

Influência da aplicação de biofertilizante e matéria orgânica em algumas  
propriedades físicas de um solo da chapada do Apodi-CE

FRANCISCO DE ASSIS NOGUEIRA

NOVEMBRO - 2009  
FORTALEZA - CEARÁ  
BRASIL

Influência da aplicação de biofertilizante e matéria orgânica em algumas propriedades físicas de um solo da chapada do Apodi-CE

**FRANCISCO DE ASSIS NOGUEIRA**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal do Ceará - UFC, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre.

NOVEMBRO - 2009  
FORTALEZA - CEARÁ  
BRASIL

N712i Nogueira, Francisco de Assis  
Influência da aplicação de biofertilizante e matéria orgânica em algumas propriedades físicas de um solo da Chapada do Apodi-CE / Francisco de Assis Nogueira, 2009.  
82 f.; il. color. enc.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior  
Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Depto. de Ciências do Solo, Fortaleza, 2009.

1. Densidade do solo. 2. Estrutura do solo. 3. Índice S. I. Assis Júnior, Raimundo Nonato de (Orient.). II. Universidade Federal do Ceará – Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 631.4

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, outorgado pela Universidade Federal do Ceará. Uma via do presente estudo encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca de Tecnologia da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita conformidade com as normas da ética científica.

---

Francisco de Assis Nogueira

Dissertação aprovado em: 27/11/2009

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior - Doutor  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Ricardo Luiz Lange Ness - Doutor  
(Membro)

---

Prof(a). Dr(a) Waleska Martins Eloi - Doutora  
(Membro)

***“O homem pode tanto quanto sabe”***

***(Francis Bacon)***

## AGRADECIMENTOS

A Consciência Divina que vive em todas as coisas e ama de todas as formas;

A minha mãe Luzanira Lourdes de Jesus e meu pai Francisco Nogueira Nunes, por ter me ensinado a amar e respeitar e, mais do que tudo, a estar sempre presente;

Às minhas irmãs Luciana e Fabiana Nogueira Nunes, que desde o meu primeiro passo na pós-graduação me apoiaram, compartilhando comigo suas alegrias por minhas vitórias;

Ao prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pela orientação e conhecimento transmitido durante a realização deste trabalho, sempre acreditando na concretização do mesmo, e principalmente pela compreensão e paciência diante dos problemas enfrentados ao longo deste período;

A todos os professores do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Ceará – UFC, em especial ao prof. Dr. Fernando Felipe Ferreyra Hernandez pela amizade e por ter sempre deixado a disposição o Laboratório de Química do Solo, ao prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero pelo excelente trabalho que vem realizando à frente da coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas e ao prof. Dr. Boanerges Freire Aquino pela amizade e

está sempre a disposição para tirar qualquer tipo de dúvida em qualquer área da ciência do solo;

Aos diversos obstáculos que desafiaram a minha determinação e persistência;

À Universidade Federal do Ceará – UFC *campus* do Pici, pelo excelente curso de pós-graduação oferecido;

Ao prof. Dr. Ricardo Luiz Lange Ness, que desde os tempos do meu curso de Tecnologia em Recursos Hídricos Irrigação sempre mostrou confiança e me incentivou para que eu chegasse onde estou, apesar de hoje termos pouco contato sempre se mostrou pronto para ajudar;

Aos professores do IFCE, MSc. Arilene Franklin Chaves, MSc. Francisco Sildemberg e MSc. Francisco Limeira da Silva, pelas cartas de recomendação exigidas para o ingresso no curso;

Aos funcionários do departamento de Ciências do Solo, Francisco José (Franzé) do laboratório de Física do Solo e Geórgia do laboratório de Manejo e Conservação do Solo, pelo apoio, amizade e colaboração na realização das análises.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de mestrado concedida;

A empresa Frutacor pela concessão da área do experimento e diferentemente da maioria das empresas privadas, está sempre de portas abertas para desenvolvimento de novas pesquisas;

Ao Banco do Nordeste S.A. pelo financiamento do projeto;

Ao Tecnólogo Francisco Fábio Maia por sempre ter se prontificado a ajudar nas coletas de solo, aos alunos de graduação em agronomia da UFC, Kezia, Léo Jackson e Priscila, e aos amigos do Curso de Pós-graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas/UFC, pelo harmonioso convívio e amizade: Ana Paula Andrade Nunes, Antônia Gislaine, Camila Campos.

A todos aqueles não citados, mas que de algum modo contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho se tornasse uma realidade visível.

E, finalmente, para você, leitor: obrigado pela luz que você traz ao mundo. Que Deus lhe conceda felicidade e bênçãos abundantes, sempre.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Matéria orgânica e composto orgânico .....	3
2.2 Densidade do Solo .....	6
2.3 Densidade das partículas.....	9
2.4 Porosidade.....	10
2.5 Agregação e Estabilidade de Agregados .....	14
2.6 Consistência .....	17
2.7 Retenção de água, curvas características de umidade e Índice S.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	23
3.1 Localização e descrição da área de estudo.....	23
3.2 Solo .....	23
3.3 Clima.....	25
3.4 Relevo .....	25
3.5 Vegetação.....	25
3.6 Preparo do Biofertilizante .....	25
3.7 Histórico da área .....	26
3.8 Delineamento experimental .....	27
3.9 Trabalho de laboratório.....	28
3.9.1 Análises químicas .....	28
3.9.2 Análises físicas .....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5. CONCLUSÕES .....	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Produtividade das áreas .....	27
<b>Tabela 2:</b> Médias dos teores dos atributos químicos nas camadas de 0-5 e 15-20 cm ..	29
<b>Tabela 3:</b> Densidade do solo e densidade das partículas das camadas de 0-5 e 15-20 cm .....	34
<b>Tabela 4:</b> Porosidade total, microporosidade, e macroporosidade nas camadas de 0-5 e 15-20 cm .....	36
<b>Tabela 5:</b> Teores de agregados por classe de diâmetros nas camadas de 0-5 e 15-20 cm .....	39
<b>Tabela 6:</b> Índice de estabilidade de agregados (IEA), diâmetro médio ponderado (DMP) e carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0-5 e 15-20 cm .....	40
<b>Tabela 7:</b> Coeficientes de correlação de Pearson entre indicadores da estabilidade de agregados (diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA)) e os teores de carbono orgânico total (COT), nas camadas de 0-5 e 15-20 cm ..	43
<b>Tabela 8:</b> Parâmetros de ajuste das curvas características de umidade do solo de acordo com o modelo proposto por van Genuchten (1980) e o índice S de acordo com Dexter (2004a,b,c) nas camadas de 0-5 e 15-20 cm dos diferentes tratamentos .....	46
<b>Tabela 9:</b> Limites de plasticidade, liquidez, pegajosidade e índice de plasticidade nas camadas de 0-5 e 15-20 cm.....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Localização das áreas.....	24
<b>Figura 2:</b> Tanques de compostagem.....	26
<b>Figura 3:</b> Curvas características de umidade do solo dos diferentes tratamentos, na camada de 0-5 cm .....	45
<b>Figura 4:</b> Curvas características de umidade do solo dos diferentes tratamentos, na camada de 15-20 cm .....	45
<b>Figura 5:</b> Índice S em função da densidade do solo, na camada de 0-5cm .....	47
<b>Figura 6:</b> Índice S em função da densidade do solo, na camada de 15-20 cm .....	48
<b>Figura 7:</b> Índice S em função da porosidade total, na camada de 0-5 cm .....	48
<b>Figura 8:</b> Índice S em função da porosidade total, na camada de 15-20 cm .....	49
<b>Figura 9:</b> Índice S em função da microporosidade, na camada de 0-5 cm .....	49
<b>Figura 10:</b> Índice S em função da microporosidade, na camada de 15-20 cm.....	50
<b>Figura 11:</b> Comparação entre o limite de plasticidade medido (LPm) e o limite de plasticidade calculado de acordo com Dexter & Bird (2001) (LPc) na camada de 0-5 cm .....	52
<b>Figura 12:</b> Comparação entre o limite de plasticidade medido (LPm) e o limite de plasticidade calculado de acordo com Dexter & Bird (2001) (LPc) na camada de 15-20 cm.....	53

## RESUMO

O emprego de biofertilizantes líquidos como uma nova alternativa para melhorar a qualidade do solo vem crescendo em todo o mundo. Entretanto, pouco se conhece sobre os efeitos de sua aplicação sobre as propriedades físicas do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do tempo de aplicação de biofertilizante e da matéria orgânica em algumas propriedades físicas de um Cambissolo eutrófico, localizado na chapada do Apodi, município de Quixeré-CE, de textura franca e franca argilosa, nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, respectivamente. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, constando de cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos estudados foram: mata nativa (MN), e duas áreas cultivadas, nessas áreas foram retiradas amostras de dois locais: 1) das entre-linhas de plantio (ruas), onde são depositados os restos culturais (A1R e A2R) e, 2) das linhas de plantio (gotejador), onde recebe aplicação de biofertilizante, sendo que em uma área foi feita aplicação de biofertilizante por 5 anos (A1G) e na segunda área foi aplicado biofertilizante por 18 meses (A2G). Os resultados mostraram que o cultivo levou à diminuição do teor de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-5 cm. O maior teor de COT no sistema MN levou a diminuição da densidade das partículas na camada de 0-5 cm. A maior concentração de agregados estáveis ocorreu na classe de 4,76-2,00 mm nas camadas de 0-5 e 15-20 cm. O diâmetro médio ponderado (DMP) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) foram crescentes com o tempo de aplicação do biofertilizante, nas duas profundidades; os tratamentos MN e A1R apresentaram os maiores DMG e IEA, nas profundidades de 0-5 cm e 15-20 cm, respectivamente. O tempo de aplicação do biofertilizante e a matéria orgânica não promoveram diferenças estatísticas na densidade solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), limite de pegajosidade (LPeg) e no índice de plasticidade (IP) entre os tratamentos e profundidades avaliadas. O modelo de predição do LP a partir do ponto de inflexão da curva de retenção de água superestimou os valores do LP. As curvas de retenção de água de todos os tratamentos descrevem praticamente o mesmo comportamento, mantendo uma estreita relação com a estrutura do solo. O índice S apresentou valores maiores que 0,050 em todos os tratamentos e profundidades. Houve correlação linear do índice S com a densidade do solo, porosidade total e microporosidade nas duas profundidades. Não foi observada

correlação significativa do índice S com o teor de COT e nem com outros parâmetros da estrutura do solo, como macroporosidade, DMP e IEA.

**Termos de indexação:** densidade do solo, estrutura do solo e Índice S.

## ABSTRACT

The use of liquid biofertilizers as a new alternative for improving soil quality in the application period all over the world. However, little is known about the effects of its application on the physical properties of soil. The objective of this study was to evaluate the effects caused by the application period of biofertilizer and organic matter on some physical properties of Inceptisol eutrophic, located on Apodi Tableland, in Quixeré-CE, Brazil, with loamy and clay loamy texture, in the 0-5 and 15-20 cm layers, respectively. The experimental design consisted of randomized plots, with five treatments and four replications. The treatments studied were: native forest (NF), and two growing areas. In these areas samples were taken from two sites: 1) the distance between each plant row, where there was deposit of debris (A1R and A2R), and 2) at each plant row (drip), which receives application of biofertilizers, having been made application of biofertilizer in an area by five years (A1G) and second area for 18 months. The results showed that cultivation led to the decrease in soil total organic carbon (TOC) at 0-5 cm layer. The higher content of TOC in the NF system resulted in a decrease in the particle density in the 0-5 cm layer. The highest concentration of stable aggregates occurred in the class of 4.76-2.00 mm in the 0-5 and 15-20 cm layers. Mean weight diameter (MWD) and the index of aggregates stability (IEA) increased with the time of application of biofertilizer at both depths; the treatments MN and A1R showed the highest DMP and IEA, in the 0-5 and 15-20 cm layers, respectively. The application period of biofertilizer and organic matter did not promote significant differences in bulk density, porosity, macroporosity, liquid limit (LL), plastic limit (LP), sticky limit (SL) and plastic index (IP) among treatments and depths studied. The model for prediction of the LP from the point of inflection of the curve of water retention overestimated the values of LP. The curves of water retention in all treatments described virtually the same behavior, maintaining a close relationship with soil structure. The S index had values over 0.050 in the all treatments and depths. There was a linear correlation between the S index and bulk density, porosity and microporosity in both depths. There was no significant correlation between the S index and the content of COT neither any other parameters of soil structure, such as macroporosity, DMP and IEA.

**Index terms:** bulk density, soil structure, S index

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é o meio natural onde a planta encontra os elementos fundamentais que a ela permitem nascer, crescer e produzir. O sistema de produção agrícola é composto pelo solo, que contribui com a sua fertilidade; a semente, que contribui com o seu potencial genético; e o ambiente, que contribui com a luz, a temperatura e determina a época do ano mais propícia ao plantio.

A produtividade das plantas, no contexto agrícola, é um atributo que depende das condições climáticas e das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. As condições climáticas são tidas como fatores primários, por serem as de mais difícil controle. As condições físicas e biológicas são tidas como fatores secundários pois são menos difíceis de serem controladas, e por último, as condições químicas pelo fato de serem, relativamente, as mais fáceis de serem modificadas. Um solo pode ser quimicamente fértil, isto é, rico em nutrientes e o sistema agrícola não ser produtivo se as demais condições não forem favoráveis ao desenvolvimento da cultura.

À medida que a população do mundo aumenta, é óbvia a importância de um contínuo aumento na produção de alimentos. Sabe-se que a característica básica da produção de alimentos é o fator econômico, na busca desenfreada de a cada dia produzir o máximo, na menor área e no menor espaço de tempo, muitas vezes o solo é utilizado

sem a devida preocupação com seu empobrecimento, ou com o período necessário para sua recuperação, pressupondo-se que ele irá manter-se produtivo para sempre, o que não ocorre caso práticas conservacionistas de manejo de solo

A adição de matéria orgânica no solo é o melhor meio de conservar a qualidade do solo, pois ela é a fonte energética para a vida no solo e seus baixos conteúdos em solos de regiões áridas e semi-áridas pode levar a degradação do solo e conseqüentemente a incapacidade de uma produção.

A principal propriedade física do solo afetada pela matéria orgânica é a estrutura (Bronick & Lal, 2005). A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetados os atributos físicos do solo, como a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras, que são fundamentais para manter a capacidade produtiva do sistema.

Ultimamente, o emprego de biofertilizantes líquidos como uma nova alternativa para melhorar a qualidade do solo, agredir menos o ambiente, e reduzir o uso de fertilizantes minerais, e conseqüentemente diminuir os custos de produção, vem crescendo em todo mundo. Entretanto, não existe uma fórmula padrão para a produção de biofertilizantes. Receitas variadas vêm sendo testadas, utilizando-se componentes minerais para o enriquecimento do meio de cultivo (Dias et al., 2002; Medeiros & Lopes, 2006; Rodolfo Junior, 2007).

Alguns resultados positivos da aplicação de biofertilizantes líquidos na melhoria das propriedades químicas do solo, entretanto, pouquíssimos trabalhos avaliam os efeitos da aplicação desses biofertilizantes sobre as propriedades físicas do solo. Partindo da hipótese que a aplicação de biofertilizante e matéria orgânica alteram a estrutura do solo e, conseqüentemente, a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, estabilidade de agregados e a contenção de água. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tempo de aplicação de biofertilizante e matéria orgânica, comparativamente com uma área de mata nativa sobre algumas propriedades físicas de um Cambissolo eutrófico, localizado na chapada do Apodi, município de Quixeré-CE

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Matéria orgânica e composto orgânico

Na natureza, a matéria orgânica é produzida principalmente pelas plantas, através da conversão do CO<sub>2</sub> atmosférico em compostos contendo carbono, durante a fotossíntese. Ela exerce múltiplos efeitos sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, alterando-lhe para melhor o nível de fertilidade e produtividade (Silva et al., 2006c).

A matéria orgânica viva corresponde ao material orgânico associado às células de organismos vivos. A matéria orgânica não vivente contribui em média, com 98% do carbono orgânico total do solo, podendo ser dividida em matéria macrororgânica (3-20%) e húmus. O húmus é um compartimento que consiste de substâncias húmicas (70%) e não húmicas (30%) (Silva & Mendonça, 2007). As substâncias não humificadas incluem carboidratos, lipídeos, aminoácidos, proteínas, ligninas, ácidos nucleicos e uma variedade de ácidos orgânicos. Por sua vez, as substâncias húmicas são compostas pelas frações: ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas. As substâncias húmicas não são componentes do tecido da planta, mas foram sintetizados no solo a partir das substâncias não húmicas (Tan, 1998).

De acordo com Mendonça & Matos (2005), o carbono do solo pode estar na forma inorgânica (carbonato, bicarbonato e dióxido de carbono) e orgânica (polissacarídeos, ácidos graxos, aminoácidos, polifenóis, etc).

Os resíduos vegetais possuem em média 60% a 90% de água, dependendo da espécie vegetal, da parte da planta e do grau de maturação; as folhas são as mais ricas em água, enquanto que os ramos são os mais pobres (Kiehl, 1985). O restante da composição dos resíduos vegetais, a matéria seca, é constituída de carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H) e pequenas quantidades de enxofre (S), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Embora estes elementos possam estar presentes em pequenas quantidades, eles são muito importantes para compor a fertilidade do solo (Bot & Benites, 2005).

A velocidade de formação do húmus a partir de substâncias cruas depende da natureza física e química dessa matéria prima, dos microrganismos e das condições em que ocorre a decomposição, tais como umidade, a aeração da massa, a temperatura e o pH (Kiehl, 1985). O húmus formado no processo de humificação pode encontrar-se intimamente associado a outros constituintes e mesmo dentro de agregados (Silva et al., 2006c). Por esta razão os agregados do solo são conhecidos por proteger fisicamente o C e N. Os agregados formam uma barreira física que impede o contato dos microrganismos com os compostos orgânicos contidos no seu interior, isso irá retardar o processo de decomposição, o que irá resultar em um maior tempo de permanência do carbono orgânico no solo (Six et al., 2002).

Os resíduos vegetais e animais não são igualmente atacados nem se decompõem inteiramente de uma só vez; seus vários constituintes são decompostos em diferentes estádios, com diferentes intensidades e por diferentes populações de microrganismo; assim, os açúcares, os amidos e as proteínas solúveis, de mais fácil decomposição, são os compostos atacados em primeiro lugar, seguindo-se de hemiceluloses e demais proteínas; a população microbiana que realiza tais decomposições é variada e vai se alternando e predominando no meio de acordo com a quantidade e o tipo de material existente a ser digeridos. A celulose, hemiceluloses, os óleos, as gorduras, as resinas e outros constituintes das plantas são decompostos mais demoradamente por organismos específicos; a lignina, graxas e taninos são materiais considerados como os mais resistentes a decomposição (Kiehl, 1985). Roscoe et al. (2006) afirmam que para haver um efetivo acúmulo de matéria orgânica no solo, deve-

se ter uma taxa de entrada de carbono superior à taxa de decomposição e os resíduos que entram no solo serem gradativamente transformados.

Existe uma diferença entre matéria-prima de origem orgânica e fertilizante orgânico propriamente dito. Por exemplo, uma usina de tratamento de lixo domiciliar: o lixo que a usina recebe contém matéria orgânica viva ou inalterada (crua), considerada uma excelente matéria-prima ou fonte para o preparo do fertilizante orgânico denominado composto, mas não é ainda considerado um adubo; esta matéria orgânica viva é submetida a um tratamento específico, após esse tratamento tem-se um material beneficiado que entrou em processo de decomposição, pois uma intensa fermentação começa a alterar as características físicas e químicas dessa matéria-prima; finalmente, no pátio de cura, pelo processo conhecido por compostagem, a fração orgânica do lixo se transforma em húmus, que é um verdadeiro fertilizante orgânico, ou simplesmente composto orgânico (Kiehl, 1985).

Os compostos orgânicos, dentre eles os biofertilizantes, conferem ao solo aspectos nutricionais e biológicos que auxiliam no cultivo de plantas. Os biofertilizantes são compostos bioativos, resíduo final da fermentação de compostos orgânicos, contendo células vivas ou latentes de microorganismos (bactérias, leveduras, algas e fungos filamentosos) e por seus metabólitos, além de quelatos organo-minerais. São produzidos em biodigestores por meio de fermentação aeróbica e/ou anaeróbica da matéria orgânica (Medeiros et al. 2003).

Segundo Medeiros & Lopes (2006) o processo de fermentação é complexo e os microorganismos passam por quatro fases distintas: latência, crescimento exponencial, fase estacionária e morte celular. Cada microorganismo participante degrada alimento para outro, numa relação de interdependência mútua e harmônica e, assim, o processo de fermentação acaba sendo contínuo, desde que seja alimentado com meio nutritivo. Na literatura se encontram alguns resultados positivos da aplicação de biofertilizantes na produção de diversas culturas, bem como na decomposição da matéria orgânica crua, na melhoria das propriedades químicas e físicas do solo.

Oliveira et al. (2007), avaliando os efeitos da aplicação de doses crescentes de esterco bovino (0, 10, 20, 30, 40, 50 Mg ha<sup>-1</sup>) na ausência e presença de biofertilizante no cultivo de batata doce, constataram que o peso médio de raízes comerciais aumentou linearmente com as doses de esterco bovino, sendo superior na presença do biofertilizante. Diversos outros autores também constataram resultados positivos da aplicação de biofertilizantes sobre diversas culturas (Collard et al., 2001; Araújo et al.,

2007; Santos et al., 2007 e Mesquita et al., 2007). Entretanto, Castro et al. (2004) e Medeiros et al. (2008), avaliando a produtividade de quatro cultivares de beterraba e três cultivares de alface, respectivamente, não observaram aumento significativo na produtividade, apesar do aumento de biomassa e área foliar ao final do ciclo da beterraba.

Quanto aos efeitos dos biofertilizantes nas propriedades químicas do solo, Damatto Júnior et al. (2006), avaliando os efeitos de diferentes doses de composto orgânico a base de serragem de madeira e esterco bovino num Nitossolo Vermelho de textura argilosa cultivado com bananeira 'Prata-anã' (*Musa* AAB), quatro meses após a aplicação do composto orgânico na camada de 0 a 20 cm do solo, constataram incrementos no pH, matéria orgânica, fósforo, cálcio, soma de bases, CTC e saturação por bases do solo, entretanto o potássio e o magnésio no solo não foram afetados pelos tratamentos aplicados. Alterações ocasionadas pelo uso de esterco líquido de suínos em algumas características químicas de um Alissolo Crômico Órtico típico sob pastagem natural, foram investigadas por Ceretta et al. (2003), que constaram incrementos nos teores de P, Ca e Mg. Em Podzólico Vermelho-Amarelo cultivado com quatro espécies de forrageiras, Queiroz et al. (2004) constataram que o uso de esterco líquido suíno proporcionou o acúmulo de P, K, Na e Zn no solo, enquanto as concentrações de Mg e Cu diminuíram e a de Ca se manteve inalterada.

Quanto aos efeitos dos biofertilizantes sobre as propriedades físicas do solo, Oliveira et al. (1986) afirmam que o biofertilizante é capaz de reduzir a coesão das partículas do solo, tornando-o mais solto. Consequentemente haveria uma melhoria nas condições de arejamento e na circulação de água no solo, propiciando à planta um melhor desenvolvimento de suas raízes. No entanto, vale ressaltar que pouco se sabe sobre os efeitos da aplicação de biofertilizantes líquidos sobre as propriedades físicas do solo.

## 2.2 Densidade do Solo

Densidade do solo é definida como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 110 °C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (Kiehl, 1979; Dexter et al., 2008). As amplitudes de variação das densidades do solo nas camadas superficiais situam-se dentro dos seguintes limites

médios: solos argilosos 1,00 a 1,40 kg dm<sup>-3</sup>, solos arenosos, de 1,30 a 1,80 kg dm<sup>-3</sup> e solos orgânicos 0,20 a 0,60 kg dm<sup>-3</sup> (Libardi, 2005).

Solos de textura fina como, os franco-siltosos, argilosos e franco-argilosos, possuem densidades menores devido à tendência das partículas sólidas mais finas em se organizar em grãos porosos ou grânulos, especialmente se houver presença adequada de matéria orgânica, condição esta que assegura elevado espaço poroso, além de baixar a densidade do solo (Brady, 1989).

A densidade do solo geralmente aumenta com a profundidade, pois as pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as subjacentes provocam o fenômeno de adensamento, reduzindo a porosidade. A movimentação de material fino dos horizontes superiores para os inferiores, por eluviação, também concorre para reduzir os espaços porosos e aumentar a densidade dessas camadas (Kiehl, 1979). Segundo Freire & Freire (2007), esta movimentação também pode ocorrer em solos com altos teores de sódio (solos sódicos). Por ser um elemento com alto grau de hidratação, o sódio promove a expansão da dupla camada e, conseqüentemente, acarreta a dispersão das partículas do solo. Uma vez dispersas, essas se movimentam mais facilmente no solo, podendo causar adensamento dos horizontes do solo.

Os principais fatores que aumentam a densidade do solo estão geralmente associados com o preparo do solo e o cultivo intensivo. São decorrentes do tráfego de máquinas sobre o terreno nas operações de aração, gradagem, distribuição de corretivos, fertilizantes, defensivos, colheita e em áreas onde o pisoteio de animais é intenso. O aumento da densidade do solo resulta na sua compactação, ocasiona baixa emergência das plantas, variação no seu tamanho, folhas amareladas, sistema radicular superficial, raízes mal formadas ou tortas, com graves prejuízos para a absorção de água e nutrientes (Meurer, 2007).

Anjos et al. (1994), avaliando a densidade do solo das camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico álico, um Cambissolo húmico álico, um Cambissolo Bruno húmico e um Podzólico Vermelho Escuro distrófico, sob mata nativa, cultivo convencional, plantio direto, cultivo convencional com subsolagem e pastagem nativa, em Santa Catarina-SC, com exceção ao solo Podzólico, observaram aumento significativo da densidade do solo nos diferentes sistemas de manejo em relação à mata nativa.

Machado et al. (2008) avaliaram três Latossolos Vermelhos distróficos, contíguos e localizados em Maringá-PR, utilizados por mais de vinte anos com mata

(floresta estacional semidecidual), pousio (vegetado permanentemente com gramínea) e cultivo (culturas anuais com preparo convencional do solo), e constataram que a intensificação do uso do solo de mata para pousio e cultivo proporcionou incremento significativo da densidade do solo.

Beutler et al. (2007b), avaliando um Latossolo Vermelho de textura média, em Jaboticabal, SP, constataram que a densidade do solo na superfície quando esteve ao redor de  $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$  as raízes de soja diminuíram o desenvolvimento em profundidade e a produtividade decresceu. Silva et al. (2006d), avaliando os efeitos da compactação sobre os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Amarelo oxidico-gibbsítico e um Latossolo Amarelo caulínítico, em Santa Maria de Itabira, MG, constataram que o solo caulínítico mais susceptível à compactação que o solo oxidico-gibbsítico. A compactação aumentou a microporosidade e a retenção de água no solo, nas tensões 10 e 1.500 kPa; no entanto, este aumento não se expressou em termos de água disponível.

A matéria orgânica é capaz de reduzir a densidade do solo, pois além do fato de estar juntando ao solo (que possui densidade entre  $1,00$  e  $1,80 \text{ kg dm}^{-3}$ ), um material cuja densidade média vai de  $0,20$  a  $0,40 \text{ kg dm}^{-3}$ , existe também a ação das partículas cimentantes da matéria orgânica sobre as partículas primárias do solo (areia, silte e argila), que irá melhorar a estruturação do solo, tornando-o mais “solto” e menos denso. (Mello et al., 1983; Kiehl, 1985; Meurer, 2007).

Vale ressaltar que os efeitos da matéria orgânica na densidade do solo dependem, principalmente, do tipo de solo e da quantidade e qualidade de material orgânico aplicado. Boeira & Souza (2007) avaliaram o efeito de aplicações consecutivas de lodo de esgoto de origem urbana (Estação de Tratamento de Esgotos de Franca-SP) ou urbano-industrial (Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri-SP) sobre a densidade do solo na camada de 0-10 e 20-40 cm de um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa, em Jaguariúna, SP, e constataram que as densidades da camada de 0-10 cm diminuíram significativamente com o aumento das doses dos dois tipos de lodo de esgoto, após três aplicações dos resíduos e três cultivos, no entanto apenas os tratamentos do solo com o lodo de Barueri-SP apresentaram correlação positiva significativa entre a densidade do solo e o teor de C. Melo et al. (2004), avaliando o efeito da aplicação de biossólidos na densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd), textura média, e Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), textura argilosa, pela utilização de doses acumuladas em 5 anos, de 0,0, 25,0, 47,5 e 50,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de matéria seca de biossólido, incorporadas até 10 cm com grade,

observaram que no quinto ano, a densidade do solo foi inferior na dose de 50,0 Mg ha<sup>-1</sup> no LVd de textura média. Entretanto, Jorge et al. (1991), utilizando um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico de textura argilosa, cultivado com milho em Cordeirópolis, SP, não observaram alteração significativa na densidade do solo, quatro anos após uma aplicação de 80 Mg ha<sup>-1</sup>.

De maneira geral, pode-se afirmar que, quanto mais elevada for a densidade do solo, maior será sua compactação, menor será sua estruturação, menor sua porosidade total e, conseqüentemente, maiores serão as restrições para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Kiehl, 1979).

### 2.3 Densidade das partículas

A densidade das partículas do solo representa uma propriedade física do solo e é definida como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas, excluindo a água e o ar (Kiehl, 1979; Rühlmann et al., 2006). Segundo Amaro Filho et al. (2008), a importância da determinação da densidade das partículas consiste, ao menos, nas seguintes razões: 1) permite uma maior precisão no cálculo da porosidade do solo quando se conhece a densidade do solo; 2) é utilizada para calcular a velocidade de sedimentação das partículas em meio líquido e/ou gasoso; 3) fornece uma idéia aproximada da composição mineralógica do solo, como também de seu conteúdo de matéria orgânica (solos com densidade das partículas alta têm, geralmente, teores elevados de materiais pesados).

De maneira geral, a densidade das partículas é usada nas expressões matemáticas, em que se calculam volumes ou massas sólidas das amostras. Assim, por exemplo, ao se estudar a porosidade, a densidade do solo, a aeração e na determinação de sedimentação das partículas em variados fluidos, segundo a lei de Stokes, torna-se necessário conhecer a densidade das partículas (Kiehl, 1979).

A maioria dos solos minerais consiste principalmente de uma grande variedade de minerais e uma pequena quantidade de matéria orgânica (Foth, 1990). Segundo Libardi (2005) as amplitudes de variação das densidades dos sólidos de uma amostra de solo são dadas por: feldspatos de 2,50 a 2,60 kg dm<sup>-3</sup>, mica de 2,70 a 3,00 kg dm<sup>-3</sup>, quartzo de 2,50 a 2,80 kg dm<sup>-3</sup>, minerais argila de 2,20 a 2,60 kg dm<sup>-3</sup>. Completando esta lista da densidade dos principais minerais encontrados em solos brasileiros,

aparecem os óxidos de ferro: goetita ( $4,37 \text{ kg dm}^{-3}$ ), hematita ( $4,90$  a  $5,30 \text{ kg dm}^{-3}$ ) e magnetita ( $5,18 \text{ kg dm}^{-3}$ ); e o óxido de alumínio: gibbsita ( $2,30$  a  $2,40 \text{ kg dm}^{-3}$ ) (Kiehl, 1979). O quartzo por ser mineral predominante na maioria dos solos minerais, é comum assumir que a densidade dos sólidos da maioria dos solos como sendo igual a  $2,65 \text{ kg m}^{-3}$  (Skopp, 2002). No entanto, Kiehl (1979) ressalta que este valor é mais comum em regiões de clima frio, onde os solos apresentam baixos teores de óxidos; em regiões de clima tropical e subtropical, como no Brasil, são frequentes solos com densidade das partículas próxima de  $3,0 \text{ kg dm}^{-3}$ .

O tamanho das partículas e a arrumação dos sólidos dos solos não exercem influência na densidade das partículas, pois esta depende da composição química e da estrutura cristalográfica da partícula mineral (Brady, 1989). A matéria orgânica, por possuir densidade das partículas entre  $0,2$  a  $0,4 \text{ kg dm}^{-3}$ , quando presente em quantidades significativas, exerce influência marcante na densidade das partículas do solo; o que responde pelo fato dos horizontes superficiais possuírem densidade das partículas menores do que os subsuperficiais.

Costa et al. (2003), avaliando a densidade das partículas de um Latossolo Vermelho distrófico sob vegetação de cerrado nativo, mas que apresenta ao longo do perfil camadas de adensamento, de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico extremamente pobre em matéria orgânica e de um Gleissolo Melânico tb distrófico localizada numa área com grande acúmulo de matéria orgânica, recoberto por vegetação de gramínea, observaram que os valores das densidades das partículas nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm foram respectivamente,  $2,26$  e  $2,36 \text{ kg dm}^{-3}$  no Gleissolo,  $2,56$  e  $2,59 \text{ kg dm}^{-3}$  no Latossolo Vermelho e  $2,50$  e  $2,88 \text{ kg dm}^{-3}$  no Latossolo Vermelho-Amarelo. Melo (2006), avaliando a densidade das partículas de um Latossolo Roxo cultivados no sistema de plantio direto, encontrou valores médios de densidade das partículas de  $2,60$ ;  $2,88$ ;  $2,84$  e  $2,97 \text{ kg dm}^{-3}$ , nas camadas de 0-5; 5-10; 10-15 e 15-20 cm, respectivamente.

## 2.4 Porosidade

A porosidade total de um solo é a porção volumétrica do solo não ocupada por sólidos, pode ser calculada pela relação existente entre a densidade do solo e a densidade das partículas (Vieira, 1988). O arranjo ou a geometria das partículas do solo determinam a quantidade e a natureza dos poros existentes. As partículas do

solo variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, fazendo com que os poros difiram consideravelmente quanto à forma, comprimento, largura e tortuosidade (Kiehl, 1979). A porosidade dos solos arenosos situa-se na faixa de 35% a 50%, enquanto que nos mais argilosos varia de 40% a 60%, podendo atingir valores superiores (Brady, 1989).

O conhecimento da porosidade total de um solo não é tão significativo quanto se conhecer a distribuição de poros por tamanho, a qual proporciona maiores informações sobre o armazenamento, a disponibilidade e o transporte da solução e do ar no solo (Baver et al., 1972).

De acordo com Prevedello (1996), os poros do solo são classificados de acordo com o seu diâmetro como: 1) macroporos - são aqueles cujo diâmetro é superior a 300  $\mu\text{m}$ , 2) mesoporos - são aqueles de diâmetro entre 50  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  e, 3) microporos – poros menores que 50  $\mu\text{m}$ . Entretanto, vale ressaltar que a especificação dos limites para a classificação em macro e microporos não tem sido unânime entre os pesquisadores.

Segundo Lal & Shukla (2004) os poros do solo podem ser classificados baseados na sua origem ou gênese. Segundo os autores, os macroporos ou poros de transmissão são formados basicamente pela atividade biológica. Portanto, os teores de matéria orgânica do solo e de argila desempenham um papel importante na sua formação e estabilização. Os macroporos são facilmente alterados com a utilização e manejo do solo. Os mesoporos são formados pelo fenômeno da expansão e contração do solo provocado pelo molhamento e secamento alternado, pela da ruptura ou entupimento dos macroporos, desenvolvimento de raízes, fungos e micorriza. Estes são fortemente influenciados pela distribuição granulométrica, teor de matéria orgânica, argila e mineralogia, e são pouco influenciados pelo manejo. Os microporos ou poros residuais são criados pela contração da matriz do solo e/ou ruptura dos mesoporos. Estes são menos afetados pelo manejo do solo e são biologicamente inativos, são essencialmente cheios de água, inacessível aos microrganismos, e pode ser estrategicamente importante na captação de carbono no solo.

Levando em consideração o comportamento da água no solo, Prevedello (1996) afirma que os macroporos são mais importantes para a drenagem do excesso de água do solo, ou seja, são relacionados com a aeração e drenagem. Quando os macroporos são drenados, os mesoporos ganham importância na redistribuição da água, sem haver uma diferenciação nítida nessa passagem. Embora esse movimento continue

a se processar muito mais lentamente dentro dos microporos, parte dessa água remanescente é que garante a sobrevivência da grande maioria das espécies vegetais.

De acordo com as mudanças na estrutura do solo causadas pelo preparo do solo, a distinção da porosidade total do solo pode ser feita em porosidade textural e porosidade estrutural (Guérif et al., 2001). A porosidade textural ocorre entre as partículas minerais primárias, enquanto a porosidade estrutural compreende microfissuras, fissuras, bioporos e macroestruturas produzidas pelo manejo. A porosidade textural é pouco afetada pelo manejo do solo, enquanto a porosidade estrutural é sensível a diversos fatores como manejo, compactação e cultivo. Geralmente solos com apenas porosidade textural apresentam má qualidade física. Com exceção de algumas areias, tais solos geralmente apresentam péssimas condições operacionais, baixas taxas de infiltração de água, etc (Dexter, 2004a).

Solos argilosos são mais propícios a se tornarem mal aerados, isso se deve ao fato deles possuírem poucos macroporos, e quando molhados, são facilmente preenchidos por água. Por outro lado, solos arenosos tendem a apresentar um bom arejamento ou difusão gasosa, devido à maior parte de sua porosidade ser composta por macroporos (Foth, 1990). A aplicação de matéria orgânica melhora a agregação e a estruturação de ambos os solos, corrigindo, conseqüentemente a falta ou excesso de aeração e drenagem (Kieh, 1985)

Trannin et al. (2008), avaliando os efeitos da aplicação de doses crescentes de um bio sólido industrial (0, 6, 12, 18 e 24 Mg ha<sup>-1</sup> base seca) e da adubação mineral no cultivo de milho sobre atributos físicos de um Cambissolo distrófico, durante dois anos consecutivos, constataram que a aplicação do bio sólido aumentou a porosidade total e a microporosidade, e reduziu a densidade do solo. Entretanto, Melo et al. (2004), avaliando o efeito da aplicação de bio sólido nos atributos físicos de Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd), e Latossolo Vermelho eutroférico argiloso (LVef), constataram que macroporosidade foi superior a partir de 47,5 Mg ha<sup>-1</sup> e 50,0 Mg ha<sup>-1</sup> de bio sólido, no LVd e LVef, respectivamente.

O solo ideal tem sido referido como aquele que apresenta 50% de macroporosidade e 50% de microporosidade. Considerando, porém, que as raízes podem se desenvolver com porosidade de aeração acima de 10% e que o conteúdo de água armazenada deve ser em maiores quantidades que a do ar, o solo ideal passa a ser o que apresenta um terço de macroporos para dois terços de microporos (Kiehl, 1979). Vale ressaltar que os valores de macro e microporosidade ideais são dependentes do tipo de

cultura, pois algumas culturas requerem maiores valores de poros de aeração do que outras. Por exemplo, Micucci & Taboada (2006) verificaram que as raízes de soja cresceram em valores de macroporosidade consideravelmente menores que  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em razão da capacidade das raízes de aumentarem o diâmetro de poros durante o seu crescimento, ou quebrarem agregados do solo quando neste prevalece condição adequada de umidade. Já Silva et al. (2004) constataram que o crescimento de plantas de milho começou a decrescer a partir da porosidade de aeração de  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , porém de forma mais acentuada a partir de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

As propriedades físicas do solo são importantes para o desenvolvimento das culturas e freqüentemente estão correlacionadas, ressaltando a necessidade de desenvolver índices que integrem diferentes variáveis físicas do solo, como densidade, porosidade, conteúdo de água e resistência do solo à penetração (Wu et al., 2003; Karlen et al., 2001, 2003). De acordo com Karlen et al., (2001), os indicadores de qualidade de solo devem apontar a degradação, a manutenção ou a recuperação da qualidade do solo, possibilitando a tomada de decisão do sistema de manejo mais sustentável.

Paralelamente à evolução do conceito de qualidade do solo, Letey (1985) propôs o Non-Limiting Water Range, integrando as relações entre esses indicadores de qualidade física (densidade, porosidade, conteúdo de água e resistência do solo a penetração) com a produção das culturas. Esse conceito foi aprimorado por Silva et al. (1994) como indicador da qualidade estrutural do solo, denominando-o Least Limiting Water Range, e por Tormena et al. (1998), traduzindo-o para Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

O IHO é fortemente dependente da condição estrutural do solo, uma vez que a degradação da estrutura resulta na redução do espaço poroso destinado à aeração, comprometendo a difusão de oxigênio às raízes, a disponibilidade de água e/ou implicando no aumento da resistência do solo à penetração (RP) (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998). O IHO é determinado a partir dos limites críticos para os seguintes indicadores de qualidade física do solo: conteúdo de água retido na capacidade de campo a 8 kPa para solos textura arenosa e 10 kPa textura argilosa ( $\theta_{CC}$ ); conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente a 1.500 kPa ( $\theta_{PMP}$ ); porosidade de aeração mínima de 10% ou  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $\theta_{PA}$ ); e conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração atinge valores de 2,0 a 3,5 MPa, dependentes da

cultura e sistema de manejo de solo (Silva et al., 1994; Beutler et al, 2007a; Tormena et al., 2007).

## 2.5 Agregação e Estabilidade de Agregados

Bronick & Lal (2005) definem agregados do solo como sendo partículas secundárias formadas da combinação de partículas minerais com substâncias orgânicas e inorgânicas. A agregação melhora a porosidade, disponibilidade de água, atividade microbiana e a produtividade de plantas, pois propicia um melhor desenvolvimento ao seu sistema radicular (Bendfeldt, 1999).

O principal interesse ao se avaliar a agregação do solo é a distribuição de tamanhos, a quantidade e a sua estabilidade (Kiehl, 1979). De acordo com o autor, para haver formação dos agregados no solo são necessárias duas condições fundamentais, primeiramente que uma força mecânica qualquer provoque a aproximação das partículas do solo – esse movimento pode ser causado pelo crescimento das raízes, por animais de hábito terrestre, pelo fenômeno da expansão e contração do solo provocado pelo molhamento e secamento alternado, ou pela floculação; a segunda condição é a de que, após o contato das partículas, haja um agente cimentante para consolidar essa união, gerando o agregado.

A matéria orgânica humificada, juntamente com os minerais argila, são os dois agentes cimentantes que mais contribuem para a agregação do solo (Kiehl, 1985). Glicose e polissacarídeos, quando adicionados ao solo, aumentam a estabilidade mas tem efeito de curta duração, enquanto materiais como tecidos vegetais, que se decompõem mais lentamente, atuam também vagorosamente, mas com efeitos mais persistentes (Siqueira et al. 1994).

De acordo com Roscoe et al. (2006), no processo de agregação do solo primeiramente ocorre à interação da fração mineral com a matéria orgânica humificada, formando os organo-minerais. Numa segunda fase, com a inclusão de mais matéria orgânica humificada e parte de matéria orgânica transitória, há uma formação de microagregados. Finalmente, os últimos são unidos uns aos outros, formando macroagregados. Tal processo, segundo os autores, promove melhor infiltração e armazenamento de água, maior aeração, menor resistência ao crescimento de raízes, melhores condições para o desenvolvimento da biota do solo e das próprias plantas, além de melhorar a estabilidade dos agregados.

A estabilidade de agregados é um indicador da qualidade do solo que ressalta a resistência do solo a forças perturbadoras (Baver et al., 1972). A formação de agregados estáveis implica que as partículas primárias fiquem tão fortemente ligadas a ponto de não se dispersarem em água. Só a floculação não é suficiente para garantir essa estabilidade, ou seja, a formação de agregados estáveis inclui uma cimentação das partículas floculadas (Amaro Filho et al., 2008).

Apesar de representarem uma pequena fração dos constituintes orgânicos do solo, as raízes das plantas crescendo no solo exercem grande influência na formação e estabilidade dos agregados do solo; além do aumento da pressão mecânica que contribui para aproximar as partículas de solo, elas também produzem exsudatos com capacidade cimentante (Silva & Mielniczuk, 1997). Segundo Silva & Mendonça (2007), esses exsudatos podem servir de substrato para microrganismos, estimulando sua atividade, levando à produção de novos agentes cimentantes. Wohlenberg et al. (2004) afirmam que a estabilidade e a distribuição do tamanho de agregados são maiores em sistemas de cultivo que aportam materiais orgânicos e cobrem o solo durante todo o ano. Os autores avaliaram, ao longo do tempo, a influência de sistemas de culturas, de cobertura do solo e do teor de matéria orgânica sobre a agregação de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico em seu estado natural e sob rotação de culturas, constatando que a maior estabilidade estrutural ocorreu no solo sob campo natural e a menor em solo descoberto, em virtude do intenso preparo do solo e da redução do teor de matéria orgânica, aumentando os agregados de menor tamanho.

Aggelides & Londra (2000), avaliando os efeitos de diferentes doses (0, 75, 150 e 300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) de um composto orgânico produzido a base de lixo urbano, sedimentos de esgotos e serragem na agregação e na estabilidade de agregados de um solo franco e um argiloso, constataram que o diâmetro médio ponderado (DMP) para os dois solos decresceu significativamente com a adição do composto, mas por outro lado o índice de estabilidade de agregados aumentou de 0,54, 0,60, 0,63, 0,68 kg kg<sup>-1</sup> e 0,71, 0,73, 0,73, 0,76 kg kg<sup>-1</sup> no solo franco e argiloso, respectivamente para as doses de 0, 75, 150 e 300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

Além da matéria orgânica, a estabilidade dos agregados do solo também depende da sua textura, mineralogia (óxidos e silicatos), teores e tipos de cátions (Ferreira e al., 1999; Meurer et al., 2006).

O efeito granulante da matéria orgânica é mais acentuado em solos que contêm pequenas quantidades de argila (Amaro Filho et al., 2008). Segundo os autores, a

correlação entre matéria orgânica e agregação é alta quando o conteúdo de argila é menor que 25%. Ambos, argila e colóides orgânicos, são responsáveis pela maior proporção de agregação do solo. No entanto, em solos com elevados conteúdos de matéria orgânica o efeito da argila na formação de agregados chega a ser insignificante.

Devido à forte interação dos óxidos de Fe e de Al com a caulinita, nos solos muito intemperizados os óxidos são os principais agentes estabilizantes, tendendo a sobrepor os efeitos dos materiais orgânicos. Esta tendência é realçada devido ao alto valor de ponto de carga zero (PCZ) que os óxidos de Fe e de Al (7,8 a 9,5) apresentam em relação às caulinitas (menor que 3,5 a 4,6). Considerando que o pH da maioria dos solos tropicais está entre 4,0-6,0, espera-se que a caulinita apresente carga líquida negativa e os óxidos carga líquida positiva. Nestas condições, a formação de microagregados ocorre devido a interações eletrostáticas entre os minerais coloidais do solo. Contudo, a matéria orgânica quando presente nesses tipos de solos aumenta à estabilização conferida pela fração mineral do solo, atuando fortemente em fases posteriores da agregação e na formação de macroagregados (Sparks, 1995; Six et al. 2002; Meurer et al., 2006; Silva & Mendonça, 2007)

O comportamento da dupla camada elétrica também pode ser fundamental na formação de agregados (Gavande, 1973). Segundo Meurer et al. (2006), a espessura da dupla camada difusa é afetada pela concentração e pelo tipo de eletrólito. Cátions com alto grau de hidratação ( $\text{Na}^+$ , por exemplo), aumentam a distância entre as partículas, desse modo, as forças atrativas de curto alcance não se manifestam e o sistema dispersa, causando o rompimento dos agregados. Por outro lado, cátions com baixo grau de hidratação ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Al}^{+3}$ ), localizam-se na camada de Stern, diminuem as forças repulsivas entre as partículas, causando contração da dupla camada difusa agindo assim como floculantes.

Barral et al.(1998) avaliaram os efeitos do Fe e da matéria orgânica (MO) sobre a estabilidade dos agregados menor que 4 mm em um Cambissolo crômico e um Cambissolo distrófico, cultivados com milho, na Galicia (Espanha). O Cambissolo crômico, por possuir maiores teores de Fe e MO, apresentou agregados mais estáveis.

Segundo Albuquerque et al. (2003), o rompimento dos agregados também pode ser decorrente do uso agrícola indevido, este rompimento normalmente acarreta restrições ao crescimento radicular, reduz a exploração de água e nutrientes pelas culturas. Essas alterações são, muitas vezes, manifestadas pela compactação acentuada, diminuindo a porosidade e a infiltração de água no solo, aumentando o acúmulo de água

sobre a superfície e a erosão hídrica. O selamento superficial do solo nessas condições restringiria a emergência das plantas e poderia favorecer a ocorrência de doenças radiculares. Em conjunto, essas modificações físicas viriam a comprometer o desenvolvimento das culturas aí presentes.

## 2.6 Consistência

Consistência do solo refere-se às manifestações das forças físicas de coesão e adesão que agem no solo de acordo com o teor de água nele presente. É importante distinguir as forças de coesão e de adesão que operam no solo. Adesão é a atração entre diferentes objetos, refere-se à atração das moléculas de água com as partículas sólidas do solo. Coesão é a atração entre objetos similares, refere-se a união entre as partículas do solo. Estas forças surgem devido a ligações de partículas através de pontes formadas por cátions; devido à atração eletrostática entre as superfícies das argilas carregadas negativamente e as bordas imperfeitas das argilas que expõem cargas positivas; devido às forças de van der Waals; por efeitos cimentantes da matéria orgânica, dos óxidos de ferro e alumínio e; devido a tensão superficial da água (Kiehl, 1979; Lal & Shukla, 2004).

Segundo Amaro Filho et al. (2008), a importância de conhecer a consistência do solo está no fato de, dentre tantos aspectos, constituir um parâmetro chave a ser considerado para: a) a seleção de materiais a serem usados na construção de estradas, barragens e outras obras rurais; b) a determinação do momento ótimo para as operações com maquinaria e implementos agrícolas; c) o manejo, quando devem ser realizadas movimentações de terra em ações paisagísticas ou construtivas; e d) estudos de movimentos em massa, tipo deslizamentos.

Segundo Souza et al. (2000), a consistência do solo determina o comportamento do solo ante determinadas tensões e deformações, ela exerce considerável influência sobre o regime de água no mesmo, afetando a condutividade hidráulica e permitindo fazer-se inferências sobre a curva de umidade; além do mais, é determinante na resistência do solo à penetração e na compactação e seu conhecimento possibilita a determinação do momento adequado do uso de técnicas que favoreçam um bom manejo do solo, propiciando melhor conservação do mesmo, além de diminuir a demanda energética nas operações mecanizadas.

Reconhecem-se três estados de umidade no solo (seco, úmido e molhado) e cinco formas de consistência: 1) tenaz – com características pronunciadas de extrema dureza e resistência a ruptura; 2) friável – caracterizada pelo fato de um corpo de prova úmido apresentar, ao ser comprimido, uma leve deformação e sinais de rachadura antes da ruptura; 3) plástica – caracterizada pela possibilidade do solo sofrer deformações rápidas sem, contudo, ocorrer variação volumétrica significativa e ruptura; 4) pegajosa – evidenciada pela propriedade de aderir em superfícies e, 5) fluida – caracterizada pelo fato de a massa de solo tomar forma do recipiente que a contém e ser vertida como um líquido denso (Baver et al., 1972; Kiehl, 1979; Amaro Filho et al., 2008).

A sequência das consistências apresentadas se dá com o aumento gradativo da umidade do solo. Consequentemente, a passagem de uma forma de consistência para outra não se dá de forma repentina, mas gradual, o que torna difícil o estabelecimento de critérios para definir os limites entre as distintas formas. Na verdade, os limites foram estabelecidos de forma arbitrária, a partir de ensaios padronizados. Os limites são conhecidos na literatura como limites de Atterberg, que foi o primeiro pesquisador a se preocupar em estabelecê-los, sugerindo três valores: 1) limite plástico superior ou limite de liquidez (LL) – corresponde ao conteúdo de água no qual o solo pode ligeiramente fluir sob uma força aplicada; 2) limite plástico inferior ou limite de plasticidade (LP) – corresponde ao conteúdo de água no qual o solo dificilmente pode ser moldado como um filete e; por fim o, 3) índice de plasticidade (IP) – corresponde à diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. Esse índice mede a maior ou menor plasticidade do solo e, fisicamente representa a quantidade de água necessária a acrescentar ao solo para que ele atinja a forma líquida. Para índice de plasticidade com valor  $<1$ , diz-se que o solo não apresenta plasticidade, de 1 a 7 é fracamente plástico,  $>7$  a 15 é medianamente plástico e acima de 15 altamente plástico (Amaro Filho et al., 2008).

A determinação dos limites de consistência do solo é utilizada para indicar que o solo só pode ser preparado a partir do ponto em que o teor de água seja menor que o LP (nessa condição o solo pode sofrer deformações não recuperáveis), isto é, nem molhado e nem seco demais, quando se encontra friável. Pois se estiver muito seco, apresenta alta coesão, exigindo maior força de tração das máquinas agrícolas. Por outro lado se o solo estiver muito úmido, além de problemas de sustentação na capacidade de tração do trator, ocorrerão danos à estrutura, favorecendo a degradação pela pressão exercida pelas máquinas e implementos agrícolas, compactando o solo (Baver et al., 1972; Kiehl, 1979; Silva et al., 2003).

Alguns autores consideraram como umidade ótima para o preparo do solo o valor de 0,9 do LP (Mueller et al., 2003). Entretanto, vale ressaltar este valor não tem sido unânime entre os pesquisadores. Silva et al. (2006a) quando avaliaram a capacidade de suporte de carga em um Latossolo Amarelo distrófico, observaram que o preparo do solo na umidade próximo do LP pode causar compactação no solo, principalmente nas camadas sub-superficiais.

Dexter & Bird (2001) observaram que a umidade ótima para o manejo do solo seria igual a umidade contida no ponto de inflexão (detalhes no tópico 2.7) da curva de retenção, a umidade nesse ponto pode ser facilmente calculado utilizando os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem (1986), de acordo com a equação 3 (ver no tópico 3.9.2), os autores também observaram que utilizando o valor da umidade no ponto de inflexão ( $\theta_{INFL}$ ) e o teor de água contido quando o solo estiver saturado ( $\theta_{SAT}$ ), seria possível estimar o limite de plasticidade através da equação 4 (ver no tópico 3.9.2).

Segundo Lal & Shukla (2004), os limites de Atterberg são afetados pela natureza das partículas sólidas do solo e por fatores semelhantes aos que afetam a espessura e a dinâmica da dupla camada difusa, nestes fatores estão incluídos a argila, areia e teor de matéria orgânica. Segundo o autor, as partículas coloidais (argilas ou colóides orgânicos) que irão determinar quantidade de água absorvida, e com isso irá determinar também a coesão e a plasticidade. Solos com baixos teores de argila apresentam baixos limites plásticos superiores e, portanto, uma baixa IP. Em solos inorgânicos, ou seja, com teor de matéria orgânica inferior a 5%, o aumento no teor de matéria orgânica aumenta tanto o LP como o LL. Portanto, os teores de matéria orgânica no solo têm efeito sobre o IP.

Malkawi et al. (1999) trabalhou com oito níveis de matéria orgânica (0%, 5%, 10%, 12,5%, 15%, 17,5%, 20% e 30% em peso) de turfa produzida em Nevema, na Holanda em um solo ílítico, a mistura foi molhada e deixada incubada em sacos plásticos por sete dias, após esse período testou os LL, LP e o IP. Os autores contaram que com o aumento do teor de matéria orgânica, o LP e o LL aumentaram. Por outro lado, o IP do solo, após um aumento inicial diminuiu com o aumento do teor de matéria orgânica. Segundo os autores a diminuição do IP com altos teores de matéria orgânica ocorre devido às partículas orgânicas serem altamente coloidais e de grande superfície específica e possuírem uma capacidade de absorção água muito superior às exibidas por argilas (especificamente, caulinita e illita, mas em menor grau com montmorilonita).

Portanto, solos com altos teores de matéria orgânica se comportarão como plástico ou líquido com maiores teores de água e terão um menor IP, devido ao fato da matéria orgânica diminuir sua plasticidade e coesão entre as suas partículas.

## 2.7 Retenção de água, curvas características de umidade e Índice S

O solo é o reservatório de água para as plantas, e todas as práticas de manejo de água em agricultura visam a manutenção de seu nível de água em condições ideais para o desenvolvimento das culturas. Apesar de ser um reservatório aberto a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil, ele retém água através de sua interação com a matriz (Reichardt, 1988).

De acordo com Libardi (2005) a retenção de água no solo ocorre basicamente por meio de dois processos. No primeiro deles, a retenção ocorre nos microporos dos agregados e pode ser ilustrada pelo fenômeno da capilaridade, o qual está sempre associado a uma interface curva ar-água. Entretanto, o autor ressalta que devido o solo não ser um simples tubo capilar, mas sim uma composição irregular de poros e canais formados pelos seus sólidos, torna-se complicado descrever o estado da água no solo. No segundo processo, a retenção ocorre por forças de adsorção sobre a superfície sólida da matriz do solo. Três são os mecanismos principais propostos pelo autor para explicar esta adsorção da água sobre as superfícies sólidas: 1) as superfícies das argilas por serem cobertas com átomos de oxigênio e grupos oxidrila negativamente carregados, cria-se ao redor das partículas desses minerais um campo elétrico cuja intensidade decresce com a distância da superfície da partícula e devido a natureza dipolar das moléculas de água, elas se orientam neste campo elétrico e experimentam uma força na direção da superfície da partícula, a qual decresce gradualmente com a distância desta superfície, até se tornar nula; 2) os pares de elétrons não compartilhados do átomo de oxigênio das moléculas de água por serem eletricamente atraídos a cátions trocáveis que podem ser adsorvidos sobre a superfície da argila; 3) finalmente, as moléculas de água podem ainda ser atraídas as superfícies sólidas pelas forças de London-van der Waals.

A força na qual a água é retida no solo depende do conteúdo presente, sendo maior a força de retenção quando o conteúdo de água no solo é menor. O estado da água no solo é definido pela quantidade de água no solo, ou o conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) e pela força na qual a água é retida na matriz do solo, teor de água do solo ou o solo de energia potencial ( $\psi$ ). Esses atributos de água no solo são relacionados entre si através

de para a obtenção da chamada curva característica umidade do solo (Or & Wraith, 2002).

No ajuste da curva de retenção, é previsível que quanto maior o número de pontos, mais representativa será a curva de retenção; no entanto, mais oneroso será seu levantamento. Segundo Silva et al. (2006b) não existe critério padronizado para seleção dos pontos para o traçado da curva de retenção sendo comum o uso de seis a oito pontos, incluindo o conteúdo de água do solo na saturação. Atualmente o modelo matemático mais adotado no mundo é o modelo de van Genuchten (1980) (Dexter, 2004a). De acordo com o autor, pares de pontos experimentais  $(\theta, \psi)$  montados com a equação de van Genuchten (1980) proporciona um consistente método para análises de dados.

Dexter (2004a,b,c), propôs em uma série de artigos, um novo parâmetro para avaliação da qualidade física do solo, denominado índice S, definido como sendo a declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão. O índice S pode ser facilmente medido, devido ao fato de ser necessário para a sua obtenção, apenas de um equipamento para determinar as curvas de retenção de água das amostras de solo fato. Esta medida é bastante uniforme e reproduzível.

O ponto de inflexão é o ponto onde a curvatura é zero, ou quando ele muda de côncava para convexa (Dexter & Czyz, 2007). Segundo os autores, a curva no ponto de inflexão só tem duas características: 1) a posição  $(\theta_i, \ln h_i)$ , e 2) a curvatura,  $S = d\theta/d(\ln h)$ . A curva de retenção de água ao ser construída como logaritmo do potencial versus conteúdo de água sempre exibirá um ponto de inflexão. No entanto, se o solo apresentar uma estrutura hierárquica bem definida, pode haver dois ou mais pontos de inflexão correspondente à drenagem dos poros em diferentes níveis na hierarquia estrutural (Dexter, 2004a).

Dexter (2004a) mostrou como textura do solo, densidade do solo e teor de matéria orgânica afetam o índice S. Em seu segundo artigo, Dexter (2004b) mostrou como friabilidade do solo e a ruptura da estrutura do solo provocadas pelo manejo podem ser em termos, explicadas pelo índice S. Com base nesses dois artigos um valor de  $S = 0,035$  foi definido como o limite entre um solo com boas e más condições físicas. No seu terceiro artigo, Dexter (2004c) demonstra que o índice também S, está fortemente correlacionado com os valores estimados da condutividade hidráulica não saturada no ponto de inflexão. No entanto, o valor de  $S = 0,035$ , não apresentou qualquer significado especial nos valores correspondentes da condutividade hidráulica

não saturada,  $K(i)$ , para os solos estudados. Porém o autor sugere que o ponto de inflexão deva ser usado como um ponto nos estudos de condutividade hidráulica de um solo não saturado.

Dexter & Czyz (2007) colocaram diferentes valores de  $S$  em categorias descritivas para facilitar a comparação da qualidade física do solo. Estas categorias são:  $S < 0,020$  muito ruim;  $0,035 > S \geq 0,020$  ruim;  $0,050 > S \geq 0,035$  boa e  $S \geq 0,050$  muito boa. Os autores afirmam que pode parecer estranho querer usar categorias descritivas quando valores numéricos precisos estão disponíveis. No entanto, segundo eles, as descrições são úteis em muitas discussões.

Muitos fatores afetam a retenção da água em um solo, entre os quais se destacam principalmente a textura e estrutura. Os solos argilosos, por possuírem maior quantidade de material coloidal, maior espaço poroso, principalmente, poros de menores diâmetros e maior superfície absorviva, possuem maior capacidade de reter água, em relação aos solos arenosos. Desta forma, solos de textura argilosa retêm mais umidade em toda a faixa de potencial comumente avaliada. A matéria orgânica, quando coloidal, também apresenta boas propriedades de retenção de água (Reichardt, 1990).

O conhecimento das curvas características de umidade é de grande importância na investigação das relações água-solo-planta. Essas relações fornecem informações sobre o depósito de água na zona das raízes e permitem descrever (calcular) a água disponível ou em excesso às plantas. Possibilita, ainda, estimar a influência da estrutura, porosidade, distribuição do tamanho dos poros e adsorção sobre o estado da água no solo, proporcionando dados práticos para irrigação e drenagem (Bernardo, 1995; Reichardt & Timm, 2004).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e descrição da área de estudo

O trabalho foi desenvolvido nos lotes 4 (área 1), 11 (área 2) e numa área de mata nativa (MN) da Fazenda Frutacor-Unidade Apodi, cuja sede esta localizada numa altitude de 128 m acima do nível do mar, na chapada do Apodi no município de Quixeré-CE, distante 200 km de Fortaleza-CE, apresentando as seguintes coordenadas geográficas: latitude 05° 04' 53,8" S e longitude 37° 51' 28,6" W (Figura 1).

#### 3.2 Solo

Segundo Brasil (1973) o solo da chapada do Apodi é derivado de calcário arenítico e arenito calcífero da formação Jandaíra, do Grupo Apodi, referentes ao período do Cretácio Superior. Os solos estudados foram classificados como Cambissolos eutróficos (Embrapa, 2006). A análise granulométrica revelou teores médios de 237 g kg<sup>-1</sup> e 290 g kg<sup>-1</sup> de argila; 436 g kg<sup>-1</sup> e 387 g kg<sup>-1</sup> de areia e 327 g kg<sup>-1</sup> e 323 g kg<sup>-1</sup> de silte, sendo definidos quanto a classe textural como franco e franco argiloso, nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, respectivamente.

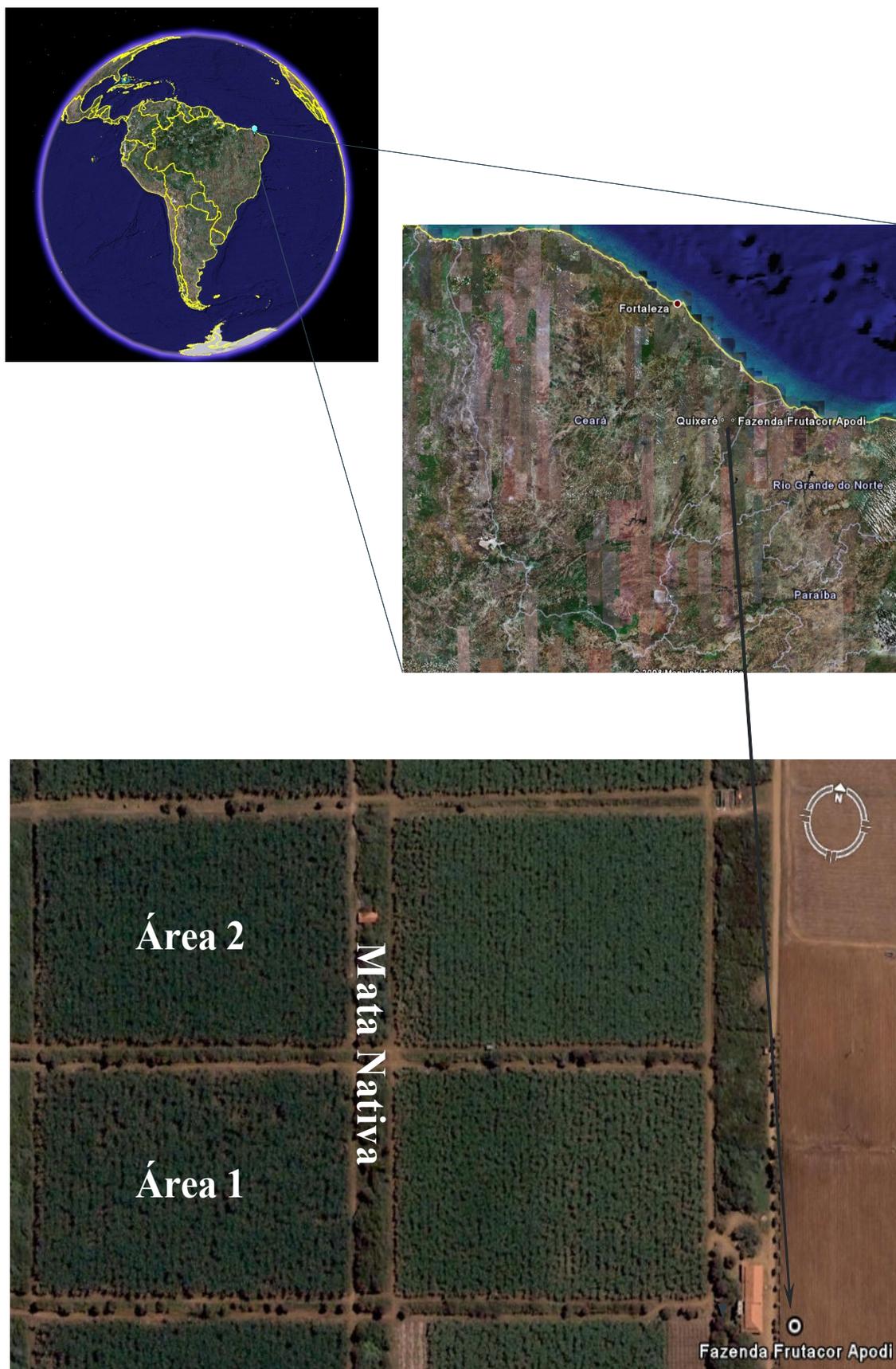


Figura 1: Localização das áreas

### 3.3 Clima

A região apresenta, segundo a classificação de Köppen, o tipo climático BSw'h' (clima quente e semi-árido com temperatura superior a 18 °C no mês mais frio) e, segundo a classificação de Gaussen, 4aTh (tropical quente de seca acentuada, índice xerotérmico entre 150 e 200, número de meses secos entre 7 e 8). Precipitação média anual variando de 600 a 850mm (Brasil, 1973).

### 3.4 Relevo

O relevo é predominantemente plano (declividade de 0% a 3%), mas possui partes suavemente onduladas (declividade 3% a 6%) (Brasil, 1973).

### 3.5 Vegetação

A vegetação primitiva é de caatinga hiperxerófila, a qual apresenta maior grau de xerofitismo. É predominantemente arbustiva, menos densa, com indivíduos de porte baixo, espinhentos e cujas folhas na época seca caem totalmente. A caatinga da chapada do Apodi apesar de ser hiperxerófila, apresenta-se geralmente com dominância de espécies arbóreas de porte alto (Brasil, 1973).

### 3.6 Preparo do Biofertilizante

O biofertilizante foi produzido na fazenda em tanques de compostagem de 10 m<sup>3</sup> (Figura 2), onde são adicionados esterco bovino (2,4 m<sup>3</sup>), FTE-Br 12 (12 kg), farinha de osso (120 kg), inoculate EM-4 (1L), açúcar ou melaço (12 kg) após a adição desses materiais o volume do tanque é completado com água.

Depois de adicionados todos os produtos, o material foi revolvido duas vezes por dia durante toda vida útil do composto (quatorze dias). Esse revolvimento tem como vantagens a homogeneização do produto e a aeração do composto, que consequentemente irá melhorar as condições para que ocorra maior proliferação de microrganismos aeróbicos. Após oito dias, todo líquido do tanque foi utilizado na fertirrigação. Depois de utilizado todo volume líquido do tanque, o mesmo foi reabastecido somente com água, após três dias, todo o líquido foi utilizado novamente.

Quando o líquido da segunda recarga foi utilizado, foi feita uma nova recarga, apenas com água, deixando-a por mais três dias, quando então todo o volume líquido foi novamente utilizado na fertirrigação. Depois desta última recarga, o tanque foi esvaziado com a retirada de todo material restante (borra), que foi adicionado nas áreas de cultivo. Foram aplicados  $0,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  de biofertilizante, o que totaliza um volume mensal de  $3,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .



Figura 2: Tanques de compostagem

### 3.7 Histórico da área

As duas áreas são exploradas comercialmente com o cultivo de bananeiras da variedade Pacovan desde 1997, sempre havendo incorporação de restos culturais (folhas e pseudocaules) sobre as entre-linhas das bananeiras (ruas). Devido às baixas produtividades (Tabela 1) ocasionadas por influências de fatores climáticos (vento) e solo (saturação por sais de adubos) esses lotes seriam erradicados, por não apresentarem rentabilidades favoráveis. Em janeiro de 2004 deu-se início a aplicação do biofertilizante na área 1 e a adubação química foi suspensa, sendo retomada somente em julho de 2007. Na área 2, também em janeiro de 2004, toda a adubação química foi suspensa, mas não houve nenhuma aplicação de biofertilizante até julho de 2007, quando a adubação orgânica e química foi iniciada.

Tabela 1: Produtividade das áreas

Ano	Produtividade (Mg ha <sup>-1</sup> )	
	Área 1	Área 2
2002	26,95	25,48
2003	19,20	12,75
2004	18,88	17,66
2005	32,15	22,60
2006	34,52	21,23
2007	30,08	20,99

### 3.8 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, constando de cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos estudados foram: mata nativa (MN) e duas áreas cultivadas, dessas áreas foram retiradas amostras de dois locais: a) das entre-linhas de plantio (ruas), onde são depositados os restos culturais, na qual foi denominado rua da área 1 (tratamento A1R) e rua da área 2 (tratamento A2R) e; b) das linhas de plantio (gotejador), onde recebeu aplicação de biofertilizante, sendo que na área 1 foi feita aplicação de biofertilizante por 5 anos (A1G) e na área 2 foi feita aplicação de biofertilizante por 18 meses.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, nos casos onde esses não apresentaram distribuição normal a 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ), os dados foram transformados, para que fosse admitida a validade da análise de variância. O teste F foi realizado apenas quando os dados apresentaram distribuição normal, sejam estes transformados ou não-transformados e, para as variáveis onde o teste F foi significativo, o teste de Tukey, também a 5% de probabilidade, foi utilizado para comparação das médias.

Segundo Banzato & Kronka (2006) quando ocorrem zeros ou valores baixos, as transformações recomendadas são  $(X+0,5)^{0,5}$  ou  $(X+1,0)^{0,5}$ , onde X é o dado obtido de cada repetição do tratamento avaliado. Os dois modelos de transformações foram testados, sendo escolhido o modelo de transformação  $(X+1,0)^{0,5}$ , pois foi o modelo apresentou o menor coeficiente de variação após a transformação dos dados.

As análises foram realizadas com o auxílio do Sistema de Análises Estatísticas e Planejamento de Experimentos – Sisvar (Ferreira, 2000), programa computacional desenvolvido pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). O teste de correlação de Person foi realizado com o auxílio do Sistema para Análises Estatísticas – SAEG 9.1 (SAEG, 2006), programa computacional desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

### 3.9 Trabalho de laboratório

As amostras de solo foram coletadas e conduzidas aos laboratórios para análises químicas e físicas, em Janeiro de 2009. As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Química do Solo e no Laboratório Manejo e Conservação do Solo, enquanto que as análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo.

#### 3.9.1 Análises químicas

Na tabela 2, encontram-se as médias dos atributos químicos obtidos dos tratamentos do solo estudado.

A caracterização do complexo sortivo foi realizada seguindo-se as metodologias descritas em Embrapa (1997). Os valores pH foram determinados em água, na relação 1:2,5. Os teores de cálcio e magnésio foram determinados utilizando-se como solução extratora KCl 1N. Os teores de sódio e potássio trocáveis foram determinados utilizando-se como solução extratora o Mehlich-I (0,05N de HCl + 0,025N de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). A acidez potencial (H+Al) foi obtida por extração com acetato de cálcio 1N a pH 7,0.

Destas determinações foram obtidos os seguintes parâmetros: soma de bases (SB = Na + K + Ca +Mg), capacidade de troca de cátions (CTC = SB + H + Al), porcentagem de saturação de bases ( $V = (SB/CTC) \times 100$ ) e porcentagem de sódio trocável (PST = (Na+ trocável/ CTC) x 100). O teor de carbono orgânico total do solo foi determinado pelo método de oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico. Assumindo-se que os compostos orgânicos possuem em média 58% de carbono, os teores de matéria orgânica podem ser obtidos pela conversão do carbono orgânico para matéria orgânica, através da relação M.O. = carbono orgânico x 1,724 (Embrapa, 1997).

Tabela 2: Médias dos teores dos atributos químicos nas camadas de 0-5 e 15-20 cm

Trat.	Prof. (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	Complexo Sortivo								
			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H+Al <sup>+3</sup>	SB	CTC	V	PST
			cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>						%		
MN	0-5	7,1	15,6	5,9	0,38	2,68	0,99	24,56	25,55	96	1
	15-20	7,1	11,6	5,2	0,38	2,04	1,58	19,22	20,80	92	2
A1R	0-5	7,9	13,6	8,3	0,40	5,32	0,23	27,62	27,85	99	1
	15-20	7,7	8,7	6,2	0,40	5,37	0,56	20,67	21,23	97	2
A1G	0-5	8,0	12,4	10,0	1,05	0,62	0,19	24,07	24,26	99	4
	15-20	7,9	12,4	8,9	1,18	0,30	0,21	22,78	22,99	99	5
A2R	0-5	7,6	14,0	8,3	0,40	6,28	1,26	28,98	30,24	96	1
	15-20	8,0	12,1	8,1	0,42	5,90	0,56	26,52	27,08	98	2
A2G	0-5	8,1	15,1	8,7	1,08	1,09	0,26	25,97	26,23	99	4
	15-20	7,8	13,8	8,0	1,13	0,67	0,39	23,60	23,99	98	5

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2; A2G = gotejador da área 2; SB = Soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V = Saturação por bases e PST = porcentagem de sódio trocável.

### 3.9.2 Análises físicas

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, conforme descrito em Embrapa (1997). A dispersão química foi realizada com hexametáfosfato de sódio, após a dispersão química, foi feita uma dispersão física por 10 minutos, com o auxílio de um agitador elétrico de 12.000 rpm, e usando de uma pipeta volumétrica de 25 mL coletou-se uma alíquota da suspensão, em função da profundidade e do tempo calculado para a sedimentação das partículas de silte. O silte foi obtido por diferença.

A densidade do solo foi determinada de acordo com Blake & Hartge (1986), com o auxílio do amostrador de Uhland, foram coletadas amostras indeformadas de volume aproximadamente 50 cm<sup>3</sup>, nas profundidades de 0-5 cm e 15-20 cm, e colocadas para secar a 105 °C até peso constante, após secagem a densidade do solo foi calculada através da equação:  $D_s = \text{peso da amostra seca} / \text{volume do anel}$ .

A densidade das partículas foi determinada, pelo método do balão volumétrico, com terra fina seca em estufa a 105 °C (TFSE) e calculada através da equação:  $D_p = [\text{Peso da amostra} / (50 - \text{volume de álcool gasto})]$ , (Embrapa, 1997).

A porosidade total ( $\alpha$ ) foi calculada pela fórmula  $\alpha = 1 - D_s/D_p$  (Danielson & Sutherland, 1986). Para a determinação da microporosidade foi utilizado o método da mesa de tensão (Embrapa, 1997). Trata-se de um método tensiométrico, posto que se baseia na aplicação de tensão para remover a água de amostras saturadas. Essa tensão é obtida por diferença de nível entre dois terminais de coluna de água.

Foram utilizadas amostras com estrutura indeformadas, empregando-se 60 cm de altura de coluna de água (correspondente a 6 kPa), para separar a microporosidade da macroporosidade. A porcentagem de água retida nas amostras, após atingido o equilíbrio, corresponde a microporosidade do solo, a macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e microporosidade.

A determinação da estabilidade de agregados foi feita por via úmida. As amostras foram destorroadas manualmente e secas ao ar e posteriormente passadas em peneira de malha de 4,76 e 2,00 mm, sendo utilizados na análise de estabilidade de agregados, aqueles retidos na peneira de 2 mm. Cada amostra consistiu de 25 g de agregados secos ao ar, sendo o peso corrigido para seco em estufa. Os agregados passaram por uma atomização e após 12 horas foram transferidos para um jogo de peneiras de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 mm e agitados verticalmente por 4 minutos (30 oscilações por minuto) dentro de um recipiente contendo água. A partir dos dados obtidos, foram calculados os índices: diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA). O DMP e o IEA foram calculados de acordo com Kemper & Rosenau (1986), utilizando-se as equações 5 e 6, respectivamente.

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i d_i \quad (5)$$

$$IEA = \left( \frac{Ps - wp_{0,250} - areia}{Ps - areia} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

$x_i$  = quociente da massa de agregados retidos na peneira  $i$  sobre a massa total;

$d_i$  = diâmetro médio da fração.

$Ps$  = massa da amostra seca (g)

$wp_{0,250}$  = massa dos agregados da classe menor que 0,250 mm (g)

$areia$  = proporção de areia ( $g\ kg^{-1}$ )

Os pontos para elaboração das curvas características foram: 0, 6, 8, 10, 33, 100, 500, 1.000 e 1.500 kPa. Para a tensão de equilíbrio de 0 kPa foi considerada a porosidade total, a umidade nas tensões de equilíbrio 6, 8, 10 kPa, foram obtidos com o auxílio da mesa de tensão, conforme citado anteriormente, nessas tensões foram utilizadas amostras com estrutura indeformada. Nas tensões de equilíbrio 33, 100, 500, 1.000 e 1.500 kPa os pontos foram obtidos a partir de amostras deformadas com o auxílio da câmara de pressão de Richards, com placas porosas de porcelana (Klute, 1986).

A curva característica da retenção da água no solo foi ajustada pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980), descrito na equação 1, que associa os valores de umidade obtidos no equilíbrio com os respectivos potenciais. Para tanto, foram utilizadas as médias das quatro repetições de cada tensão utilizada na elaboração da curva característica de umidade. A umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e a umidade residual ( $\theta_r$ ), constantes no modelo, foram tratadas como variáveis independentes e assumidas como equivalentes à porosidade total e umidade em equilíbrio com o potencial de 1.500 kPa, respectivamente. O parâmetro  $m$  foi considerado dependente de  $n$ , conforme a restrição de Mualem (1986), ou seja,  $m = 1-1/n$ . Para obtenção deste ajuste foi utilizado o programa Soil Water Retention Curve - SWRC (Dourado Neto et al., 2001).

O índice  $S$  e a umidade do ponto de inflexão foram calculados a partir dos parâmetros de ajuste de cada curva de retenção de umidade e utilizando-se novamente da restrição de Mualem (1986) ( $m = 1-1/n$ ) para cada repetição, conforme preconizado por Dexter (2004a) utilizando-se as equações 2 e 3, respectivamente.

$$\theta_w = \theta_{RES} + \frac{(\theta_{SAT} - \theta_{RES})}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (1)$$

$$|S| = -n(\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \cdot \left[\frac{2n-1}{n-1}\right]^{\left[\frac{1}{n}-2\right]} \quad (2)$$

$$\theta_{INFL} = (\theta_{SAT} - \theta_{RES}) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} + \theta_{RES} \quad (3)$$

Onde:

$\theta_w$  = umidade do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$\theta_{RES}$  = umidade do solo na tensão de 1.500 kPa ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$\theta_{SAT}$  = umidade do solo saturado ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$\theta_{INFL}$  = umidade do solo no ponto de inflexão da curva de retenção de água ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$\psi$  = potencial da água no solo (kPa);

$\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  = parâmetros empíricos da equação, obtidos pelo ajuste do modelo;

$|S|$  = índice de qualidade física do solo.

Para avaliar a consistência do solo foram determinados os limites de plasticidade, o limite de liquidez (com auxílio do aparelho de Casagrande) o limite de pegajosidade, os métodos de determinação desses parâmetros são descritos em Embrapa (1997). O índice de plasticidade foi calculado pela diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. A classificação da plasticidade do solo foi feita através desse índice, conforme descrito em Amaro Filho (2008).

O limite de plasticidade foi obtido também por meio de cálculos, a partir da umidade no ponto de inflexão da curva de retenção para cada repetição, conforme preconizada por Dexter & Bird (2001) utilizando-se a equação 4.

$$\theta_{PL} = \theta_{INFL} + 0,4(\theta_{SAT} - \theta_{INFL}) \quad (4)$$

Onde:

$\theta_{PL}$  = umidade do solo no limite de plasticidade ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$\theta_{INFL}$  = umidade do solo no ponto de inflexão da curva de retenção de água ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$\theta_{SAT}$  = umidade do solo saturado ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de densidade do solo e densidade das partículas entre os tratamentos e profundidades são exibidos na tabela 3.

A análise estatística da densidade do solo não revelou diferença significativa ( $P>0,05$ ) entre os tratamentos e profundidades, o que demonstra que tanto o tempo de aplicação de biofertilizantes como a adição de restos vegetais não alteraram este parâmetro nestas profundidades em comparação com o sistema MN. Entretanto, vale ressaltar que os valores de densidade do solo analisados isoladamente, não fornecem informações necessárias para avaliar o funcionamento dos tratamentos, havendo a necessidade de integrá-la a outros parâmetros ou utilização de parâmetros mais sensíveis as alterações do solo.

Os valores de densidade do solo encontrados nos tratamentos estão dentro da faixa classificada por Libardi (2005), para solos de textura média a argilosa. No entanto, valores mais elevados de densidade do solo foram encontrados por Mota et al. (2008) trabalhando num Cambissolo Háplico Ta eutrófico típico de textura franco-argilo-arenoso e cultivado com melão na Chapada do Apodi-RN, bem como por Chaves (2004) trabalhando com um Cambissolo Háplico Tb eutrófico latossólico de textura

franco e franco-argiloso cultivados com milho em sistema de plantio direto na Chapada do Apodi-CE.

Tabela 3: Densidade do solo e densidade das partículas das camadas de 0-5 e 15-20 cm

Prof. cm	----- kg <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> -----										CV %
	MN		A1R		A1G		A2R		A2G		
<b>Densidade do Solo</b>											
0-5	1,24	Aa	1,23	Aa	1,27	Aa	1,27	Aa	1,23	Aa	11,76
15-20	1,22	Aa	1,22	Aa	1,26	Aa	1,29	Aa	1,20	Aa	9,36
CV(%)	8,42		11,17		12,74		11,65		7,20		-
<b>Densidade das Partículas</b>											
0-5	2,64 <sup>(1)</sup>	Aa	2,68 <sup>(1)</sup>	Aab	2,70 <sup>(1)</sup>	Ab	2,65 <sup>(1)</sup>	Aab	2,68 <sup>(1)</sup>	Aab	0,35 <sup>(2)</sup>
15-20	2,71	Ba	2,72	Aa	2,69	Aa	2,70	Aa	2,70	Aa	1,44
CV(%)	0,87		1,44		1,18		1,59		0,91		-

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2 e A2G = gotejador da área 2

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

<sup>(1)</sup> Dados originais tiveram que ser transformados ( $[X+1]^{0,5}$ );

<sup>(2)</sup> Coeficiente de variação (%) dos dados depois de transformados.

Diferenças entre valores de densidade do solo podem ser resultados do efeito que o manejo provoca nos teores de matéria orgânica do solo, uma vez que menor teor de matéria orgânica leva a maior densidade do solo (Machado et al, 2008) e menor estabilidade da estrutura (Tormena et al., 2004). Além do efeito da matéria orgânica, eventualmente partículas mais finas de argila dispersas e com o impacto direto das gotas de chuvas na superfície do solo, podem também contribuir para o incremento da densidade do solo. As partículas dispersas podem ser translocadas verticalmente no perfil e provocar o entupimento dos poros (Gavande, 1972; Meurer et al., 2006; Freire & Freire, 2007). Muitos estudos também relacionam aumento da densidade do solo em áreas que foram convertidas de floresta para algum outro sistema, seja de pastagem (Borges et al. 2009) ou sistema agrícola (Bertol et al., 2004). Este aumento na densidade do solo é devido à compactação do solo que ocorre pelo tráfego de máquinas e implementos (Bertol et al. 2001; Oliveira et al. 2004; Cavalieri et al., 2009) ou pelo excessivo pisoteio animal em umidades inadequadas (Baver et al. 1972; Carneiro et al. 2009) o que não ocorre no cultivo da bananeira.

Os valores encontrados de densidade das partículas (tabela 3), para todos os tratamentos avaliados, foram condizentes aos valores comumente adotados para solos minerais ( $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ ). Os menores valores de densidade das partículas na camada de 0-5 cm foram observados no tratamento MN. Tais diferenças estatísticas não eram esperadas, pois as práticas de manejo não afetam a densidade de partículas, cuja determinação não considera o espaço poroso do solo, normalmente afetado pela estrutura. Entretanto, a matéria orgânica por possuir densidade das partículas entre 0,20 a  $0,40 \text{ kg dm}^{-3}$ , quando presentes em quantidades significativas podem reduzir os valores da densidade das partículas do solo (Kiehl, 1985), isto explicaria valores de densidade das partículas no sistema MN serem inferiores aos observados nas áreas sob cultivo. Na camada de 15-20 cm esse efeito não foi verificado, já que nesta camada não houve diferenças significativas nos teores de COT dos tratamentos.

As análises estatísticas da densidade das partículas também revelaram diferença significativa ( $P < 0,05$ ) entre as profundidades no tratamento MN, este resultado torna mais evidente o efeito que a matéria orgânica exerce sobre a densidade das partículas, já que no tratamento MN houve uma redução de 125% no teor de COT da camada de 0-5 cm para a camada de 15-20 cm.

As análises estatísticas da porosidade total, macroporosidade e microporosidade não revelaram diferença significativa entre os tratamentos e profundidades ( $P > 0,05$ ) (Tabela 4), o que demonstra que tanto o tempo de aplicação de biofertilizantes como a incorporação de matéria orgânica não alteraram estes parâmetros em comparação com o tratamento MN.

Os limites entre os quais variam a porosidade total de um solo são muito amplos, pois o volume de poros depende da composição granulométrica e da estruturação do mesmo (Oliveira et al., 2005). Segundo Brady (1989) a porosidade total de um solo de textura média deve está situada na faixa de 0,4 a  $0,6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Os valores de porosidade total encontrados para todos os tratamentos, nas duas camadas estudadas, estão situados dentro dessa faixa.

Quanto aos resultados de macro e microporosidade, verificou-se uma distribuição proporcional de macro:microporos relativamente dentro da faixa de 1:4. Mota et al. (2008) também encontrou esta relação nos primeiros 48 cm de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico típico localizado na Chapada do Apodi-RN. O autor ressalta que esta relação pode causar sérias limitações à entrada e circulação de água e ar nas camadas superiores. Para Kiehl (1985), esta relação deve ser de 1:1 ou 1:2, ou

seja, 50% do espaço poroso total para a microporosidade e 50% para a macroporosidade ou, 33,3% do espaço poroso total para a macroporosidade e 66,7% para a microporosidade.

Tabela 4: Porosidade total, microporosidade, e macroporosidade nas camadas de 0-5 e 15-20 cm

Prof. cm	MN		A1R		A1G		A2R		A2G		CV
	----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----										
<b>Porosidade Total</b>											
0-5	0,530 <sup>(1)</sup>	Aa	0,540 <sup>(1)</sup>	Aa	0,529 <sup>(1)</sup>	Aa	0,521 <sup>(1)</sup>	Aa	0,542 <sup>(1)</sup>	Aa	1,79 <sup>(2)</sup>
15-20	0,551	Aa	0,552	Aa	0,533	Aa	0,521	Aa	0,555	Aa	7,96
CV(%)	7,23		9,57		11,10		11,11		5,81		-
<b>Macroporosidade</b>											
0-5	0,106 <sup>(1)</sup>	Aa	0,098 <sup>(1)</sup>	Aa	0,110 <sup>(1)</sup>	Aa	0,108 <sup>(1)</sup>	Aa	0,112 <sup>(1)</sup>	Aa	3,19 <sup>(2)</sup>
15-20	0,147 <sup>(1)</sup>	Aa	0,119 <sup>(1)</sup>	Aa	0,125 <sup>(1)</sup>	Aa	0,115 <sup>(1)</sup>	Aa	0,120 <sup>(1)</sup>	Aa	2,56 <sup>(2)</sup>
CV(%)	2,00 <sup>(2)</sup>		3,17 <sup>(2)</sup>		3,84 <sup>(2)</sup>		2,95 <sup>(2)</sup>		2,08 <sup>(2)</sup>		-
<b>Microporosidade</b>											
0-5	0,424	Aa	0,442	Aa	0,419	Aa	0,413	Aa	0,430	Aa	6,98
15-20	0,403	Aa	0,433	Aa	0,408	Aa	0,406	Aa	0,435	Aa	7,73
CV(%)	3,13		12,46		7,20		4,21		5,17		-

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2 e A2G = gotejador da área 2

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

<sup>(1)</sup> Dados originais tiveram que ser transformados ( $[X+1]^{0,5}$ );

<sup>(2)</sup> Coeficiente de variação (%) dos dados depois de transformados.

A macroporosidade, ou a porosidade ocupada com ar no potencial de 6 kPa, é uma medida relacionada com a taxa de difusão de oxigênio no solo (Araújo et al., 2004). Os macroporos são, aqui considerados, os poros com tamanho acima de 50 µm.

A macroporosidade dos tratamentos variou de 0,098 e 0,112 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na camada de 0-5 cm e de 0,115 a 0,147 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na camada de 15-20 cm. Embora esses valores de macroporosidade sejam considerados adequados para as plantas, em termos de garantia de aeração do sistema radicular, cujo limite crítico é de 0,1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (Baver et al., 1972; Reynolds et al., 2002). Araújo et al. (2004) salientam que valores adequados de capacidade de aeração são dependentes das condições climáticas e que devem ser ampliados sob condições mais úmidas. Deve-se ressaltar que o fluxo de gases bem como o movimento de água no solo, estão intimamente relacionados ao seu volume de macroporos, ou seja, a garantia da oxigenação radicular bem como a capacidade de

infiltração e redistribuição de água no perfil dependem dessa propriedade. Sua efetividade, nesses casos, depende além da quantidade, da sua continuidade em profundidade e da abertura à superfície (Silva et al., 2005).

Assim, de acordo com os resultados, o solo das áreas estudadas possui uma boa rede de macroporos disponíveis para o sistema radicular explorar. Isso possibilita um maior desenvolvimento e expansão das raízes devido a menor probabilidade de encontrarem zonas com valores elevados de resistência a penetração, uma vez que a taxa de alongação das raízes é diminuída devido ao aumento da resistência das partículas do solo ao deslocamento. Porém, vale ressaltar que a macroporosidade por ser altamente sensível aos sistemas de manejo, esses valores devem sempre serem monitorados, pois estão muito próximos do limite crítico, e caso o solo não seja manejado corretamente, poderá causar deficiência de oxigenação das raízes.

Todos os tratamentos apresentaram uma tendência de aumento da macroporosidade em função da profundidade do solo. Os menores valores de macroporosidade geralmente são devido ao processo de compactação da superfície do solo. Com a compactação esse poros sofrem uma maior redução, com consequente aumento dos microporos e uma redução na porosidade total, porém em menor proporção que a macroporosidade (Araújo et al., 2004).

A microporosidade dos tratamentos variou de 0,413 e 0,442  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  na camada de 0-5 cm e de 0,403 a 0,435  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  na camada de 15-20 cm. Com exceção ao tratamento A2G, os valores médios mostraram uma pequena diminuição da microporosidade entre a superfície do solo e a camada de 15-20 cm. Os microporos são, aqui considerados, os poros com tamanho menor de 50  $\mu\text{m}$ .

Os resultados do fracionamento, por via úmida, das classes de agregados de: 4,76-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,50; 0,50-0,25 e menores que 0,25 mm, são apresentados na tabela 5.

A maior concentração de agregados estáveis nas duas camadas estudadas (0-5 e 15-20 cm) ocorreu na classe de maior diâmetro, ou seja, na classe de agregados estáveis de 4,76-2,00 mm. Estes resultados corroboram com os encontrados na literatura em pesquisas realizadas em solos da chapada do Apodi (Chaves, 2004, Mota et al., 2008).

Na camada de 0-5 cm, observa-se que os teores de agregados estáveis da classe 4,76-2,00 mm dos tratamentos A1G, A1R e A2R, mesmo apresentando menores valores que o tratamento MN, não se diferenciaram estatisticamente ( $P > 0,05$ ). Entretanto, quando o teor de agregados estáveis desta classe de tamanho do tratamento A2G é

comparado com o teor do tratamento MN, observa-se que houve diferença estatística significativa ( $P < 0,05$ ), entre ambos, sendo o teor do tratamento A2G, 30,4% menor que o teor do tratamento MN. Quando apenas os tratamentos que receberam aplicações de biofertilizante são comparados, em relação ao tratamento A2G, que recebeu aplicações de biofertilizantes por dezoito meses, mesmo não diferindo estatisticamente ( $P < 0,05$ ) do tratamento A1G, que recebeu aplicação de biofertilizante por cinco anos, apresentou um valor 19,2% menor do que o tratamento A1G. Isso pode ser uma indicação que o tempo de aplicação do biofertilizante influenciou na formação e estabilização desses agregados. Essa melhoria pode estar ligada ao aumento da população microbiana, que intensifica a decomposição da matéria orgânica e libera inúmeros compostos que atuam na ligação entre as partículas do solo, formando os agregados estáveis.

Observa-se ainda que na camada de 0-5 cm não houve diferença significativa entre os tratamentos para os teores de agregados estáveis da classe de 2,00-1,00 mm. Nas classes de 1,00-0,50; 0,50-0,25 e menores que 0,25 mm, ao contrário dos tratamentos A1R, A2R e A1G que foram estatisticamente iguais aos teores do sistema MN, o tratamento A2G se apresentou estatisticamente superior ao tratamento MN em 174%, 276% e 264%, respectivamente. Possivelmente isso tenha acontecido devido à diminuição bastante acentuada dos agregados estáveis da classe de 4,76-2,00 mm neste tratamento em relação ao tratamento MN.

Na camada de 15-20 cm observa-se que os teores de agregados estáveis da classe 4,76-2,00 mm dos tratamentos MN, A1G, A2G e A2R não apresentaram diferenças estatísticas ( $P > 0,05$ ). Entretanto, o tratamento A1R apresentou maiores teores de agregados estáveis que os apresentados pelo tratamento MN, nesta classe. Observa-se ainda, que nesta camada os teores de agregados estáveis da classe de 2,00-1,00 e 1,00-0,50 mm no sistema MN foi o que apresentou os maiores teores de agregados estáveis. Assim como na camada 0-5cm, o tratamento A2G também apresentou os maiores teores de agregados nas classes 0,50-0,25 e menores que 0,25 mm na camada de 15-20 cm.

O aumento nos teores de agregados estáveis nas classes de menores tamanhos, principalmente no tratamento A2G, nas duas camadas estudadas, não significa necessariamente que a estruturação do solo tenha melhorado. Segundo Mota et al. (2008) do ponto de vista edáfico, é primordial que os agregados do solo sejam estáveis nas maiores classes de diâmetro, garantindo assim, boa difusão de gases e condução de água. Ressalta-se ainda que existem outros índices que condizem melhor o estado de

estruturação do solo, esses índices são: o diâmetro médio ponderado (DMP) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). De acordo com Kiehl (1979), o cálculo desses índices, em especial o DMP, facilita a comparação entre a agregação de diferentes solos ou horizontes de um mesmo solo, pois se passa a trabalhar com um único número e não com uma coleção deles.

Tabela 5: Teores de agregados por classe de diâmetros nas camadas de 0-5 e 15-20 cm

Prof. cm	MN	A1R	A1G	A2R	A2G	CV
	g kg <sup>-1</sup>					%
<b>4,76 - 2,00 mm</b>						
0 -5	825,7 Aa	820,0 Aa	713,0 Aab	740,1 Aab	582,9 Ab	11,51
15 - 20	611,6 Ba	798,3 Ab	695,3 Aab	692,3 Aab	574,5 Aa	9,46
CV (%)	8,81	8,49	13,02	10,30	12,88	-
<b>2,00 - 1,00 mm</b>						
0 -5	90,0 Aa	91,7 Aa	140,2 Aa	103,6 Aa	141,7 Aa	35,09
15 - 20	171,1 Ba	106,0 Ab	141,0 Aab	119,9 Aab	158,8 Aab	19,37
CV (%)	20,85	32,66	33,92	27,58	18,57	-
<b>1,00 - 0,50 mm</b>						
0 -5	37,7 Aa	28,4 Aa	48,5 Aa	60,8 Aab	103,3 Ab	36,06
15 - 20	111,6 Ba	34,7 Ad	53,5 Abd	72,1 Abc	94,9 Aac	22,24
CV (%)	25,08	20,43	34,61	33,46	18,35	-
<b>0,50 - 0,25 mm</b>						
0 -5	16,4 <sup>(1)</sup> Aa	15,2 <sup>(1)</sup> Aa	26,0 <sup>(1)</sup> Aa	34,3 <sup>(1)</sup> Aab	61,7 <sup>(1)</sup> Ab	19,69 <sup>(2)</sup>
15 - 20	49,3 Bac	18,1 Ab	30,7 Aab	41,5 Aabc	54,9 Ac	28,11
CV (%)	35,47	22,74	33,52	18,63	21,45	-
<b>&lt; 0,25 mm</b>						
0 -5	30,3 <sup>(1)</sup> Aa	44,6 <sup>(1)</sup> Aa	72,5 <sup>(1)</sup> Aab	61,3 <sup>(1)</sup> Aab	110,4 <sup>(1)</sup> Ab	17,82 <sup>(2)</sup>
15 - 20	56,4 Bab	42,9 <sup>(1)</sup> Aa	79,6 Aab	74,3 <sup>(1)</sup> Aab	117,0 Ab	38,48
CV (%)	32,39	23,87 <sup>(2)</sup>	29,27	27,61 <sup>(2)</sup>	24,63	-

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2; A2G = gotejador da área 2.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

<sup>(1)</sup> Dados originais foram transformados ( $[X+1]^{0,5}$ )

<sup>(2)</sup> Coeficiente de variação (%) dos dados depois de transformados.

Os valores médios do diâmetro médio ponderado (DMP), índice de estabilidade de agregados (IEA) e teores de carbono orgânico total (COT), entre os tratamentos e profundidades são apresentados na tabela 6.

Na camada de 0-5 cm os tratamentos MN, A1R, A2R apresentaram os maiores IEA (97,0%, 95,5% e 93,4%, respectivamente), enquanto que os tratamentos A1G e A2G apresentaram os menores (92,8% e 89,0%, respectivamente), no entanto não houve diferença significativa ( $P>0,05$ ) do IEA entre os tratamentos MN, A1G, A1R e A1G. Observa-se que os valores do IEA do tratamento A2G foi estatisticamente ( $P<0,05$ ) inferior ao IEA do tratamento MN. Na camada de 15-20 cm, com exceção ao tratamento A1R, não houve diferença estatística significativa ( $P>0,05$ ) entre os tratamentos e assim como ocorreu na camada de 0-5 cm, o tratamento onde ocorreu o menor IEA foi o tratamento A2G. Estes resultados mostram que o tempo de aplicação de biofertilizante teve influencia no IEA.

Segundo Salton et al. (2008) sistemas de manejo que proporcionem agregados mais resistentes são desejáveis, pois manterão a estrutura do solo sem grandes alterações quando submetidos a forças externas, como pisoteios e operações mecanizadas, além de maior resistência a perdas por erosão.

Tabela 6: Índice de estabilidade de agregados (IEA), diâmetro médio ponderado (DMP) e carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0-5 e 15-20 cm

Prof. cm	MN	A1R	A1G	A2R	A2G	CV %
<b>IEA (g kg<sup>-1</sup>)</b>						
0-5	969,7 <sup>(1)</sup> Aa	955,4 <sup>(1)</sup> Aa	927,6 <sup>(1)</sup> Aab	938,7 <sup>(1)</sup> Aa	889,6 <sup>(1)</sup> Ab	1,17 <sup>(2)</sup>
15-20	943,6 Bab	957,1 <sup>(1)</sup> Ab	920,4 Aab	925,7 Aab	883,0 Aa	3,08
CV(%)	1,74	1,20 <sup>(2)</sup>	2,41	3,77	3,16	-
<b>DMP (mm)</b>						
0-5	2,964 Aa	2,942 Aa	2,675 Aab	2,723 Aab	2,297 Ab	7,81
15-20	2,433 Ba	2,896 Ab	2,623 Aab	2,599 Aab	2,286 Aa	6,67
CV(%)	5,90	6,01	8,45	7,55	8,68	-
<b>COT (g kg<sup>-1</sup>)</b>						
0-5	24,57 Aa	17,13 Ab	14,30 Ab	16,95 Ab	12,78 Ab	17,46
15-20	10,92 Ba	9,67 Ba	9,95 Aa	12,57 Ba	10,01 Aa	21,06
CV(%)	12,10	21,87	27,23	13,86	11,18	-

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2; A2G = gotejador da área 2; IEA = índice estabilidade de agregados; DMP = diâmetro médio ponderado e COT = carbono orgânico total.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

<sup>(1)</sup> Dados originais foram transformados ( $[X+1]^{0,5}$ );

<sup>(2)</sup> Coeficiente de variação (%) dos dados depois de transformados.

Na camada de 0-5 cm, o maior DMP ocorreu nos tratamentos onde há constante aporte de MO por meio de restos vegetais e no sistema MN. No caso dos tratamentos que receberam biofertilizante, o tratamento A1G apresentou um DMP estatisticamente ( $P < 0,05$ ) igual ao tratamento A2G. No entanto, o DMP do tratamento A2G foi 14,1% menor que o tratamento A1G, sugerindo assim que o tempo de aplicação de biofertilizante melhorou a agregação deste solo. Na camada de 15-20 cm o tratamento A1R apresentou um DMP superior aos demais tratamentos, devido aos altos teores de agregados na classe de 4,76-2,00 mm, discutidos anteriormente.

A distribuição de agregados em classes de diâmetro reflete sobre o DMP, sendo este índice tanto maior quanto maior o teor de agregados grandes (Amaro Filho et al., 2008). Sendo assim, a análise dos atributos que concorrem para seu aumento ou diminuição é uma síntese de todos os fatores que influenciaram cada classe de agregados (Dufranc et al., 2004).

Em linhas gerais, não são conhecidos números absolutos para interpretação de propriedades físicas do solo com base nos resultados da análise de agregados. De acordo com Kiehl (1979), agregados com DMP acima de 0,5 mm são considerados relativamente resistentes ao esboroamento e dispersão e, dependendo do manejo, bons condutores de água e ar. Posto isso, todas as áreas estudadas, seguindo o critério desse autor apresentam bons índices de agregação.

Com exceção ao tratamento MN, a profundidade não influenciou significativamente ( $P > 0,05$ ) sobre as cinco classes de tamanhos de agregados avaliadas (4,76-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,50; 0,50-0,25 e 0,25-0,00 mm), no IEA e no DMP. Este resultado demonstra a influência do teor de COT na agregação do solo, já que houve um decréscimo de COT significativo ( $P < 0,05$ ) entre as duas camadas avaliadas do sistema MN, na ordem de 125%. A presença de matéria orgânica ajudaria a formação de macroagregados jovens, pela ação dos microrganismos na decomposição dos polissacarídeos, dos quais origina o mucigel, proporcionando a ação cimentante entre a matéria orgânica e o solo, além dela possuir maior superfície específica e capacidade de troca de cátions, possibilita um número maior de ligações entre as partículas de solo (Corrêa et al., 2009)

Os tratamentos A1R, A2R e MN tiveram seus teores de COT reduzidos estatisticamente ( $P < 0,05$ ), na camada mais profunda do solo (15-20cm) em relação a camada superficial (0-5 cm). Este é um comportamento comum (Maia & Cantarutti, 2004; Wendling et al., 2005; Fialho et al., 2006; Sá et al., 2009; Aratani et al., 2009) e

ocorre devido ao maior acúmulo de material vegetal na superfície do solo e o não revolvimento do solo (Kiehl, 1979) e são controladas por processos microbiológicos, que são influenciados por características locais específicas, tais como a temperatura (Lisboa, 2008). Entretanto, não houve diferença significativa ( $P>0,05$ ) entre as duas camadas estudadas para os tratamentos A1G e A2G.

A introdução de sistemas agrícolas com a retirada do sistema nativo levou a diminuições nos teores de COT na camada de 0-5 cm na ordem de: 30,3% e 31,0% nos tratamentos A1R e A2R e, 41,8% e 48,0% nos tratamentos A1G e A2G, respectivamente. Estes resultados corroboram com a afirmação de vários autores de que a retirada da vegetação natural de uma área para adoção de um sistema agrícola, o aporte orgânico é prontamente modificado em qualidade e quantidade (Bayer et al., 2003; Silva & Mendonça, 2007). Esse fator influencia bastante a dinâmica da matéria orgânica do solo, podendo levar a uma rápida redução do seu teor (Araujo et al., 2004; Assis & Lanças, 2005). A menor redução no teor de COT nas ruas em relação à mata nativa já era esperada, pois o aporte de matéria orgânica nesses locais das áreas cultivadas é superior a contida no biofertilizante. No entanto, vale ressaltar que nessa camada não houve diferenças significativas ( $P>0,05$ ) entre gotejadores e ruas das duas áreas cultivadas estudadas.

Na camada de 15-20 cm houve um incremento no teor de COT no tratamento A2R em relação ao tratamento MN. Entretanto, não houve diferenças significativas entre todos os tratamentos (A1R, A2R, A1G, A2G e MN). O tempo de aplicação do biofertilizante não levou, de maneira geral, à alterações significativas nos teores de COT, nas duas camadas estudadas (0-5 e 15-20 cm).

A matéria orgânica é considerada por muitos pesquisadores como o principal agente de estabilização dos agregados do solo (Kiehl, 1985; Souza et al., 2005; Mielniczuk, 2008; Souza et al, 2009) existindo correlação entre essa e a agregação um resultado comum em diversos trabalhos (Trannin et al., 2008). Os resultados encontrados nesse estudo, confirmaram as afirmativas desses autores apenas na camada de 0-5 cm, pois correlacionando-se os teores de COT com o IEA e o DMP, através da análise estatística de correlação de Pearson entre as variáveis (Tabela 7) foi observada contribuição significativa do COT, sobre tais propriedades nessa camada. Já na camada de 15-20 cm não foi observada nenhuma contribuição significativa do COT, sobre tais propriedades. Segundo vários autores, outros fatores juntamente com o COT também influenciam na agregação do solo, tais como; os óxidos de ferro e alumínio (Ferreira et

al., 1999; Six et al., 2002) comum em solos da Chapada do Apodi (Alencar, 2002; Mota, 2004); hidrofobicidade do agregado (Bastos et al., 2005a); ciclos de umedecimento e secagem (Viana et al., 2004; Bastos et al., 2005b); e o tipo do ácido orgânico (Martens, 2002; Corrêa et al., 2008).

Tabela 7: Coeficientes de correlação de Pearson entre indicadores da estabilidade de agregados (diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA)) e os teores de carbono orgânico total (COT), nas camadas de 0-5 e 15-20 cm

Parâmetros	COT	
	0-5 cm	15-20 cm
DMP	0,7744 <sup>o</sup>	-0,1443 <sup>ns(b)</sup>
EA	0,8573*	0,0385 <sup>(a)ns</sup>

<sup>(a)</sup> Coeficiente de correlação (r)

<sup>(b)</sup> n.s. P > 0,05; \*P<0,05; <sup>o</sup> P<0,10

Vale ressaltar que a relação entre a matéria orgânica do solo e o processo de agregação das partículas de solo é bastante complexa. Contudo, através do uso de técnicas de fracionamento físico tem sido possível determinar o comportamento de compartimentos dessa complexidade, o que tem contribuído no seu melhor entendimento. Adicionalmente, pressupõe-se que, associada ao fracionamento físico da matéria orgânica, o estudo qualitativo das frações orgânicas pode contribuir para a melhor compreensão da dinâmica da matéria orgânica, principalmente no que se refere à sua proteção física em solos tropicais e subtropicais sob diferentes sistemas de manejo (Costa et al., 2004).

As curvas de retenção de água no solo, ajustadas segundo o modelo de van Genuchten (1980), referentes às camadas de 0-5 e 15-20 cm, são apresentadas nas figuras 2 e 3, respectivamente.

As curvas de todos os tratamentos descrevem praticamente o mesmo comportamento, este resultado já era esperado, pois como visto nas tabelas 3 e 4, a aplicação de matéria orgânica seja por meio de biofertilizante ou restos culturais não modificaram a estrutura do solo, interpretada a partir de valores de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade.

Porém, algumas diferenças suaves podem ser observadas quanto aos conteúdos de água, mantendo uma estreita relação com a textura e estrutura do solo. Em potenciais altos, percebe-se a influência da distribuição de poros nas duas camadas estudadas (0-5

cm e 15-20cm). O tratamento A1R na camada de 0-5 cm e os tratamentos A1R e A2G na camada de 15-20 cm foram os sistemas que apresentaram os menores teores de macroporos e maiores teores de microporos, devido a isso, estes tratamentos apresentaram uma maior contenção de água nos potenciais de 6, 8 e 10 kPa. Este comportamento ocorre devido às forças capilares serem mais atuantes em potenciais matriciais elevados e nessa faixa de potencial matricial, a textura e a estrutura do solo determinam a quantidade de água contida nos poros capilares (Reichardt, 1990; Libardi, 2005).

Segundo Kiehl (1979), independente de sua função como condicionadora da estrutura do solo, a matéria orgânica por si aumenta a superfície específica do solo, e conseqüentemente a retenção de água de adsorção. Com a redução gradativa do potencial matricial, diminui o fenômeno capilar e aumenta o fenômeno de adsorção da água no solo pela diminuição da espessura do envelope que envolve as partículas do solo e aumenta a energia de retenção da água no solo (Reichardt, 1990; Libardi, 2005). Diante dessas afirmações era esperado que em potenciais baixos fossem observadas maiores retenções de água no tratamento MN, já que este apresentou teores de COT estatisticamente superiores aos demais tratamentos na camada de 0-5 cm. No entanto, essa influência da matéria orgânica não foi perceptível.

Os coeficientes de ajuste do modelo de van Genuchten ( $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ ), a umidade residual ( $\theta_{RES}$ ), a umidade do solo saturado ( $\theta_{SAT}$ ), o índice  $S$  e a umidade no ponto de inflexão da curva de retenção ( $\theta_{INFL}$ ) são apresentados na tabela 8. A análise estatística da desses parâmetros não revelou diferença significativa ( $P > 0,05$ ) entre os tratamentos e profundidades.

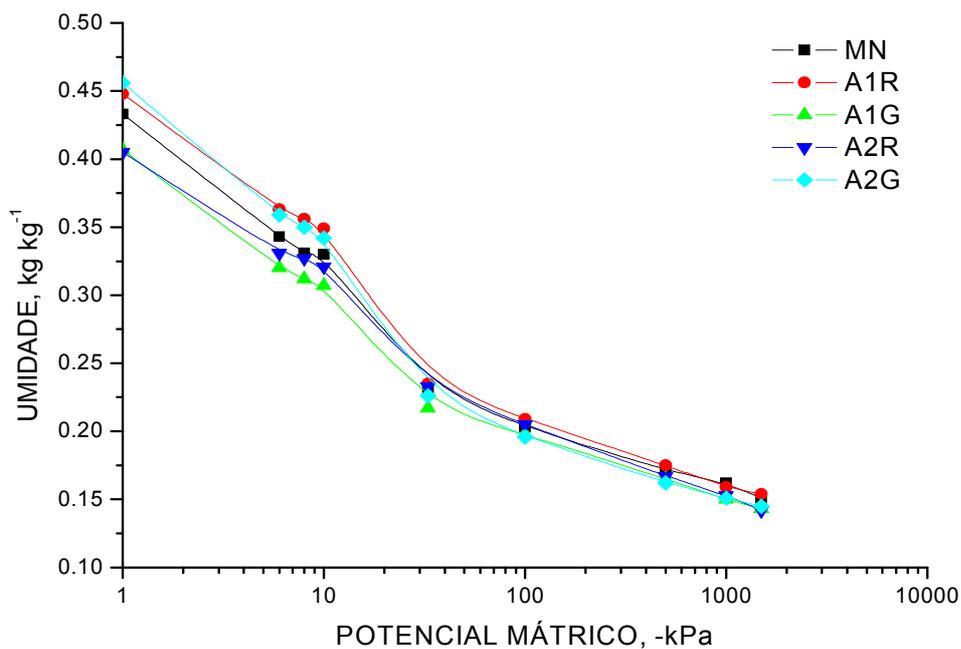


Figura 3: Curvas características de umidade do solo dos diferentes tratamentos, na camada de 0-5 cm

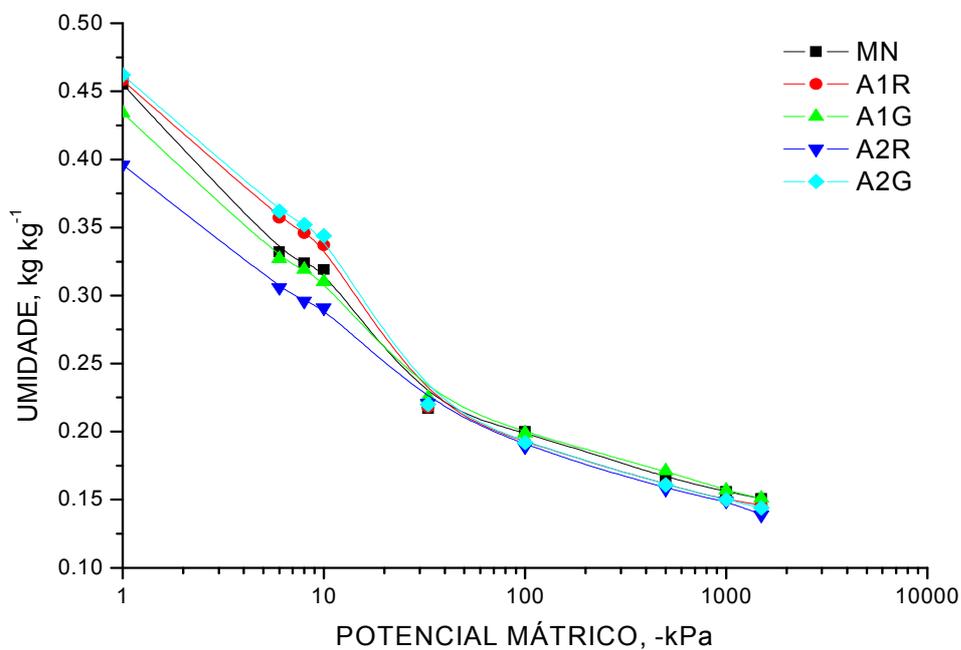


Figura 4: Curvas características de umidade do solo dos diferentes tratamentos, na camada de 15-20 cm

Tabela 8: Parâmetros de ajuste das curvas características de umidade do solo de acordo com o modelo proposto por van Genuchten (1980) e o índice S de acordo com Dexter (2004a,b,c) nas camadas de 0-5 e 15-20 cm dos diferentes tratamentos.

Trat.	Prof. (cm)	Parâmetros													
		$\theta_{sat}$		$\theta_{res}$		$\theta_{infl}$		$\alpha$		m		n		S	
		-----		kg kg <sup>-1</sup>		-----									
MN	0-5	0,433	Aa	0,151	Aa	0,324	Aa	0,2052 <sup>(1)</sup>	Aa	0,3782 <sup>(1)</sup>	Aa	1,6125 <sup>(1)</sup>	Aa	0,077	Aa
	15-20	0,455	Aa	0,151	Aa	0,337	Aa	0,2792 <sup>(1)</sup>	Aa	0,3812	Aa	1,6223 <sup>(1)</sup>	Aa	0,084	Aa
A1R	0-5	0,448	Aa	0,154	Aa	0,331	Aa	0,1830 <sup>(1)</sup>	Aa	0,4105 <sup>(1)</sup>	Aa	1,7472 <sup>(1)</sup>	Aa	0,092	Aa
	15-20	0,458	Aa	0,146	Aa	0,331	Aa	0,3208 <sup>(1)</sup>	Aa	0,4369	Aa	1,8406 <sup>(1)</sup>	Aa	0,106	Aa
A1G	0-5	0,407 <sup>(1)</sup>	Aa	0,143	Aa	0,305 <sup>(1)</sup>	Aa	0,2617 <sup>(1)</sup>	Aa	0,3831 <sup>(1)</sup>	Aa	1,6299 <sup>(1)</sup>	Aa	0,073	Aa
	15-20	0,434 <sup>(1)</sup>	Aa	0,151	Aa	0,324 <sup>(1)</sup>	Aa	0,2901 <sup>(1)</sup>	Aa	0,3801	Aa	1,6217 <sup>(1)</sup>	Aa	0,078	Aa
A2R	0-5	0,405	Aa	0,142	Aa	0,305	Aa	0,1794 <sup>(1)</sup>	Aa	0,3611 <sup>(1)</sup>	Aa	1,5704 <sup>(1)</sup>	Aa	0,068	Aa
	15-20	0,396	Aa	0,139	Aa	0,299	Aa	0,2238 <sup>(1)</sup>	Aa	0,3515	Aa	1,5491 <sup>(1)</sup>	Aa	0,065	Aa
A2G	0-5	0,456	Aa	0,145	Aa	0,333	Aa	0,1776 <sup>(1)</sup>	Aa	0,4044 <sup>(1)</sup>	Aa	1,6799 <sup>(1)</sup>	Aa	0,091	Aa
	15-20	0,462	Aa	0,144	Aa	0,335	Aa	0,1814 <sup>(1)</sup>	Aa	0,4174	Aa	1,7226 <sup>(1)</sup>	Aa	0,097	Aa

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2; A2G = gotejador da área 2;  $\theta_{sat}$  = umidade do solo saturado;  $\theta_{res}$  = umidade do solo na tensão de 1.500 kPa;  $\theta_{infl}$  = umidade no ponto de inflexão da curva e S = índice de qualidade física do solo sugerido por Dexter (2004a, b, c).

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

<sup>(1)</sup> Dados originais foram transformados ( $[X+1]^{0,5}$ );

De acordo com Dexter (2004a), a redução do índice S está ligada ao aumento da densidade do solo. A relação entre o índice S e a densidade do solo, considerando os cinco tratamentos foi linear nas camadas de 0-5 e 15-20 cm e são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente. A densidade do solo explica 83,3% e 74,1% da variação do índice S, nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, respectivamente; e sugere que práticas de manejo que promovam aumentos da densidade do solo implicam em redução do índice S ou da qualidade física e estrutural do solo. Esses resultados corroboram com Silva (2008) que estudando a qualidade física de um Luvissole também encontraram uma correlação linear ( $r^2 = 0,76$ ) entre o índice S e a densidade de solo. Tormena et al. (2008) avaliando o índice S de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com milho em sistemas de plantio direto e de preparo convencional do solo, também observaram que o valor de S diminuiu com o aumento da densidade do solo, indicando a redução da sua qualidade física.

Com relação ao índice S (indicador de qualidade do solo) observa-se que em todos os tratamentos e profundidades estudados estão acima de 0,050, valor considerado por Dexter & Czyz (2007) como muito bom. O estudo de Tormena et al. (2008) sugere que os valores críticos de S para solos temperados possam também ser aplicados nos solos tropicais, mais exclusivamente em Latossolos, porém os autores ressaltam que estudo em diferentes tipos de solos são necessários para melhor avaliar e validar o índice S como um indicador de qualidade física do solo.

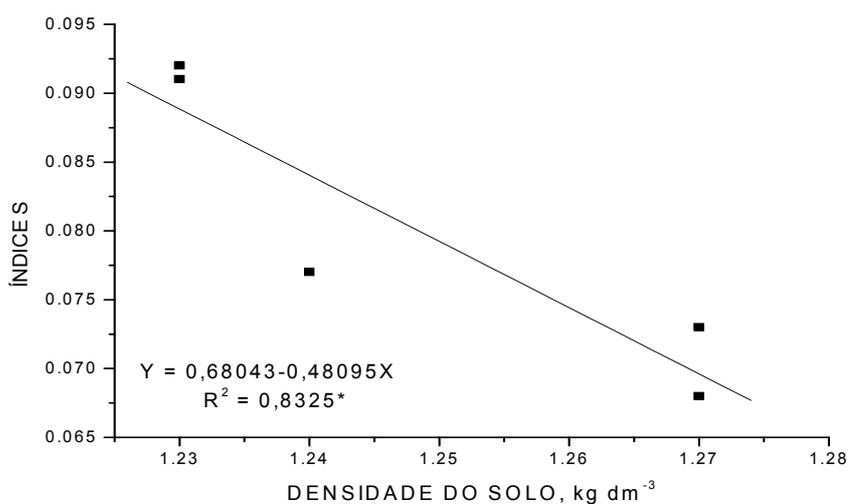


Figura 5: Índice S em função da densidade do solo, na camada de 0-5cm

\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

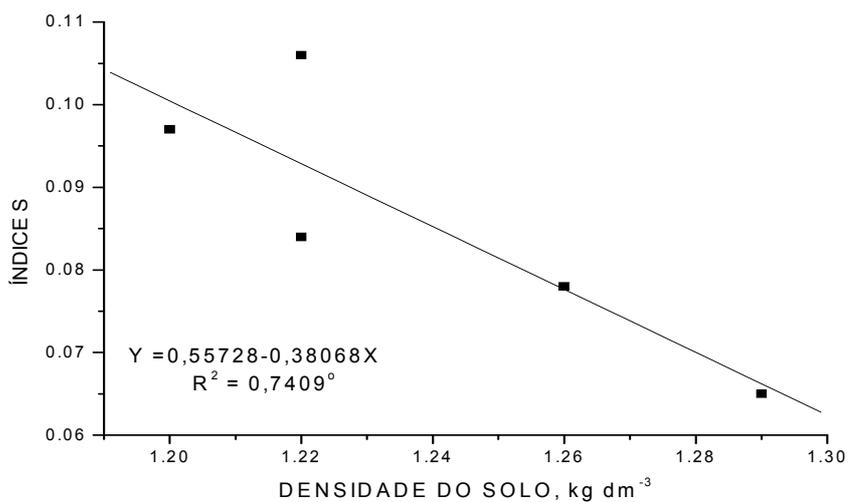


Figura 6: Índice S em função da densidade do solo, na camada de 15-20 cm

° Significativo a 10% de probabilidade pelo teste F.

Ao contrário da densidade do solo, o aumento do índice S parece está ligado com o aumento da porosidade total do solo. A relação entre o índice S e a porosidade total, considerando os cinco tratamentos foi linear nas camadas de 0-5 e 15-20 cm e são apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente. A porosidade total explica 95,8% e 78,3% da variação do índice S, nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, respectivamente.

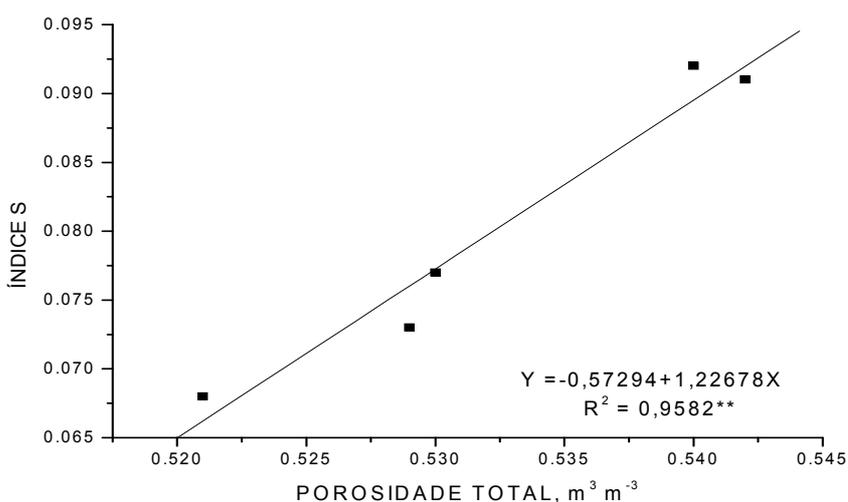


Figura 7: Índice S em função da porosidade total, na camada de 0-5 cm

\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

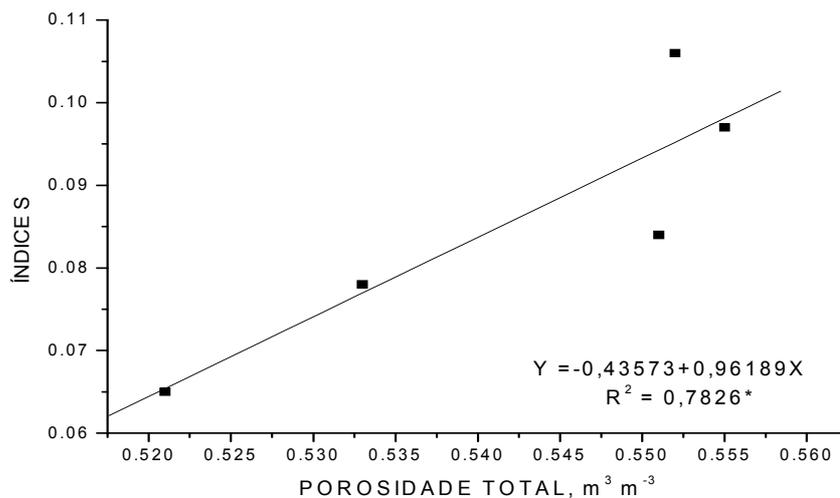


Figura 8: Índice S em função da porosidade total, na camada de 15-20 cm

\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Assim como ocorreu na porosidade total, o aumento do índice S parece está ligado com o aumento da microporosidade do solo. A relação entre o índice S e a microporosidade, considerando os cinco tratamentos foi linear nas camadas de 0-5 e 15-20 cm e são apresentadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente. A microporosidade explica 86,4% e 71,6% da variação do índice S, nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, respectivamente.

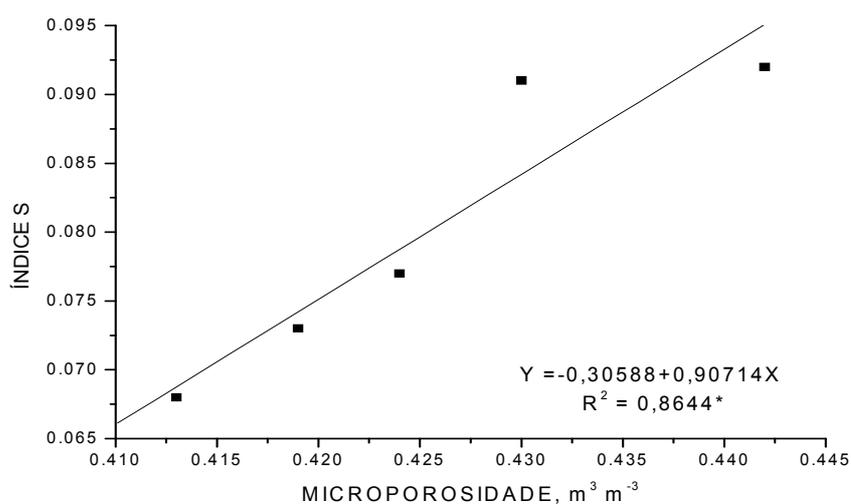


Figura 9: Índice S em função da microporosidade, na camada de 0-5 cm

\* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

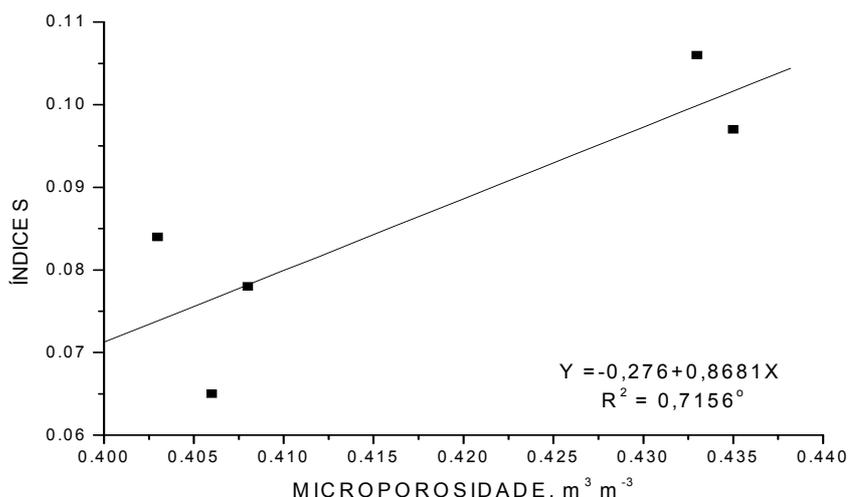


Figura 10: Índice S em função da microporosidade, na camada de 15-20 cm

° Significativo a 10% de probabilidade pelo teste F.

Não houve nenhuma correlação do índice S com a macroporosidade e os teores de COT, DMP e IEA. Esses resultados divergem dos encontrados por Silva (2008) e Dexter (2004a), ambos ao correlacionar o índice S com os teores de COT observaram correlações lineares positivas, ou seja, o aumento do teor de COT proporcionou o aumento no índice S. Portanto, por se tratar de um índice de qualidade física do solo proposto muito recentemente, sugere-se que novas pesquisas sejam realizadas levando-se em consideração não apenas o teor de carbono orgânico total, mas também se fazendo um fracionamento das substâncias orgânicas presentes no solo, pois assim como o tipo do material orgânico pode interferir tanto positivamente quanto negativamente na estrutura do solo, este trabalho mostrou que apenas o teor do carbono orgânico total não é capaz explicar a variação do índice S em todos os tipos de solos.

As análises estatísticas dos limites de plasticidade (LP), liquidez (LL), pegajosidade (LPeg) e do índice de plasticidade (IP) não revelaram diferença significativa entre os tratamentos e profundidades ( $P > 0,05$ ) (Tabela 9).

Levando-se em consideração que os limites de consistência do solo são influenciados pelas quantidades de argila (Kiehl, 1979), este resultado não era esperado, já que os solos estudados, apresentaram teores médios de argila de  $230 \text{ g kg}^{-1}$  e  $280 \text{ g kg}^{-1}$  nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, sendo classificados com classe textural franco e franco argiloso, respectivamente. No entanto, os teores de matéria orgânica exercem um papel fundamental nesses limites (Malkawi et al., 1999). A matéria

orgânica crua tem capacidade de retenção de água em torno de 80% do seu peso, à medida que vai sendo humificada, essa capacidade de reter água se eleva alcançando em média 160% (Kiehl, 1985). Como os teores de COT da camada de 0-5 cm em todos os tratamentos foram maiores que os teores da camada de 15-20 cm, então é possível que os teores de COT tenham se equiparado com os teores de argila, em termos de retenção de água, fazendo com que não gerassem diferenças estatísticas entre as profundidades.

Tabela 9: Limites de plasticidade, liquidez, pegajosidade e índice de plasticidade nas camadas de 0-5 e 15-20 cm

<b>Prof.</b> <b>cm</b>	<b>MN</b>	<b>A1R</b>	<b>A1G</b>	<b>A2R</b>	<b>A2G</b>	<b>CV</b> <b>%</b>
	<b>kg kg<sup>-1</sup></b>					
<b>LPm</b>						
0 - 5	0,253 Aa	0,265 Aa	0,212 Aa	0,254 Aa	0,245 Aa	9,89
15 - 20	0,253 Aa	0,231 Aa	0,216 Aa	0,245 Aa	0,251 Aa	9,41
CV (%)	6,53	12,58	9,18	9,14	9,80	-
<b>LL</b>						
0 - 5	0,320 Aa	0,334 Aa	0,333 <sup>(1)</sup> Aa	0,333 Aa	0,320 Aa	9,45
15 - 20	0,310 Aa	0,303 Aa	0,328 <sup>(1)</sup> Aa	0,321 Aa	0,312 Aa	13,01
CV (%)	6,46	8,47	2,06**	12,70	8,22	-
<b>LPeg</b>						
0 - 5	0,360 Aa	0,376 Aa	0,367 <sup>(1)</sup> Aa	0,372 Aa	0,356 Aa	8,85
15 - 20	0,356 Aa	0,344 Aa	0,364 <sup>(1)</sup> Aa	0,358 Aa	0,346 Aa	1,54 <sup>(2)</sup>
CV (%)	7,09	7,23	1,89 <sup>(2)</sup>	12,02	9,82	
<b>IP</b>						
0 - 5	6,67 Aa	6,88 Aa	12,06 Aa	7,95 <sup>(1)</sup> Aa	7,50 Aa	14,14 <sup>(2)</sup>
15 - 20	5,73 Aa	7,15 Aa	11,19 Aa	7,53 <sup>(1)</sup> Aa	6,13 Aa	17,80 <sup>(2)</sup>
CV (%)	10,34	21,36	40,78	24,84 <sup>(2)</sup>	23,68	-

MN = mata nativa; A1R = rua da área 1; A1G = gotejador da área 1; A2R = rua da área 2; A2G = gotejador da área 2; LPm = limite de plasticidade medido; LL = limite de liquidez; LPeg = limite de pegajosidade e IP = índice de plasticidade.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %.

<sup>(1)</sup> Dados originais foram transformados  $([X+1]^{0,5})$ ;

<sup>(2)</sup> Coeficiente de variação (%) dos dados depois de transformados.

Ball et al. (2000) destacam que é mais importante a qualidade do que quantidade de matéria orgânica na alteração da consistência do solo. Portanto, essa afirmação pode justificar a não diferença estatística entre os tratamentos, tendo em vista que, apesar do tratamento MN, na camada de 0-5 cm, ter tido 92,3% de COT a mais que

o tratamento A2G, não gerou diferenças estatísticas ( $P < 0,05$ ) entre os limites de consistências do solo estudado.

Com base no índice de plasticidade sugerido por Amaro Filho et al. (2008) em que valor  $< 1$  – o solo não apresenta plasticidade; valor de 1 até 7 – fracamente plástico; de 7 até 15 – medianamente plástico; e valor acima de 15 – altamente plástico, na camada de 0-5 cm dos tratamentos MN e A1R foram considerados como fracamente plástico; enquanto que nesta mesma camada os tratamentos A1G, A2R e A2G foram considerados como medianamente plástico. Quanto à camada de 15-20cm, os tratamentos MN e A2G apresentaram como fracamente plásticos e os demais tratamentos, como medianamente plástico.

As análises estatísticas do limite de plasticidade medido (LPm) (Embrapa, 1997) e do limite de plasticidade calculado (LPc) (Dexter & Bird, 2001) nas camadas de 0-5 e 15-20 cm são demonstradas nas figuras 13 e 14. Observa-se que nas duas profundidades avaliadas o modelo de predição do LP a partir do ponto de inflexão da curva de retenção de água, proposto por Dexter & Bird (2001) superestimou o valor real do LP (LPm) em todos os tratamentos.

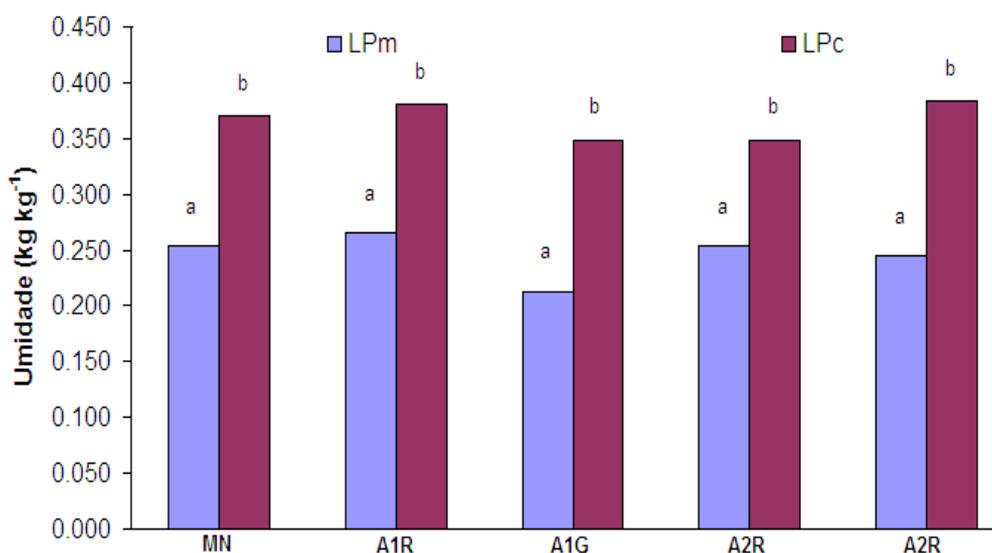


Figura 11: Comparação entre o limite de plasticidade medido (LPm) e o limite de plasticidade calculado de acordo com Dexter & Bird (2001) (LPc) na camada de 0-5 cm

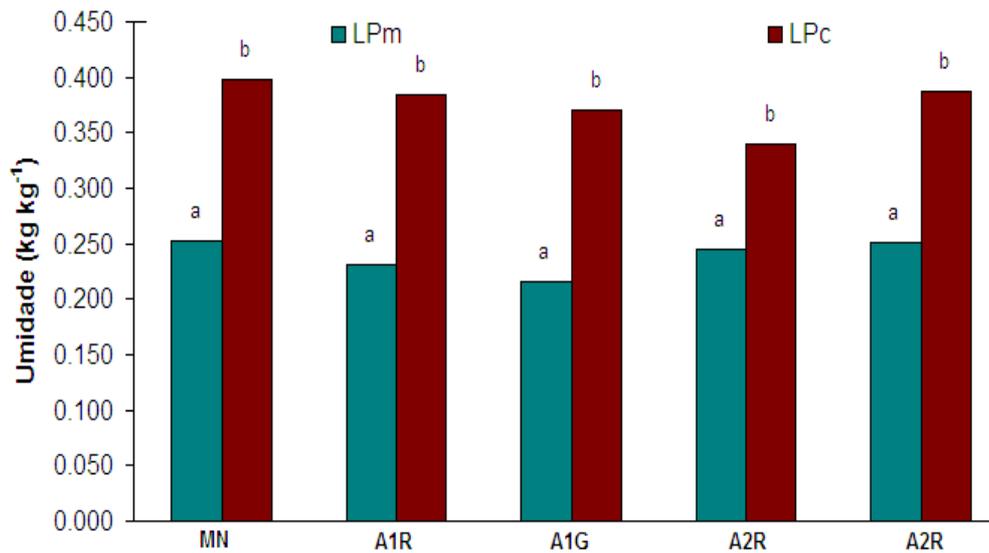


Figura 12: Comparação entre o limite de plasticidade medido (LPm) e o limite de plasticidade calculado de acordo com Dexter & Bird (2001) (LPc) na camada de 15-20 cm

## 5. CONCLUSÕES

O cultivo levou à diminuição do teor de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-5 cm. A aplicação de biofertilizante e a incorporação de matéria orgânica não influenciaram nos teores de COT nas camadas avaliadas.

A maior concentração de agregados estáveis ocorreu na classe de maior diâmetro (4,76-2,00 mm) nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, sendo fortemente influenciados pelo tempo de aplicação do biofertilizante, assim como também foram influenciados o DMP e o IEA.

O maior teor de COT no tratamento MN levou a diminuição da densidade das partículas na camada de 0-5cm.

As curvas características de retenção de umidade de todos os tratamentos descreveram praticamente o mesmo comportamento, mantendo uma estreita relação com a estrutura do solo.

De acordo com o índice S este solo apresenta uma qualidade física muito boa em todos os tratamentos e profundidades avaliadas, apresentando valores maiores que 0,050. Houve correlação linear do índice S com a densidade do solo, porosidade total e microporosidade nas duas profundidades. Não foi observada correlação significativa do

índice S com o teor de COT e com outros parâmetros da estrutura do solo, como a macroporosidade, o DMP e o IEA.

A incorporação de matéria orgânica e o tempo de aplicação do biofertilizante não promoveram diferenças estatísticas na densidade solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, LL, LP, Lpeg e no IP entre os tratamentos e profundidades avaliadas. O modelo de predição do LP a partir do ponto de inflexão da curva de retenção superestimou os valores de LP.

De maneira geral, pode-se dizer que o solo estudado apresentou uma qualidade física muito boa; no entanto, a macroporosidade por ter apresentado valores muito próximo do limite considerado crítico ( $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) deve ser sempre monitorada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; MAFRA, A.L. & FONTANA, E.C. *Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido*. R. Bras. Ci. Solo, 27:799-806, 2003.
- ALENCAR, E.L.L. *Química e mineralogia de três pedons originários de calcário da Chapada do Apodi - CE*. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2002. 61p. (Dissertação de Mestrado)
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A. *Física do solo: conceitos e aplicações*. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290p.
- ANJOS, J.T.; UBERTI, A.A.A.; VIZZOTTO, V.J.; LEITE, G.B. & KRIEGER, M. *Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo*. R. bras. Ci. Solo, 18:139-145, 1994.
- ARATANI, R.G.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F. & ANDRIOLI, I. *Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo*. R. Bras. Ci. Solo, 33:677-687, 2009.
- ARAÚJO, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; CAVALCANTE, L.F.; PEREIRA, W.E.; BRITO, N.M.; NEVES, C.M.L. & SILVA, É.É. *Produção do pimentão adubado com*

- esterco bovino e biofertilizante*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, 11:466–470, 2007.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. *Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa*. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004.
- ASSIS, L.R. & LANÇAS, K.P. *Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa*. R. Bras. Ci. Solo, 29:515-522, 2005.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J. & HUNTER, E.A. *Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK*. Soil Till. Res. 57:83-91, 2000.
- BANZATTO, D.A. & KRONKA, S.N. *Experimentação Agrícola*. 4.ed. Jaboticabal: Funep, 2006. 237p.
- BARRAL, M.T.; ARIAS, M. & GUÉRIF, J. *Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates*. Soil Till. Res. 46:261-272, 1998.
- BASTOS, R.S.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ V., V.H. & CORRÊA, M.M. *Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas*. R. Bras. Ci. Solo, 29:11-20, 2005a.
- BASTOS, R.S.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ V., V.H.; CORRÊA, M.M. & COSTA, L.M. *Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas*. R. Bras. Ci. Solo, 29:21-31, 2005b.
- BAVER, L. D., GARDNER, W. H. & GARDNER, W. R. *Física del Suelos*. México, Hispano Americano, 1972. 529p.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L. & SAAB, S.C.. *Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo húmico em plantio direto*. R. Bras. Ci. Solo, 27:537-544, 2003.
- BENDFELDT, E.S. *Dynamics and Characterization of Soil Organic Matter on Mine Soils 16 years after Amendment with Topsoil, Sawdust, and Sewage Sludge*. Blacksburg, Virginia: Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999. 138p. (Thesis Master of Science).
- BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6.ed. Viçosa: UFV, 1995. 657p.

- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. *Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo*. R. Bras. Ci. Solo, 28:155-163, 2004.
- BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D. & BATISTELA, O. *Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo*. Sci. Agric, 58:555-560, 2001.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; JOÃO, A.C.G.S. & FREDDI, O.S. *Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja*. R. Bras. Ci. Solo, 31:1223-1232, 2007a.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; NETO, E.L.S.; LEONEL, C.L. & SILVA, A.P. *Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield*. Sci. Agric., 64:608-615, 2007b.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. *Bulk Density*. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* 2.ed. Madison: American Society of Agronomy Soil Science of Agronomy/ Soil Science Society of America, 1986, p.363-376 (Agronomy Monography, 9).
- BOEIRA, R.C. & SOUZA, M.D. *Estoques de Carbono orgânico e de Nitrogênio, pH e densidade de um Latossolo após três aplicações de lodos de esgoto*. R. Bras. Ci. Solo, 31:581-590, 2007.
- BORGES, T.A.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, E.M. & GOEDERT, W.J. *Avaliação de parâmetros físico-hídricos de Latossolo Vermelho sob pastejo e sob cerrado*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, 13:18–25, 2009.
- BOT, A. & BENITES, J. *The importance of soil organic matter key to drought-resistant soil and sustained food production*. FAO, 2005. 77p. (Bulletin 80).
- BRADY, N.C. *Natureza e propriedades dos solos*. 7.ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989. 879p.
- BRASIL. *Levantamento exploratório – Reconhecimento de solos do Estado do Ceará*. Recife, Ministério da Agricultura. Volume 1. Divisão de Pesquisa Pedológica (Boletim técnico, 28) e Divisão agrologia (série pedologia, 16). Convênios MA/DNPA – SUDENE/DRN, MA/CONAP/USAID/ETA, 1973. 301p.
- BRONICK, C.J. & LAL, R. *Soil structure and management: a review*. Geoderma. 124:3-22, 2005.

- CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S. & AZEVEDO, W.R. *Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo*. R. Bras. Ci. Solo, 33:147-157, 2009.
- CASTRO, C.M.; ARAÚJO, A.P.; RIBEIRO, R.L.D. & ALMEIDA, D.L. *Efeito de biofertilizante no cultivo orgânico de quatro cultivares de beterraba na baixada metropolitana do Rio de Janeiro*. Rev. Univ. Rural, Sér. Ci. Vida, 24:81-87, 2004.
- CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, Á.P.; ARVIDSSON, J. & TORMENA, C.A. *Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háptico*. R. Bras. Ci. Solo, 33:477-485, 2009.
- CERETTA, C.A.; DURIGON, R.; BASSO C.J.; BARCELLOS, L.A.R. & VIEIRA, F.C.B. *Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural*. Pesq. agropec. bras., 38:729-735, 2003.
- CHAVES, A.F. *Influência da cobertura morta sobre atributos físicos e químicos do solo cultivado com milho na chapada do Apodi-CE*. Fortaleza, CE: UFC, 74p., 2004. (Dissertação de mestrado).
- COLLARD, F.H.; ALMEIDA, A.; COSTA, M.C.R. & ROCHA, M.C. *Efeito do uso de biofertilizante Agrobio na cultura do maracujazeiro amarelo (passiflora edulis f. flavicarpa deg)*. Rev. biociênc., 7:15-21, 2001.
- CORRÊA, J.C; BULL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C. & MORAES, M.H. *Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário*. R. Bras. Ci. Solo, 33:263-272, 2009.
- CORRÊA, M.M.; ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; SCHAEFER, C.E.G.R.; PEREIRA, T.T.C. & ALMEIDA, C.C. *Ácidos orgânicos de baixo peso molecular e ácidos húmicos e alterações em algumas propriedades físicas e químicas de latossolos, plintossolos e neossolos quartzarênico*. R. Bras. Ci. Solo, 32:121-131, 2008.
- COSTA, A.M.; SOUZA, M.A.S.; SILVA JÚNIOR, A.M.; FALQUETO, R.J. & BORGES, E.N. *Influência da cobertura vegetal na densidade de três solos do Cerrado*. In: II SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOGRAFIA “PERSPECTIVAS PARA O CERRADO NO SÉCULO XXI”, 2003, Uberlândia. Anais. Uberlândia, 2003, p.1-8.
- COSTA, F.S.; BAYER, C; ALBUQUERQUE, J.A. & FONTOURA, S.M.V. *Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto*. Ciência Rural, 34:587-589, 2004.

- DAMATO JÚNIOR, E.R.; BÔAS, R.L.V.; LEONEL, S. & FERNADES, D.M. *Alterações em propriedades de solo adubado com doses de compostos orgânicos sob cultivo de bananeira*. Rev. Bras. Frutic., 28:546-549, 2006.
- DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. *Porosity*. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* 2.ed. Madison: American Society of Agronomy Soil Science of Agronomy/ Soil Science Society of America, 1986. p. 443-461. (Agronomy Monography, 9).
- DEXTER, A. R. *Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth*. Geoderma, 120:201-214, 2004a.
- 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 Till. Res. 57:203-212, 2001.
- DEXTER, A.R. *Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting*. Geoderma 120:215–226, 2004b.
- DEXTER, A.R. *Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory*. Geoderma 120:227–239, 2004c
- DEXTER, A.R. & CZYZ, E.A. *Application of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences*. Land Degrad. Dev. 18:369–381, 2007.
- DEXTER, A.R.; RICHARD, G.; ARROUAYS, D.; CZYŻ, E.A.; JOLIVET, C. & DUVAL, O. *Complexed organic matter controls soil physical properties*. Geoderma, 144:620-627, 2008.
- DIAS, P.F.; SOUTO, S.M.; LEAL, M.A.A. & SCHIMIDT, L.T. *Uso de biofertilizante líquido na produção de Alfafa*. Embrapa, 2002. 15p. (Documentos 151).
- 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.
- DUFRANC, G.; DECHEN, S.C.F.; FREITAS, S.S. & CAMARGO, O.A. *Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no estado de São Paulo*. R. Bras. Ci. Solo, 28:505-517, 2004.
- EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, 1997. 212p.
- EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, 2006. 306p.

- FERREIRA, D.F. *Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0*. In: XLV Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, 2000. p.255-258.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. *Influência da mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil*. R. Bras. Ci. Solo, 23:515-524, 1999.
- FIALHO, J.S.; GOMES, V.F.F.; OLIVEIRA, T.S.; SILVA JÚNIOR, J.M.T. *Indicadores da qualidade do solo em áreas sob vegetação natural e cultivo de bananeira na Chapada do Apodi-CE*. Rev. Ciênc. Agron., 37:250-257, 2006.
- FOTH, H.D. *Fundamentals of soil science*. 8.ed. Michigan State University:John Wiley & Sons, 1990, 360p.
- FREIRE, M.B.G.S. & FREIRE, F.J. *Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais*. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. 1.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p.1-64.
- GAVANDE, S.A.. *Física de Suelos*. Editorial Limusa Wiley S.A., México, 1973. 351p.
- GUÉRIF, J.; RICHARD, G.; DÜRR, C.; MACHET, J.M.; RECOUS, S. & ROGER-ESTRADE, J. *A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment*. Soil Till. Res. 61:13-32, 2001.
- JORGE, J.A.; CAMARGO, O.A. & VALADARES, J.M.A.S. *Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário*. R. bras. Ci. Solo, 15:237-240, 1991.
- KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S.; DORAN, J.W. *Soil quality: Current concepts and applications*. Adv. Agron. 74:1-40, 2001.
- KARLEN, D.L.; DITZLER, C.A.; ANDREWS, S.S. *Soil quality: why and how?* Geoderma, 114:145-156, 2003.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. *Aggregate stability and size distribution*. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* 2.ed. Madison: American Society of Agronomy Soil Science of Agronomy/ Soil Science Society of America, 1986. p.425-442. (Agronomy Monography, 9).
- KIEHL, E.J. *Fertilizantes orgânicos*. São Paulo: Editora Agronomia Ceres, 1985, 492p.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia – relações solo-planta*. São Paulo: Editora Agronomia Ceres, 1979, 264p.

- KLUTE, A. *Water Retention: Laboratory Methods*. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* 2.ed. Madison: American Society of Agronomy Soil Science of Agronomy/ Soil Science Society of America, 1986. p.635-662 (Agronomy Monography, 9).
- LAL, R. & SHUKLA, M. K. *Principles of Soil Physics*. The Ohio State University Columbus, Ohio, 2004. 682p.
- LETEY, J. *Relationship between soil physical properties and crop production*. Adv. Soil Sci., 1: 277-294, 1985.
- LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.
- LISBOA, C.C. *Vulnerabilidade da matéria orgânica do solo ao aumento de temperatura*. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2008. 95p. (Dissertação de mestrado).
- MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & SCAPIM, C.A. *Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso*. R. Bras. Ci. Solo, 32:495-502, 2008.
- MAIA, C.E. & CANTARUTTI, R.B. *Acumulação de nitrogênio e carbono no solo pela adubação orgânica e mineral contínua na cultura do milho*. Rev. bras. eng. agríc. ambient., 8:39-44, 2004.
- MALKAWI, A.I.H.; ALAWNEH A.S. & ABU-SAFAQAH, O.T. *Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil*. Appl. Clay Science, 14:257-278, 1999.
- MARTENS, D.A. *Identification of Phenolic Acid Composition of Alkali-extracted Plants and Soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:1240-1248, 2002.
- MEDEIROS, D.C.; FREITAS, K.C.S.; VERAS, F.S.; ANJOS, R.S.B.; BORGES, R.D.; CAVALCANTE NETO, J.G.; NUNES, G.H.S.; FERREIRA, H.A.. *Qualidade de mudas de alface em função de substratos com e sem biofertilizante*. Horticultura Brasileira, 26:186-189, 2008.
- MEDEIROS, M.B. & LOPES, J.S. *Biofertilizantes líquidos e sustentabilidade agrícola*. Bahia Agríc., 7:24-26, 2006.
- MEDEIROS, M.B.; WANDERLEY, P.A.; FRANKLIM, F.; FERNANDES, F.S.; ALVES, G.S.; DANTAS, P.; XAVIER, W.M.R.; LEAL NETO, J.S. *Uso de biofertilizantes líquidos no manejo ecológico de pragas agrícolas*. In: II ENCONTRO TEMÁTICO MEIO AMBIENTE E EDUCAÇÃO AMBIENTAL

- DA UFPB, João Pessoa. Livro de Resumos do II Encontro Temático Meio Ambiente e Educação. João Pessoa : Editora - UFPB, 2003. v. Único. p. 19-23.
- MELLO, F.A.F; SOBRINHO, M.O.C.B.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R.I.; NETTO, A.C. & KIEHL, J.C. *Fertilidade do Solo*. 4.ed. São Paulo: Nobel, 1983, 400p.
- MELO, D. *Compactação do solo nas camadas agricultáveis nos sistemas de plantio direto e cultivo mínimo*. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2006. 73p. (Dissertação de mestrado).
- MELO, V.P.; BEUTLER, A.N.; SOUZA, Z.M.; CENTURION, J.F. & MELO, W.J. *Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido*. *Pesq. agropec. bras.*, 39:67-72, 2004.
- MENDONÇA, E.S. & MATOS, E.S. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107p.
- MESQUITA, E.F.; CAVALCANTE, L.F.; GONDIM, S.C.; CAVALCANTE, Í.H.L.; ARAÚJO, F.A.R. & BECKMANN-CAVALCANTE, M.Z. *Produtividade e qualidade de frutos do mamoeiro em função de tipos e doses de biofertilizantes*. *Semina: Ciências Agrárias*, 28:589-596, 2007.
- MEURER, E.J. *Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas*. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. 1.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p.65-90.
- MEURER, E.J.; RHEINHEIMER, D. & BISSANI, C.A. *Fenômenos de sorção em solo*. In: MEURER, E.J., ed. *Fundamentos de química do solo*. 3.ed. Porto Alegre,RS: Evangraf, 2006. p.117-163.
- MICUCCI, G.F. & TABOADA, M.A. *Soil physical properties and soybean (Glycine max, Merrill) root abundance inconventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina*. *Soil Till. Res.*, 86:152-162, 2006.
- MIELNICZUK, J. *Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas*. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecosistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre, RS: Metrópole, 2008. p.1-5.
- MOTA, J.C.A. *Caracterização física, química e mineralógica, como suporte para o manejo, dos principais solos explorados com a cultura do melão na chapada do Apodi-RN*. Fortaleza, CE: UFC, 2004. 96p. (Dissertação de mestrado).

- 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*. R. Bras. Ci. Solo, 32:49-58, 2008
- MUALEM, Y. *Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas*. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods* 2.ed. Madison: American Society of Agronomy Soil Science of Agronomy/ Soil Science Society of America, 1986. p. 799-823. (Agronomy Monography, 9).
- MUELLER, L.; SCHINDLER, U.; FAUSEY, N.R. & LAL, R. *Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability*. Soil & Till. Res. 72:9-20, 2003.
- OLIVEIRA, A.P.; BARBOSA, A.H.D.; CAVALCANTE, L.F.; PEREIRA, W.E. & OLIVEIRA, A.N.P. *Produção da batata-doce adubada com esterco bovino e biofertilizante*. Ciênc. agrotec., 31:1722-1728, 2007.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURI, N. *Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo*. R. Bras. Ci. Solo, 28:327-336, 2004.
- OLIVEIRA, I.P.; SOARES, M.; MOREIRA, J.A.A.; ESTRELA, M.F.C.; DALL'ACQUA F.M.; FILHO, O.P. & ARAÚJO, R.S. *Resultados técnicos e econômicos da aplicação de biofertilizante bovino nas culturas de feijão, arroz e trigo*. Goiânia: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- CNPAF. 1986. 24 p. (Circular Técnica 21).
- OLIVEIRA, P.M.; SILVA, A.M.; COELHO, G. & SILVA, R.A. *Análise comparativa da caracterização físico-hídrica de um Latossolo Vermelho distrófico "in situ" e em laboratório*. Irriga, 10:1-19, 2005.
- OR, D & WRAITH, J.M *Soil Water Content and Water Potential Relationships*. In: WARRICK, A.W., ed. *Soil Physics Companion*. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida, CRC Press, 2002. p.49-84.
- PREVEDELLO, C.L. *Física do solo: com problemas resolvidos*. Curitiba, Sociedade autônoma de estudos avançados em física do solo, SAEFS. 1996. 446p.
- QUEIROZ, F.M.; MATOS, A.T.; PEREIRA, O.G. & OLIVEIRA, R.A. *Características químicas de solo submetido ao tratamento com esterco líquido de suínos e cultivado com gramíneas forrageiras*. Ciência Rural, 34:1487-1492, 2004.

- REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo, SP: Editora Manole Ltda., 1990, 186p.
- REICHARDT, K. *Capacidade de Campo*. Rev. Bras. Ci. Solo, 12:211-216, 1988.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. & LUC, X. *Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters*. Geoderma, 110:131-146, 2002.
- RODOLFO JÚNIOR, F. *Resposta do maracujazeiro-amarelo e da fertilidade do solo com biofertilizantes e adubação mineral com NPK*. Areia, PB: UFPB, 2007. 82p. (Dissertação de mestrado).
- ROSCOE, R.; BODDEY, R.M. & SALTON, J.C. *Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo*. In: ROSCOE, R., MERCANTE, F.M. & SANTON, J.C. eds. *Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares*. 1.ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 306p.
- 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, 130:272-283, 2006.
- SÁ, J.M.C.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; PICCOLO, M.C. & FEIGL, B.E. *Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage cronosequence in a Brazilian Oxisol*. Soil Till. Res. 104:56-64, 2009.
- SAEG. *Sistemas para análises estatística. 9.1*. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, UFV/DBG, 2006.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J; BAYER, C; BOENI, M; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C; MACEDO, M.C.M. & BROCH, D.L. *Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul*. R. Bras. Ci. Solo, 32:11-21, 2008.
- SANTOS, J.F.; LEMOS, J.N.R.; NÓBREGA, J.Q.; GRANGEIRO, J.I.T; BRITO, L.M.P. & OLIVEIRA, M.E.C. *Produtividade de feijão caupi utilizando biofertilizante e uréia*. Tecnol. & Ciên. Agropec., 1:25-29, 2007.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & KAY, B. *Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system*. Sci. Agric., 61:451-456, 2004.

- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. *Characterization of the least limiting water range*. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S; GUIMARÃES, P.T.G. & ARAÚJO JÚNIOR, C.F. *Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros*. R. Bras. Ci. Solo, 30:207-216, 2006a.
- 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., 41:323-330, 2006b.
- SILVA, G.L. *Qualidade física de um Luvissoleto cultivado com sistemas agroflorestais convencional no semi-árido cearense*. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2008. 68p. (Dissertação de Mestrado)
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, F. *Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo*. R. Bras. Ci. Solo, 21:113-117, 1997.
- SILVA, I.R. & MENDONÇA, E.S. *Matéria orgânica do solo*. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. 1.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p.275-374.
- SILVA, L.S., CAMARGO, F.A.O. & CERETTA, C.A. *Composição da fase sólida orgânica do solo*. In: MEURER, E.J., ed. *Fundamentos de química do solo*. 3.ed. Porto Alegre,RS: Evangraf, 2006c. p.63-90.
- 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*. Ciência Rural, 35:544-552, 2005.
- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L. & FRANZ, C.A.B. *Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção de sistema de plantio direto, avaliada por meio da pressão de pré-consolidação*. R. Bras. Ci. Solo, 27:961-971, 2003.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F. & COSTA, L.M. *Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, 10:842-847, 2006d.

- SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.; GRISI, B.M.; HUNGRIA, M.; ARAUJO, R.S. *Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental*. Brasília, DF: Embrapa, 1994. 142p. (Documento 45)
- SIX, J.; CONANT, FELLER, C.; DENEFF, K; OBLE, S.M.; SÁ, J.C.M.; & ALBRECHT, A. *Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soil – Effects of no-tillage*. *Agronomie*, 22:755-775, 2002.
- SKOPP, J.M. *Physical properties of primary particles*. In: WARRICK, A.W., ed. *Soil Physics Companion*. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida, CRC Press, 2002. p.1-16.
- SOUZA, C.M.A; RAFULL, L.Z.L. & VIEIRA, L.B. *Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias*. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, Campina Grande, 4:460-464, 2000.
- SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; MELO, V.P. & MELO, W.J. *Estabilidade de agregados e resistência à penetração em Latossolos adubados por cinco anos com biossólido*. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:117-123, 2005.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J; PEREIRA, G.T. & SÁENZ, C.M.S. *Spatial variability of aggregate stability in Latosols under sugarcane*. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:245-253, 2009.
- SPARKS, D.L. *Environmental soil chemistry*. California: Academic Press, 1995. 267p.
- TAN, K.H. *Principles of Soil Chemistry*. New York: Marcel Dekker, 1998. 267p.
- TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. *Variação temporal do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto*. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. *Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto*. *R. Bras. Ci. Solo* 22:573-581, 1998.
- TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & FIDALSKI, J. *Propriedades físicas e taxa de escarificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob sistemas de manejo*. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:1028-1031, 2004.
- TORMENA, C.A.; SILVA, Á.P.; IMHOFF, S.D.C. & DEXTER, A.R. *Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index*. *Sci. Agric.* 65:56-60, 2008.

- TRANNIN, I.C.B.; SIQUEIRA, J.O. & MOREIRA, F.M.S. *Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, 12:223–230, 2008.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. *A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-897, 1980.
- VIANA, J.H.M.; FERNANDES FILHO, E.I. & SCHAEFER, C.E.G.R. *Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos*. R. Bras. Ci. Solo, 28:11-19, 2004.
- VIEIRA, L.G. *Manual da ciência do solo: com ênfase aos solos tropicais*. 2.ed. São Paulo, SP: Editora Agronômica Ceres, 1988. 464p.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONCA, E.S. & NEVES, J.C.L. *Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos*. Pesq. agropec. bras. 40:487-494, 2005.
- WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BLUME, E. *Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão*. R. Bras. Ci. Solo, 28:891-900, 2004.
- WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. *Soil management effects on the nonlimiting water range*. Geoderma, 114:401-414, 2003.