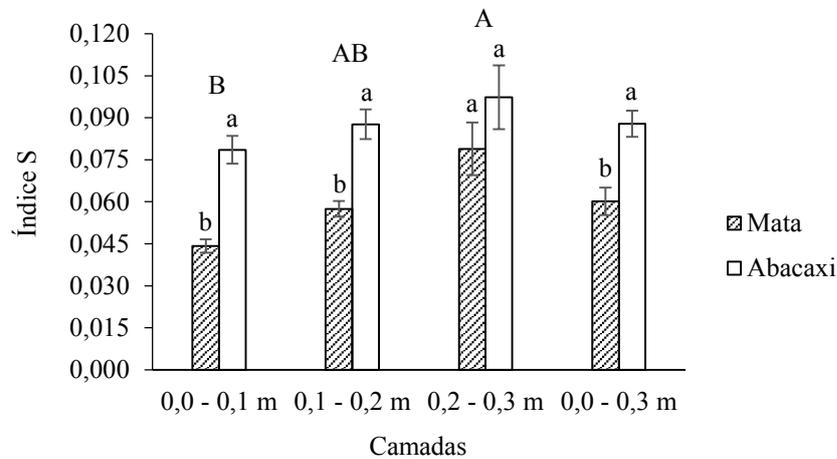
Figura 9 - Frequência acumulada de poros em função da tensão aplicada, para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.



4.7 Índice S

De acordo com a Figura 10, o índice S se mostrou sensível ao avaliar as diferentes situações de solo e camadas. A análise estatística (Apêndice I) demonstrou não haver interação entre os sistemas e as camadas. A área sob cultivo de abacaxi apresentou melhor qualidade física em relação à mata secundária. Esta superioridade é reflexo da melhoria ocasionada pelo revolvimento do solo, e está principalmente relacionada à geometria porosa do solo. Essa área apresentou maior volume de macroporos (Quadro 1), comparativamente à de referência, e de acordo com Jong van Lier (2012) este é um atributo muito influente nos valores obtidos para o índice S. O mesmo autor demonstra que os maiores valores do parâmetro n de ajuste da curva de retenção (Apêndice J), obtidos por meio do modelo proposto por van Genuchten (1980), também estão correlacionados aos maiores valores do índice.

Figura 10 - Índice S para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Adotando-se o limite crítico proposto por Dexter (2004a), de 0,035, para divisão entre solos com boa e má qualidade estrutural, é notável que todos os solos apresentaram-se dentro da faixa de boa qualidade estrutural. No entanto, ao levar em consideração o valor de 0,045, proposto por Andrade, Stone e Silveira (2009), como o limiar entre solos com boa qualidade estrutural e com tendência a se tornar degradado, tem-se que apenas a camada de 0,0-0,1 m da mata secundária apresenta-se abaixo deste valor crítico, o que indica alerta à degradação. Esta camada apresentou os maiores valores de densidade de solo e teve sua geometria porosa alterada, modificações refletidas no valor inferior do índice S. A correlação negativa entre o índice S e a densidade do solo é relatada por diversos autores na literatura (DEXTER, 2004a; PEREIRA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2012)

Para ambas as situações, houve uma tendência semelhante, isto é, menores valores de S nas camadas superficiais com aumento na medida em que se aumentava a profundidade. As alterações decorrentes das práticas culturais são refletidas na modificação da geometria porosa e eventualmente pode ocorrer incremento na densidade das camadas superficiais; por conseguinte, menores valores de S são obtidos, corroborando informações de Dexter *et al.* (2004a) e Gimenes (2012).

Silva *et al.* (2012) observaram maiores valores de densidade do solo e menores de macroporosidade nas profundidades superficiais, associados a baixos valores do índice S, evidenciando o efeito do manejo empregado ao avaliarem a adequação do índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho Distrófico da região do cerrado, cultivado com cafeeiro sob manejo intensivo.

4.8 Índice S_{relativo}

A análise estatística para o S_{relativo} (Apêndice L) demonstrou similaridade com os resultados encontrados para o índice S . Ocorreu diferença significativa entre os tratamentos para as camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m e houve significância entre os tratamentos e as profundidades.

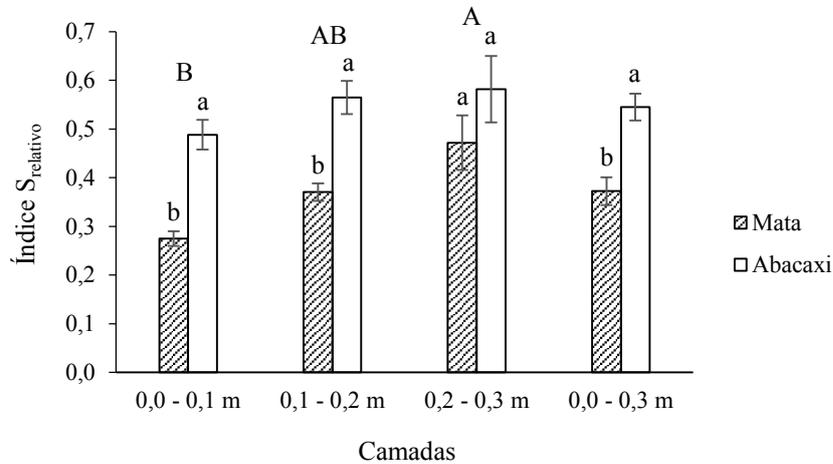
Em seu estudo, Freire (2012) afirma que o índice S_{relativo} apresentou, em relação ao índice S , maior sensibilidade e detectou diferença estatística entre as camadas, demonstrando viabilidade na sua utilização enquanto indicador da qualidade física do solo. No presente estudo, o índice S_{relativo} foi capaz de prever alterações provocadas pelo uso do solo, porém sem apresentar maior sensibilidade que o índice S .

Em que pese o índice S_{relativo} não ter apresentado maior sensibilidade que o índice S , ele denota uma forma mais prática de avaliação das modificações na estrutura do solo, resultante de seu manejo, por relativizar os resultados encontrados para o índice S . Neste contexto, o sistema sob cultivo de abacaxi apresentou uma melhoria de aproximadamente 20% para ambas as camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, em relação à mata secundária, considerada como referência (Figura 11).

Por meio das análises de correlação e regressão entre o S_{relativo} e os atributos relacionados com a fração porosa do solo, é notória a boa relação entre o S_{relativo} com os parâmetros densidade do solo (Figura 12A) e porosidade total (Figura 12B), fato constatado pelos bons coeficientes de correlação e de determinação. Para ambos os atributos, obteve-se uma elevada correlação significativa a 1% de probabilidade e por meio do teste t para o coeficiente angular (b) verificou-se que estes são diferentes de zero, ou seja, as retas não são paralelas ao eixo x e, portanto, os atributos apresentam influência sobre a variância do S_{relativo} .

As variações da densidade do solo explicam cerca de 85% da variância do índice S_{relativo} . Para este atributo o índice S_{relativo} interage de forma negativa, de forma que maior valor de densidade sempre acarreta menor S_{relativo} , evidenciando a sensibilidade deste índice às mudanças estruturais ocasionadas ao solo. Já em relação à porosidade total - que explica aproximadamente 81% da variância do S_{relativo} - o índice interage de forma positiva, ou seja, maior quantidade de poros reflete sempre maior S_{relativo} .

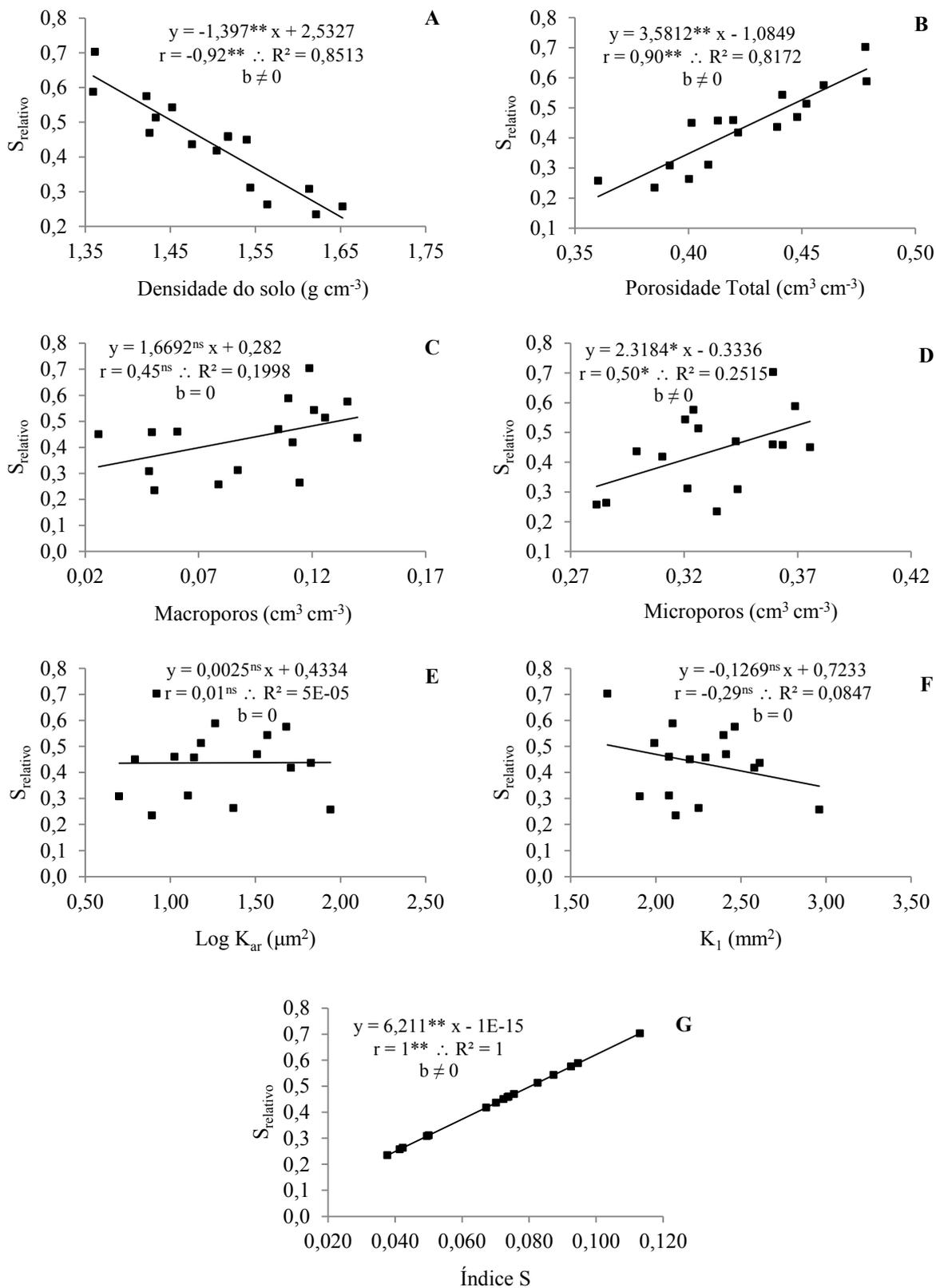
Figura 11 - Índice S_{relativo} para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula entre camadas e minúscula na camada, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Apesar de a porosidade total ter apresentado uma alta correlação positiva, com um bom ajuste ao modelo linear e com uma boa explicação para a variabilidade do índice S_{relativo} , para a macroporosidade (Figura 12C) observou-se que não há correlação significativa e, desse modo, a sua variação não apresenta influência na variância do índice S_{relativo} , fato comprovado pelo teste t aplicado ao coeficiente angular (b), indicando que este é igual a zero. Já os microporos (Figura 12D) apresentaram correlação positiva com o índice S_{relativo} , significativa a 5% de probabilidade.

Não existiu correlação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e o índice S_{relativo} (Figura 12E), visto que o coeficiente de correlação não apresentou significância e o teste t aplicado ao coeficiente angular (b) não refutou a hipótese de que este é igual a zero. Portanto, K_{ar} não apresenta influência nos resultados encontrados para o índice S_{relativo} . O índice de continuidade de poros (K_1) não apresentou correlação significativa com o S_{relativo} , isto é, assim como para o K_{ar} , o teste t não refutou a hipótese de que o coeficiente angular (b) é igual a zero, o que significa dizer que este atributo também não apresenta qualquer relevância para a variância dos dados de S_{relativo} (Figura 12F). Como esperado, o índice S apresenta perfeita correlação positiva com o índice S_{relativo} (Figura 12G). A importância desta regressão é a sua utilidade prática, uma vez que, a partir apenas dos dados referentes ao índice S, é possível quantificar as alterações provocadas à estrutura do solo.

Figura 12 - Correlação e regressão entre o S_{relativo} e cada atributo relacionado com a fração porosa do solo, para a camada de 0,0-0,10 m. * - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ns - não significativo a 5% de probabilidade.



4.8 Estatística multivariada

Em muitas situações, a interpretação do comportamento simultâneo de um conjunto de dados é necessária por causa da influência exercida entre as variáveis - mensurada por meio da análise de correlação - e que pode ser analisada usando técnicas estatísticas multivariada, com a possibilidade de conclusões mais abrangentes sobre o quanto uma variável interfere em outra (KLEFENS, 2009), ou em determinado sistema. Na visão de Fidalski, Tormena e Scapim (2007), os estudos que quantificam a qualidade do solo apresentam inúmeras variáveis, as quais são descritas por meio de análises estatísticas univariadas, possivelmente comprometendo a interpretação e as conclusões destes, por não ser explorada a existência ou não da dependência entre as variáveis analisadas.

A partir do conjunto das variáveis, foram obtidos 5 componentes principais, que são apresentados no Quadro 6, juntamente com seus autovalores (extraídos da matriz de correlação) e o percentual de explicação da variabilidade dos dados correspondente a cada componente. O autovalor para um componente principal indica o quanto de variância ele contém do total de variâncias (MANLY, 2008). Para a escolha dos componentes principais significativos e que melhor representassem os dados, adotou-se a regra de Kaiser (1958), em que autovalores acima de uma unidade apresentam informações relevantes. Posto isso, os componentes principais 1 e 2, por atenderem ao requisito, foram os escolhidos, e, unidos, apresentam explicação de cerca de 95% da variabilidade total dos dados.

Quadro 6 - Autovalores e porcentagem explicada por cada componente.

Componentes	Autovalores	Variabilidade explicada (%)	Variabilidade explicada acumulada (%)
1	6,004	50,03	50,03
2	5,432	45,27	95,30
3	0,403	3,36	98,66
4	0,103	0,86	99,51
5	0,058	0,49	100,00

O Quadro 7 contém a correlação entre os componentes principais (CP) e as variáveis, em que aquelas que apresentarem valor acima de 0,7, em módulo, são as que mais contribuíram para o referido componente (VICINI, 2005). Para facilitar a visualização, é apresentada a contribuição das variáveis para cada componente em forma percentual. Para o

CP1, os atributos relacionados à granulometria (Argila, Areia e Silte), densidade do solo, porosidade total e microporosidade, foram os que mais contribuíram. Todos os demais contribuíram de forma mais significativa para o CP2.

Quadro 7 - Correlação entre as variáveis e componentes principais e sua respectiva contribuição para cada componente.

Variável	CP1	CP2	CP1 (%)	CP2 (%)
Argila	-0,864	-0,452	12,448	3,755
Areia	0,970	0,177	15,688	0,576
Silte	-0,856	0,469	12,213	4,047
Densidade do solo	0,860	-0,439	12,310	3,555
Porosidade total	-0,891	0,381	13,218	2,676
Microporosidade	-0,904	-0,347	13,600	2,215
Macroporosidade	-0,318	0,917	1,680	15,468
K_{ar}	0,465	0,875	3,601	14,088
K_1	0,647	0,749	6,963	10,332
N	-0,396	-0,912	2,608	15,328
Índice S	-0,429	0,853	3,067	13,399
Índice $S_{relativo}$	-0,395	0,889	2,605	14,560

Com base na Figura 13 é possível analisar a dispersão dos atributos analisados, os sistemas, e suas respectivas correlações entre si e em função dos componentes principais. Todas as variáveis encontram-se próximas ao círculo unitário, demonstrando uma boa contribuição para explicação da variação dos dados. A proximidade da variável e o componente principal é indicativa de uma boa correlação. Na verdade, a Figura 13 é uma representação gráfica para os dados contidos no Quadro 7, com a adição das informações referentes às áreas e camadas estudadas; já a proximidade entre as variáveis é reflexo da maior correlação entre estas.

Diante do exposto, pode-se, então, avaliar o grau de correlação entre as variáveis, por meio da Figura 13. As variáveis microporos e argila, assim como a porosidade total e silte, apresentaram alta correlação, demonstrando a dependência da porosidade com a textura do solo (KIEHL, 1979). Já a macroporosidade apresentou alta correlação com as variáveis índice S e índice $S_{relativo}$, demonstrando a característica deste índice - uma vez que o $S_{relativo}$ é derivado do S - em prever alterações relacionadas com a estruturação do solo. Vale destacar a alta correlação que foi evidente entre o índice $S_{relativo}$ e os macroporos, que não foi possível ser detectada por meio da análise estatística univariada. O índice de continuidade de poros (K_1) relacionou-se fortemente com a permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}); já o índice de

continuidade de poros, N , foi negativamente correlacionado com a K_{ar} , situando-se no quadrante oposto.

A disposição das variáveis em quadrantes opostos indica o tipo de correlação entre estas. Sendo assim, a densidade do solo foi oposta à porosidade total, com uma correlação negativa com esta, como era esperado. De igual modo, a argila foi oposta à areia, e os índices S e $S_{relativo}$ opostos à densidade do solo. Algumas variáveis demonstraram a mesma representatividade no gráfico, por estarem bem próximas, como no caso do índice S , índice $S_{relativo}$ e macroporos.

A presença de variáveis e um sistema, no mesmo quadrante, é sinônimo de boa correlação entre si. Sendo assim, para a área da mata secundária, na camada de 0,0-0,1 m, a densidade do solo foi o atributo que mais influenciou na variância dos seus resultados; para as camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, as variáveis que mais influenciaram foram o índice de continuidade de poros, N , o teor de argila e os microporos. Estas camadas foram semelhantes, pois foram dispostas no mesmo quadrante, diferentemente da camada superficial, que ficou situada em um quadrante isolado das demais.

As camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, da área sob cultivo de abacaxi, ficaram dispostas no mesmo quadrante, e por sinal, bem próximas, demonstrando alta similaridade, e, portanto, sofreram influência das mesmas variáveis. No entanto, a permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) foi o parâmetro que apresentou melhor correlação com os sistemas, seguido do índice de continuidade de poros (K_1) e da areia. Já a camada de 0,2-0,3 m, disposta em outro quadrante, distinguiu-se das demais e sofreu influência de outras variáveis (macroporos, índice $S_{relativo}$, índice S , silte, porosidade total – em escala decrescente de correlação).

A análise de agrupamentos (AA) indicou a formação de grupos semelhantes àqueles obtidos por meio da ACP, conforme a Figura 14. A maior distância euclidiana entre os grupos gerados foi utilizada para a sua delimitação, gerando três grupos distintos. O primeiro grupo foi formado entre as camadas subsuperficiais da mata secundária, demonstrando alta similaridade entre os atributos físicos analisados. Já a camada superficial, sob o mesmo sistema, distinguiu-se das demais, sendo a densidade do solo a variável que mais contribuiu para essa condição. As três camadas do solo sob o cultivo de abacaxi demonstraram similaridade, principalmente para as de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, sendo, possivelmente, essa maior similaridade atribuída à profundidade efetiva de preparo do solo; neste caso, a camada de 0,2-0,3 m apresenta características inalteradas pelo manejo convencional do solo.

Figura 13 - Dispersão dos atributos físicos para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. D_s : densidade do solo; N e K_1 : índices de continuidade de poros; K_{ar} : permeabilidade intrínseca do solo ao ar; PT: porosidade total; Mip: microporos; Map: macroporos; S: índice S; S_r : índice $S_{relativo}$; M1: mata 0,0-0,1 m; M2: mata 0,1-0,2 m; M3: mata 0,2-0,3 m; A1: abacaxi 0,0-0,1 m; A2: abacaxi 0,1-0,2 m; e A3: abacaxi 0,2-0,3 m.

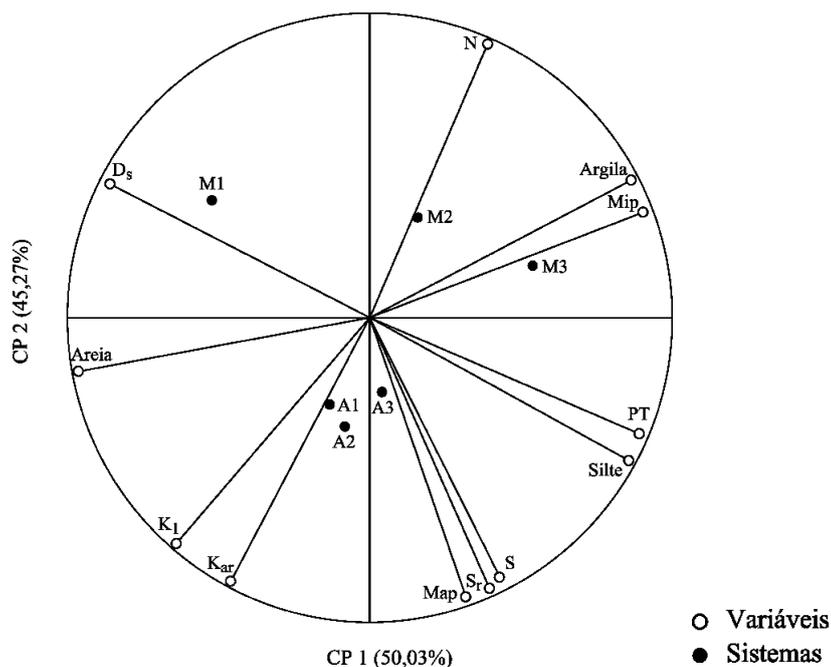
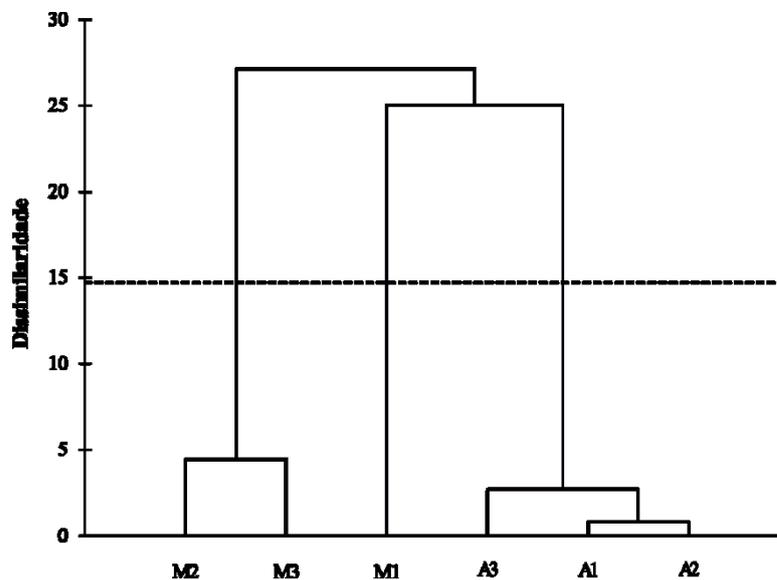


Figura 14 - Dendrograma representando a dissimilaridade entre os grupos de mata secundária e cultivo de abacaxi. M1: mata 0,0-0,1 m; M2: mata 0,1-0,2 m; M3: mata 0,2-0,3 m; A1: abacaxi 0,0-0,1 m; A2: abacaxi 0,1-0,2 m; e A3: abacaxi 0,2-0,3 m.



5 CONCLUSÕES

O índice S_{relativo} é sensível às alterações impostas à estrutura do solo e, portanto, pode ser utilizado como indicador para quantificar mudanças na disposição de seus constituintes;

Os demais indicadores utilizados para aferir a qualidade física do solo corroboraram o S_{relativo} ao evidenciarem que a área sob cultivo com abacaxi apresenta estrutura física melhor que a área sob mata secundária; e

O índice S_{relativo} apresenta correlação com atributos da fração porosa do solo.

REFERÊNCIAS

- ADDISCOTT, T.M., Entropy, non-linearity and hierarchy in ecosystems. **Geoderma**, v. 160, p. 57-63, 2010.
- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 48, p. 699-702, 1984.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N. de; MOTA, J. C. A. Física do solo: conceitos e aplicações. 1. ed. Fortaleza - CE: Imprensa Universitária, v. 1, 2008. 290 p.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 411-418, 2009.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; RODRIGUES, B. N.; CHAVES, J. C. D.; YADA JUNIOR, G. M. Soil physical quality and carbon stocks related to weed control and cover crops in a brazilian Oxisol. In: **Weed and Pest Control - Conventional and New Challenges**. Sonia Soloneski and Marcelo Larramendy (Ed.), 1 ed. Rijeka: InTech, p. 181-205, 2013.
- BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, v. 39, p. 327-339, 1988.
- BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois latossolos vermelhos sob plantio direto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1892-1904, 2012.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JÚNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 363-375, 1986a. (Agronomy Monography, 9).
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 377-382, 1986b. (Agronomy Monography, 9).
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil Tillage Res.**, v. 103, p. 158-164, 2009.

CELIK, I.; GUNAL, H.; BUDAK, M.; AKPINAR, C. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 236-243, 2010.

CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; CENTURION, M. A. P. C.; PRADO, R. M. Manejo mecânico e cultura de cobertura na entrelinha da seringueira (PB 235 e RRIM 701) e os atributos físicos de um latossolo vermelho no Planalto Paulista. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 7-13, 2004.

COLLIS-GEORGE, Neville. A re-interpretation of the drainage moisture characteristic. **Geoderma**, v. 189, p. 87-90, 2012.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. da S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, n. 2, p. 515-523, 2008.

CRUZ, A. C. R., PAULETTO, E. A., FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 27, p. 1105-1112, 2003.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I - Atributos físicos do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 589-602, Abr. 2011.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Atributos físicos do solo sob diferentes preparos e coberturas influenciados pela distribuição de poros. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1160-1169, Nov. 2010.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461, 1986. (Agronomy Monography, 9).

DANTAS, J. D. A. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodi, CE. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 18-26, 2012.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality – Part II: Friability, tillage, filth and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p. 215-225, 2004b.

DEXTER, A. R. Soil physical quality – Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 227-239, 2004c.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, v. 57, p. 203-212, 2001.

DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & Development**, v. 18, n. 4, p. 369-381, 2007.

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Projetos: Perímetro irrigado Jaguaribe - Apodi**. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html>. Acesso em: 13 de Julho de 2012.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAM, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, p. 1-21, 1994. (Publication Special, 35).

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de produção: Cultura do abacaxi na Região de Itaberaba, em condições de sequeiro**. Dezembro, 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Abacaxi/abacaxi_itaberaba/clima.htm>. Acesso em 13 de Julho de 2012.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SCAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Rev. Bras. Ciên. Solo**, v. 27, p. 9-19, 2007.

FREIRE, A. G. **Índices de qualidade física para um Cambissolo em sistemas de manejo**. 2012. 83 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

FULLER, L. G.; GOH, T. B.; OSCARSON, D. W. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 1, p. 101-107, 1995.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p.383-411, 1986. (Agronomy Monography, 9).

GIMENES, F. H. S. **Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 32, p. 18-186, 1968.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, v. 34, p. 101-114, 1984.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; FRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Adv. Agronomy**, v.42, p. 331-338, 1989.

IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Mapa Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. 2012. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/124x.htm>>. Acesso em: 13 Julho 2012.

IVERSEN, B. V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T. G.; MØLDRUP, P. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, [S. l.], n. 2, p. 97-106, Feb. 2001.

JONG VAN LIER, Q. Índice S: Um indicador da qualidade física do solo? **Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v.37, n. 3, p. 24 - 27, 15 dez. 2012.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, p. 187-200, 1958.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-plantas**. Piracicaba: Ceres, 1979. 264 p.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 11, p. 93-99, 1946.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 361-369, 2007.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 26, p. 857-867, 2002.

KELLER, T; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, n. 3, p. 398-406, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 635-662, 1986. (Agronomy Monography, 9).

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. Defining soil quality for the sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 37-51, 1994. (Publication Special, 35).

LEITE, H. M. F. **Qualidade física do solo cultivado com goiabeira irrigada na Chapada do Apodi - CE.** 98 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2011.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia.** São Paulo: Oficina de textos, 2011. 456 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 346 p.

LIPIEC, J.; KUŚ, J.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage research**, v. 89, n. 2, p. 210-220, 2006.

LIMA, C. L. R.; PILLON, C. N.; LIMA, A. C. R. **Qualidade física do solo: Indicadores quantitativos.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 25 p., Documento196. 2007.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 29, p. 677-684, 2005.

MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 35, n. 6, p. 1959-1965, 2011.

MANLY, B. J. F. **Métodos Estatísticos Multivariados: uma introdução.** 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil Till. Research**, v. 25, p. 217-230, 2002.

MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJØNNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, Diffusivity, and Permeability in the Soil Liquid and Gaseous Phases. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 65, p. 613-623, 2001.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v. 36, n. 2, p. 389-400, 2012.

MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; AMARO FILHO, J.; LIBARDI, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, p. 49-58, 2008.

MOTA, J.C.A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície.** 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

NEVES, C.M.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; CARDOSO, E.L. MACEDO, R.L.G.; FERREIRA, M.M.; SOUZA, F.S. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema

agrosilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais. **Sci. Forestalis**, v. 74, p. 45-53, jun. 2007.

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocóeso submetido a diferentes manejos. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** v. 15, n. 5, p. 435-442, 2011.

PEREIRA, V. P.; ORTIZ-ESCOBAR, M. E.; ROCHA, G. C.; ASSIS JUNIOR, R. N.; OLIVEIRA, T. S. Evaluation of soil physical quality of irrigated agroecosystems in a semi-arid region of North-eastern Brazil. **Soil Research**, v. 50, n. 6, p. 455-464, 2012.

PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, F. S.; OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; FALQUETO, R. J.; MARTINS, A. L. S. Qualidade física de um Latossolo vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. **Rev. Bras. Ciên. Solo**, v. 35, p. 87-95, 2011.

REICHARD, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole, 2012. 500 p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Rev. Ciên. Ambientais**, v. 27, p. 29-48, 2003.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials. p. 128-152. 1965.

RODRIGUES, S.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciên. Solo**, v. 35, p. 105-114, 2011.

RÜHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M.; GRAEFE, J. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. **Geoderma**, v. 30, p. 272-283, 2006.

SÁ, P.C.C.; VALE, C. N. C.; MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A. Índice S e área sob a curva de retenção de água para avaliar qualidade física do solo. **Rev. Bras. Agric. Irrigada**, v. 4, n. 2, p. 110-114, 2010.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I. K.; MØBERG, J. P.; DE JONGE, H.; KRISTENSEN, K.; CHRISTENSEN, B. T. Turnover of organic matter in differently textured soils: I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. **Geoderma**, v. 89, n. 3, p. 177-198, 1999.

SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L. J.; MOLDRUP, P.; JACOBSEN, O. H. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: The long term effects of fertilization and crop rotation. **Europ. J. Soil Science**, v. 53, p. 331-339, 2002.

SEAGRI. SECRETARIA DA AGRICULTURA, IRRIGAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Culturas Agrícolas - Abacaxi**, 1999. Disponível em: <[http://www.seagri.ba.gov.br/Abacaxi.htm#Botânica/Descrição da Planta/ Variedades](http://www.seagri.ba.gov.br/Abacaxi.htm#Botânica/Descrição%20da%20Planta/Varieties)>. Acesso em 13 de Julho de 2012.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, n. 1, Feb. 2008.

SILVA, A. P.; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; OLIVEIRA, L.M. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338-345, Mai/Jun, 2012.

SILVA, E. M.; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A.; RODRIGUES, L. N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 41, n. 2, Feb. 2006.

SILVA, F. A.S. **ASSISTAT versão 7.5 beta**. Campina Grande: DEAG-CTRN-UFCG, 2013.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciênc. Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, Jun. 2005.

SILVEIRA, L. R.; BRITO, A. S.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 35, p. 429-436, 2011.

SILVEIRA JÚNIOR, S. D. S.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Qualidade física de um latossolo vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, Dez. 2012.

TANG, A. M.; CUI, Y.; RICHARD, G.; DÉFOSSEZ, P.; A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**, v. 162, n. 1-2, p. 171-181, abr. 2011.

TAVARES, M. H. F.; FELICIANO, J. J. S.; VAZ, C. M. P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, v. 13, p. 517-524, 2008.

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

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Indicators for soil quality evaluation. Natural Resources Conservation Service. **Soil Quality Information Sheet**. 1996. 2 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Natural Resources Conservation Service**. Soil quality test kit guide. Washington, 1999. 82 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning. Natural Resources Conservation Service. **Soil Quality Institute**, 2001. 43 p.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 892-897, 1980.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 p. Monografia (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa) - Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VEZZANI, M. L.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 33, p. 743-755, 2009.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effects on soil compaction on storage and movement of soil, air, and water. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, v. 4, p. 242-246, 1966.

VOORHEES, W. B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviation wheel induced soil compaction. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 42, p. 129-133, 1983.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 256-265, Mar. 2012.

XLSTAT. **Xlstat 2013 add-in for Excel (Trial Version)**. New York, 2013. Disponível em: <<http://www.xlstat.com>>. Acesso em 21 de Abril de 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GRANULOMETRIA DO SOLO (ARGILA), EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	30380,48251	30380,4825	7,7792 *
Resíduo A	8	31242,70713	3905,33839	
Parcelas	9	6162318963		
Fator B (Camadas)	2	51517,76696	25758,8835	46,7773 **
Int. Ax B	2	8002,27095	4001,13548	7,2659 **
Resíduo B	16	8810,73556	550,67097	
Total	29	129953,9631		
MG = 287,58899		CV-A (%) = 21,73		CV-B (%) = 8,16

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GRANULOMETRIA DO SOLO (AREIA), EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	17341,04742	17341,04742	11,2783 **
Resíduo A	8	12300,49625	1537,56203	
Parcelas	9	29641,54367		
Fator B (Camadas)	2	108831,62694	54415,8135	134,2582 **
Int. Ax B	2	27136,55600	13568,278	33,4765 **
Resíduo B	16	6484,91405	405,30713	
Total	29	172094,64066		
MG = 456,47082		CV-A (%) = 8,59		CV-B (%) = 4,41

APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GRANULOMETRIA DO SOLO (SILTE), EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	1816,00605	1816,00605	0,7517 ns
Resíduo A	8	19326,47494	2415,80937	
Parcelas	9	21142,48099		
Fator B (Camadas)	2	11487,07418	5743,53709	20,0872 **
Int. Ax B	2	6595,99801	3297,999	11,5343 **
Resíduo B	16	4574,87592	285,92975	
Total	29	43800,4291		
MG = 255,94019		CV-A (%) = 19,20		CV-B (%) = 6,61

APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DO SOLO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	0,00671	0,00671	3,2202 ns
Resíduo A	8	0,01668	0,00208	
Parcelas	9	0,02339		
Fator B (Camadas)	2	0,04103	0,02052	6,8824 **
Int. Ax B	2	0,05900	0,02950	9,8966 **
Resíduo B	16	0,04769	0,00298	
Total	29	0,17111		
MG = 1,47620		CV-A (%) = 3,09		CV-B (%) = 3,70

APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DE PARTÍCULAS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	0,00123	0,00123	1,6706 ns
Resíduo A	8	0,00590	0,00074	
Parcelas	9	0,00713		
Fator B (Camadas)	2	0,00050	0,00025	0,8104 ns
Int. Ax B	2	0,00117	0,00059	1,8972 ns
Resíduo B	16	0,00494	0,00031	
Total	29	0,01374		
MG = 2,61446		CV-A (%) = 1,04		CV-B (%) = 0,67

APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA POROSIDADE DO SOLO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	0,00057	0,00057	1,4040 ns
Resíduo A	8	0,00322	0,00040	
Parcelas	9	0,00379		
Fator B (Camadas)	2	0,00616	0,00308	8,2192 **
Int. Ax B	2	0,00865	0,00432	11,5358 **
Resíduo B	16	0,00600	0,00037	
Total	29	0,02459		
MG = 0,43536		CV-A (%) = 4,61		CV-B (%) = 4,45

APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O LOG DA PERMEABILIDADE INTRÍNSECA DO SOLO AO AR, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	2,68706	2,68706	14,9014 **
Resíduo A	8	1,44258	0,18032	
Parcelas	9	4,12963		
Fator B (Camadas)	2	0,33347	0,16673	2,1146 ns
Int. Ax B	2	0,14595	0,07297	0,9255 ns
Resíduo B	16	1,26158	0,07885	
Total	29	5,87062		
MG = 1,32865	CV-A (%) = 31,96		CV-B (%) = 21,13	

APÊNDICE H – PARÂMETROS DO AJUSTE DOS DADOS DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO À EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN, PARA ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Sistemas	Camadas	α	m	n	θ_r	θ_s
	m				---cm ³ cm ⁻³ ---	
MATA	0,0 - 0,1	0,824	0,044	8,024	0,208	0,389
	0,1 - 0,2	0,788	0,055	7,378	0,232	0,440
	0,2 - 0,3	0,589	0,141	3,331	0,232	0,464
ABACAXI	0,0 - 0,1	0,729	0,053	8,931	0,199	0,442
	0,1 - 0,2	0,668	0,049	10,119	0,208	0,443
	0,2 - 0,3	0,649	0,052	9,669	0,201	0,434

Sistemas	Camadas	α	m	n	u_r	u_s
	m				---kg kg ⁻¹ ---	
MATA Sr	0,0 - 0,1	0,932	0,903	2,080	0,150	0,470
	0,1 - 0,2	0,546	1,642	1,626	0,183	0,518
	0,2 - 0,3	0,493	1,693	1,736	0,199	0,535

APÊNDICE I – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	0,00573	0,00573	20,4689 **
Resíduo A	8	0,00224	0,00028	
Parcelas	9	0,00797		
Fator B (Camadas)	2	0,00360	0,00180	8,4237 **
Int. AxB	2	0,00034	0,00017	0,7976 ns
Resíduo B	16	0,00342	0,00021	
Total	29	0,01534		
MG = 0,07401		CV-A (%) = 22,61		CV-B (%) = 19,76

APÊNDICE J – PARÂMETROS DO AJUSTE DOS DADOS DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (BASE MASSA) À EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE “S” E “S_r”, PARA ÁREA SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Sistemas	Camadas	α	m	n	u_r	u_s
	m				---kg kg ⁻¹ ---	
MATA	0,0 - 0,1	0,007	39,359	0,883	0,131	0,278
	0,1 - 0,2	0,015	31,701	1,036	0,153	0,304
	0,2 - 0,3	0,031	23,898	1,235	0,162	0,334
ABACAXI	0,0 - 0,1	0,586	0,889	2,042	0,136	0,294
	0,1 - 0,2	0,714	0,631	2,523	0,145	0,303
	0,2 - 0,3	0,577	0,960	2,046	0,144	0,314

APÊNDICE L – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S_{relativo}, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE ABACAXI E MATA SECUNDÁRIA NAS CAMADAS DE 0,0-0,1, 0,1-0,2 E 0,2-0,3 m.

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator A (Sistemas)	1	0,22378	0,22378	21,4561 **
Resíduo A	8	0,08344	0,01043	
Parcelas	9	0,30722		
Fator B (Camadas)	2	0,10697	0,05348	6,8447 **
Int. AxB	2	0,01513	0,00757	0,9684 ns
Resíduo B	16	0,12502	0,00781	
Total	29	0,55435		
MG = 0,45875		CV-A (%) = 22,26		CV-B (%) = 19,27