

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA E QUALIDADE FÍSICA DE
TRÊS SOLOS DO NORTE FLUMINENSE PARA A CULTURA DO
COQUEIRO ANÃO**

REJANE SIQUEIRA BERNARDES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2010**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA E QUALIDADE FÍSICA DE
TRÊS SOLOS DO NORTE FLUMINENSE PARA A CULTURA DO
COQUEIRO ANÃO

REJANE SIQUEIRA BERNARDES

Tese apresentada ao Centro de
Ciências e Tecnologias Agropecuárias
da Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte
das exigências para obtenção do título
de Doutor em Produção Vegetal

Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2010

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA E QUALIDADE FÍSICA DE
TRÊS SOLOS DO NORTE FLUMINENSE PARA A CULTURA DO
COQUEIRO ANÃO

REJANE SIQUEIRA BERNARDES

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal

Aprovada em 24 de fevereiro de 2010

Comissão Examinadora:

Prof. Gilmar Santos Costa (D.Sc., Produção Vegetal) – IFF/UNED-Guarus

Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF

Prof. Geraldo de Amaral Gravina (D.Sc., Fitotecnia) - UENF

Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) - UENF
Orientador

Ao meu querido Vinicius,
aos nossos familiares e nossos irmãos.

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por “não reter nada de bom dos que andam sem defeito”.

Ao Vinícius, pelo amor e dedicação em todos os momentos.

A minha família, pelo incentivo, apesar da saudade.

Ao meu orientador, professor Cláudio Roberto Marciano, pela excelente convivência, amizade e instrução.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela concessão da bolsa e a oportunidade de realizar o curso.

Ao Sr. Gonçalo de La Riva, pelo apoio à pesquisa.

À Estação Experimental da PESAGRO-RJ.

Ao Colégio Estadual Agrícola Antonio Sarlo.

Aos funcionários da Fazenda Taí, Pesagro e Colégio Estadual Agrícola Antonio Sarlo.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Solos, pela amizade e ajuda.

Aos amigos Romano e Anderson, pela agradável companhia e partilha de conhecimento.

Às queridas amigas Derliane, Carolina e Poliana, pela amizade, companherismo, consideração e respeito em todos esses anos.

A todos os amigos e aos irmãos de fé que me trouxeram muitas alegrias e contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigada.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Relação entre fatores físicos do solo, e destes com as plantas, no cultivo agrícola	13
2.1.1 Inter-relações entre os atributos físicos do solo	14
2.1.2 Relações entre as propriedades do solo e o manejo	21
2.1.3 Relações dos atributos físicos e manejo do solo com as plantas	22
2.2 Relações edafoclimáticas do coqueiro.....	30
2.3 Ferramentas para interpretação das relações solo-clima-plantas	35
3 TRABALHOS	40
3.1 Qualidade física de três solos do Norte Fluminense avaliada a partir de amostras com estrutura reconstituída.....	40
3.2 Validação de funções de pedotransferência para atributos físicos de solos do Norte Fluminense	69
3.3 Inclusão e substituição de variáveis físicas do solo em modelos estatísticos clássicos para a reinterpretação de resultados experimentais	87
4 RESUMOS E CONCLUSÕES	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115

RESUMO

BERNARDES, Rejane Siqueira, D.Sc. – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; fevereiro, 2010. **Funções de pedotransferência e qualidade física de três solos do Norte Fluminense para a cultura do coqueiro anão.** Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

O conhecimento dos atributos do solo e de suas inter-relações é essencial à sustentabilidade dos sistemas agrícolas, subsidiando a adoção de técnicas de manejo que podem interferir no crescimento das plantas. Na literatura têm sido propostos índices para avaliar a qualidade física do solo, como o chamado intervalo hídrico ótimo (IHO), e equações que relacionam os diversos atributos físicos do solo, chamadas funções de pedotransferência (FPTs). O objetivo no presente trabalho foi avaliar a qualidade física de solos do Norte Fluminense, por meio da obtenção de modelos preditivos do comportamento do solo, da avaliação de funções de pedotransferência disponíveis na literatura e do relacionamento de diversos aspectos do desenvolvimento das plantas de coqueiro anão verde às condições a que estas estiveram submetidas. Para isso, um Argissolo Amarelo, um Cambissolo Háplico e um Neossolo Flúvico de Campos dos Goytacazes-RJ foram coletados e caracterizados quanto à densidade das partículas, granulometria e atributos químicos. Estes solos foram acondicionados em quatro níveis de compactação, sendo coletadas amostras indeformadas que foram utilizadas para determinação da densidade (ρ), porosidade total (PT), curva de retenção de água e curva de resistência à penetração. Dois destes solos, o Argissolo Amarelo e o Cambissolo Háplico, foram utilizados para a implantação de um experimento em um esquema fatorial $2 \times 4 \times 4$, sendo dois solos, quatro níveis de compactação e quatro condições hídricas, em vasos de 100 L de volume usados como unidades experimentais. A implementação dos níveis de

compactação resultou em ampla variação nos valores de densidade e porosidade do solo. Para os três solos, os valores de água disponível aumentaram consideravelmente com uma pequena elevação da compactação, e diminuíram com aplicação de densidades mais elevadas. A resistência à penetração atua como limite inferior do IHO em quase toda a faixa de ρ estudada. O índice "S" proposto por Dexter (2004a) que demonstra a degradação física do solo a partir de sua curva de retenção de água, apresentou valores decrescentes com a aplicação de níveis adicionais de compactação e mostrou ser este um indicador sensível às variações estruturais do solo. Funções de pedotransferência selecionadas foram avaliadas quanto à sua qualidade preditiva para a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (AD), porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e resistência do solo à penetração (RP). As FPTs de Pidgeon (1972), Lal (1979) e Solano (2003) apresentaram os melhores desempenhos médios nos três solos para a estimativa de θ_{CC} . Para θ_{PMP} , os destaques para os três solos foram as FPTs de Arruda et al. (1987) e Urach (2007). A FPT proposta por Saxton e Raws (2006) foi a que apresentou melhor correlação entre os valores observados e estimados de condutividade hidráulica do solo saturado para os três solos estudados. A utilização de pedofunções deve basear-se em calibrações locais ou ampliar o número de variáveis de entrada, o que, por um lado, pode tornar as FPTs mais eficientes, mas, por outro, cria mais demandas analíticas. Modelos matemáticos preditivos do comportamento/crescimento de plantas de coqueiro anão obtidos pela inclusão e/ou substituição de variáveis com alta correlação permitiram identificar relações fisicamente mais adequadas, ainda que equivalentes do ponto de vista matemático, como ocorreu, por exemplo, na substituição da densidade pela porosidade e da umidade pela água disponível. Outras variáveis que apresentam correlação mais baixa com as demais, quando acrescentadas, reduziram os resíduos estatísticos e melhoraram a qualidade preditiva dos modelos.

ABSTRACT

BERNARDES, Rejane Siqueira, D.Sc – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; february, 2010. **Pedotransfer functions and physical quality of three soils of North of Rio de Janeiro State to the cultivation of dwarf.** Advisor: Cláudio Roberto Marciano.

The knowledge of soil properties and their interrelationships is essential to the sustainability of agricultural systems, supporting the adoption of management techniques that can interfere with plant growth. In the literature have been proposed indices to assess soil physical quality, like the so-called limiting water range (LLWR), and equations relating the various physical attributes of soil, called pedotransfer functions (PTFs). The aim of this study was to evaluate the physical quality of soils of North of Rio de Janeiro State, by obtaining predictive models of soil behavior, evaluation of pedotransfer functions available in the literature and the relationship of various aspects of plant development of dwarf green conditions to which they were submitted. For this, a Yellol Argisol, a Haplic Cambisol and Fluvic Neosol the Campos dos Goytacazes-RJ were collected and characterized for particle density, particle size and chemical attributes. These soils were packed into four levels of compression, being collected undisturbed samples were taken for determination of density (ρ), porosity (TP), water retention curve and the curve of penetration resistance. Two of these soils, Yellol Argisol and a Haplic Cambisol, were used to deploy an experiment in a factorial 2 x 4 x 4, two solos, four compaction levels and four water conditions in pots of 100 L volume used as experimental units. The implementation of the compression levels resulted in wide variation in density and soil porosity. For all soils, the values of available water increased considerably with a small mound of soil compaction, and decreased with application of higher densities. The penetration resistance acts as a lower limit of

the LLWR in almost the entire range of p studied. The index "S" proposed by Dexter (2004a) demonstrates that the physical degradation of the soil from its water retention curve, were reduced by applying additional levels of compression and this proved to be a sensitive indicator for structural variations of soil. Pedotransfer functions selected were evaluated for their predictive quality for moisture at field capacity (θ_{CC}), moisture in the wilting point (θ_{PMP}), available water (AW), aeration porosity at field capacity (PA_{CC}), conductivity saturated hydraulic (Ks) and resistance to penetration (RP). The PTFs of Pidgeon (1972), Lal (1979) and Solano (2003) showed the best average performance in the three soils for the estimation of θ_{CC} . θ_{PMP} to, the highlights for the three soils were PTFs de Arruda et al. (1987) and Urach (2007). PTF proposed by Saxton and Raws (2006) showed the best correlation between the observed and predicted values of saturated hydraulic conductivity for the three soils. The use of pedofunções should be based on calibrations local or expand the number of input variables, which on the one hand, PTFs can make more efficient, but on the other, creates more demands analysis. Predictive mathematical models of the behavior / growth of dwarf plants obtained by the inclusion and/or replacement of variables with high correlation identified relationships physically more appropriate, although the equivalent mathematical point of view, as happened, for example, replacing the density by porosity and moisture by the water available. Other variables that have the lowest correlation with the other, when added, reduced waste and improved the statistical quality of predictive models.

1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola é condicionada por múltiplos fatores. Além do potencial genético das plantas, aqueles relacionados ao solo e ao clima são de decisiva influência nas variações apresentadas pela produtividade de considerável importância no resultado das culturas.

A otimização do manejo fitotécnico das culturas agrícolas passa, entre outras coisas, por uma melhor adequação dos fatores do solo. Assim, em boas condições do clima, esta adequação possibilita suprir melhor as necessidades das plantas para uma produtividade desejável.

Do ponto de vista dos atributos físicos do solo, alguns fatores, como temperatura, resistência à penetração e aeração, dependem intimamente de outras variáveis, como umidade, densidade, porosidade total e distribuição de poros por tamanho. Funções de pedotransferências (FPTs) têm sido propostas para a obtenção de variáveis de difícil determinação a partir de outras mais simples, assim como índices físicos que integrem diversos aspectos da condição física do solo têm sido avaliados quanto à sua relação com o desempenho das plantas.

O monitoramento concomitante das condições do solo e do comportamento das plantas pode dar subsídios para o conhecimento das interações que ocorrem durante o desenvolvimento da cultura, fornecendo elementos para o estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visam à otimização da produção.

Uma maneira de se obter informações que relacionam a resposta das culturas aos fatores físicos do solo que a condicionam é a imposição de tratamentos por meio de experimentos convencionais, que permitam a avaliação de efeitos isolados de um determinado fator. Outra possibilidade é a realização de

experimentos também convencionais em que dois ou mais fatores estejam dispostos em um arranjo fatorial, em que além de efeitos isolados de cada fator seja possível detectar as interações entre estes. Apesar de esta última maneira representar um ganho em possibilidades de análise em relação a anterior, o número de tratamentos possíveis de serem conduzidos torna-se, muitas vezes, limitante para a obtenção de um mais amplo conjunto de dados.

Para situações em que seja possível obter um amplo banco de dados para identificar efeitos individuais e interativos de diversos fatores sobre as variáveis-resposta, a análise multivariada passa a ser a ferramenta mais apropriada. Nesta situação trabalha-se com um grande número de medições de campo, obtidas em condições não impostas por tratamentos. Tal análise estatística pode permitir um melhor entendimento do comportamento da variável-resposta na razão direta do número de variáveis utilizadas, pois permite considerar simultaneamente a variabilidade existente nas diversas propriedades medidas.

A Região Norte Fluminense, apesar de apresentar condições edafoclimáticas favoráveis à fruticultura e, em particular, à cultura do coqueiro anão, ainda demanda estudos sobre as inter-relações solo-clima-planta, sendo estes conhecimentos essenciais para a adequação de algumas técnicas culturais, entre elas a irrigação.

A presença de água e nutrientes no solo na época e em quantidades apropriadas é essencial para o desenvolvimento e a produção da cultura do coqueiro. Sua falta ou excesso é fator limitante à produção, determinando, em muitos casos, a viabilidade ou não de seu cultivo. Além disso, devido a sua inter-relação com outros atributos físicos do solo, o conteúdo de água no solo ocupa papel central na determinação da qualidade da condição física do solo para as plantas.

No contexto acima descrito, o objetivo neste estudo foi avaliar a qualidade física de solos do Norte Fluminense por meio da obtenção de modelos preditivos do comportamento do solo e da avaliação de funções de pedotransferência disponíveis na literatura e do relacionamento de diversos aspectos do desenvolvimento das plantas de coqueiro anão verde às condições a que estas estiveram submetidas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Relação entre fatores físicos do solo, e destes com as plantas, no cultivo agrícola

Há consenso sobre as estreitas interações entre o desenvolvimento de plantas e as condições físicas do solo. Várias pesquisas revelam que as raízes parecem dispor de um mecanismo de sensibilidade a essas condições, enviando sinais à parte aérea que controlam o crescimento e expansão foliar (Masle e Passioura, 1987; Passioura e Gardner, 1990; Davies e Zhang, 1991). Essas condições físicas do solo, na zona radicular, são determinadas pela sua capacidade de aeração e de hidratação, bem como pela resistência à penetração no solo e temperatura. Entretanto, a química e a morfologia do solo, assim como os fatores climáticos e fitológicos (Hillel, 1980a; Reichardt, 1990), obviamente também devem ser levados em conta quando se pretende avaliar o potencial produtivo de um solo.

Há que se considerar ainda, que alguns desses fatores, como temperatura, resistência à penetração e aeração, dependem intimamente de outras variáveis, como umidade, densidade, porosidade total e distribuição de poros por tamanho, o que exige a compreensão de várias interações que afetam a resposta fisiológica das plantas. A condição física do solo depende, também, de como este é manejado, sendo a implementação de determinadas práticas agrícolas responsável pelos níveis de degradação que hoje se verificam. O reconhecimento da ocorrência destas interações (entre as variáveis físicas do solo, e entre estas e o manejo e as plantas) demonstra a necessidade de caracterizar adequadamente as condições de cultivo, tanto para avaliar a influência de práticas de manejo

sobre as culturas (Tormena et al., 1998), como para a escolha de um sistema adequado de produção agrícola.

2.1.1 Inter-relações entre os atributos físicos do solo

A maioria dos atributos físicos do solo depende não só das características das partículas, mas também de como estas estão arranjadas espacialmente. Nesse conjunto, Souza (2004) cita, dentre outros: (i) a densidade do solo; (ii) a porosidade total e atributos a ela associada, como macroporosidade, microporosidade e distribuição de poros por tamanho; (iii) a retenção de água e, por associação, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a capacidade de água disponível; (iv) a infiltração, a condutividade e a difusividade da água no solo, ou outro atributo relativo à dinâmica da água; (v) a porosidade de aeração e outros atributos relativos ao conteúdo e dinâmica do ar do solo, ou de um de seus componentes; (vi) a resistência mecânica do solo à penetração, ruptura, cisalhamento, compressão, entre outros; (vii) as propriedades térmicas do solo, relativas ao armazenamento e transferência de calor.

A seguir apresentam-se diversos atributos físicos cujas relações massa-volume (equações 1 a 9) são baseadas em Libardi (2000). Para a determinação da densidade do solo (ρ), embora existam diferentes metodologias a mais usual é o método do anel volumétrico, em que a densidade é o quociente entre a massa da amostra seca (MS) e o volume do anel (V_t), conforme a equação:

$$\rho = MS / V_t \quad (1)$$

A porosidade total (PT) é a relação entre o volume dos poros (V_p) e o volume do solo (V_t), e poderia ser calculada pela equação:

$$PT = V_p / V_t \quad (2)$$

Tendo em vista as dificuldades envolvidas na mensuração do volume de poros, a porosidade total é usualmente estimada aplicando-se a equação a seguir:

$$PT = 1 - \rho / \rho_s \quad (3)$$

onde ρ_s é a densidade de partículas, determinada pelos métodos descritos segundo a Embrapa, 1997b.

Outro atributo físico muito frequentemente relacionado ao desenvolvimento de plantas é a umidade (ou teor de água no solo). Inúmeras variações metodológicas são utilizadas para sua determinação, mas todas tentam relacionar a quantidade de água à de solo. Assim, a umidade gravimétrica (U) é aquela em que esta relação é estabelecida em termos de massa, enquanto a umidade volumétrica (θ) em termos de volume. As respectivas equações podem ser assim formuladas:

$$U = m_a / m_s \quad (4)$$

e

$$\theta = V_a / V_t \quad (5)$$

onde m_a é a massa de água, m_s é a massa de solo, V_a é o volume de água e V_t é o volume do solo.

Da combinação destas equações com as que definem a densidade da água e do solo, obtém-se:

$$\theta = U \cdot \rho / \rho_a \quad (6)$$

e

$$U = \theta \cdot \rho_a / \rho \quad (7)$$

onde ρ_a é a densidade da água.

Se chamarmos o quociente ρ / ρ_a de densidade relativa do solo (ρ_{rel}), estas equações podem ser reescritas, respectivamente como:

$$\theta = U \cdot \rho_{rel} \quad (8)$$

e

$$U = \theta / \rho_{rel} \quad (9)$$

A energia de retenção da água no solo é avaliada a partir do conceito de potencial, que nada mais é do que a energia potencial da água por unidade de seu volume. Os principais fatores que influenciam este potencial são as forças de coesão-adesão, a concentração de íons, a pressão e a gravidade. A partir desse conceito, o potencial total da água (ϕ_t) pode ser dividido em diversos componentes individuais: gravitacional (ϕ_g), de pressão (ϕ_p), osmótico (ϕ_{os}), mátrico (ϕ_m) etc (Taiz e Zeiger, 2004).

O componente gravitacional é representado pela pressão exercida por uma coluna de água com altura correspondente à distância vertical entre o ponto em questão e a referência gravitacional, podendo ser medido com uma escala métrica. O potencial de pressão resulta da carga hidráulica efetiva no ponto em questão (distância vertical entre este ponto e a superfície da água livre), podendo também ser medido, em um piezômetro, com uma escala métrica (Libardi, 2000).

O componente osmótico representa a diferença entre a concentração salina da solução do solo e a da água livre (ou padrão). Como, em geral, se estabelece que a água padrão tenha concentração salina igual a da solução do solo, e que esta solução tem concentração uniforme ao longo do solo, a importância deste componente se restringe a situações em que os pontos considerados estão separados por uma membrana semipermeável (por exemplo, a água no solo e a água no citoplasma da célula radicular). Sua medição é mais difícil, devendo-se utilizar equipamentos que associem membrana semipermeável e medidor de pressão (Reichardt, 1990).

O componente mátrico ocorre no solo não saturado, sendo resultante da interação da água com a matriz, a qual leva a formação de superfícies côncavas de dimensões capilares que reduzem a pressão sua interna da água. O tensiômetro é o equipamento mais tradicional para a medição do potencial mátrico. Este instrumento mede, na verdade, o potencial total (excluído o potencial osmótico), e o potencial mátrico é obtido por diferença (Libardi, 2000).

O componente mátrico é função da umidade do solo, sendo negativo para o solo não saturado e zero na saturação. Para valores de umidade relativamente altos (solos úmidos), a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial mátrico. Por isso, nestas condições, o arranjo poroso determinado pela estrutura, textura, natureza das partículas, entre outras, é de enorme importância. A compactação, por exemplo, afeta o arranjo poroso, interferindo no valor de

potencial mátrico. Para valores de umidade relativamente baixos (solos secos), a água apresenta-se sob a forma de filmes, cobrindo as partículas de solo e o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância. Nesta condição, a adsorção superficial é importantíssima (Reichardt, 1990).

Van Genuchten (1980) apresentou uma equação com coeficientes estimados pelo uso de programas de otimização de funções não-lineares pelo método de quadrados mínimos, a qual descreve a relação entre o potencial mátrico e a umidade, como segue:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha\phi_m|^n\right)^m} \quad (10)$$

onde θ_r é a umidade volumétrica residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s é a umidade volumétrica de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ϕ_m é o potencial mátrico (m); α (m^{-1}), n e m são coeficientes independentes que devem ser estimados por meio de ajustes aos dados observados.

Vários atributos têm sido utilizados para avaliar a qualidade física do solo, no entanto, a caracterização dos efeitos dos sistemas de manejo sobre a degradação e qualidade física do solo é melhor quantificada quanto mais integradores forem seus parâmetros determinados (Araújo et al., 2004). O índice “S” introduzido no Brasil por Silva (2004) a partir dos trabalhos de Dexter (2004 a, b, c), calculado a partir da curva de retenção de água, também apresenta importante contribuição para os estudos da qualidade do solo, principalmente pelo grande potencial para ser usado em avaliações da interação entre o manejo e a física do solo e ser facilmente medido. No cálculo do índice “S” o foco principal está na inclinação da curva de retenção da água do solo no ponto de inflexão. Isto pode ser medido diretamente através da curva retenção, entretanto, é mais conveniente ajustar a curva de retenção a uma função matemática e então calcular a inclinação no seu ponto de inflexão em termos dos coeficientes obtidos na equação de Van Genuchten (1980). A análise das curvas de retenção de água na literatura sugere que a degradação física do solo sempre conduz a uma mudança no formato das curvas. Uma pequena inclinação indica um solo desestruturado, enquanto uma elevada inclinação indica um solo estruturado e que possui muitos poros (Dexter, 2004a).

A umidade exerce influência sobre as condições físicas do solo para o crescimento das plantas, decorrente não só de sua relação com potencial da água, mas também com as propriedades térmicas, com a difusão de gases, com a resistência mecânica e com a própria dinâmica da água (Letey, 1985). Tais relações são bem documentadas, como é demonstrado a seguir.

Pelo menos em um domínio limitado de conteúdo de água no solo a condutividade hidráulica (K) é normalmente relacionada com a umidade por meio de uma equação do tipo exponencial:

$$K(\theta) = K^* \cdot e^{\gamma\theta} \quad (11)$$

onde γ e K^* são coeficientes de ajuste, sendo γ uma constante adimensional e K^* o valor da condutividade hidráulica quando o teor de água no solo equivale a zero (portanto, sem significado físico). Essa equação também pode ser escrita como:

$$K(\theta) = K_s \cdot e^{\gamma(\theta_s - \theta)} \quad (12)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (este sim, com um importante significado físico).

Bernardes et al. (2006) verificaram que embora alguns aspectos dos perfis de solo sejam evidentemente preponderantes (granulometria, descontinuidade litológica, camada adensada e/ou compactada), é difícil estabelecer relações de dependência universais entre a condutividade hidráulica e outros atributos físicos ou morfológicos do solo.

Entre os diversos métodos sugeridos na literatura, Van Genuchten (1980) propõe a utilização de um modelo para a obtenção da função condutividade hidráulica a partir da curva de retenção de água, combinando a equação que descreve a umidade do solo em função de seu potencial matricial com o modelo de Mualem (1976). Considerando $m = 1 - 1/n$, deduziu:

$$K(\theta) = K_s \omega^\lambda \left[1 - (1 - \omega^{1/m})^m \right]^2 \quad (13)$$

sendo que:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (14)$$

onde ω é a saturação efetiva, K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado, e ℓ é um parâmetro empírico estimado por Mualem (1976) em 0,5 para a maioria dos solos.

A resistência mecânica do solo decresce rapidamente com o aumento da umidade e com a diminuição da densidade. Quanto à resistência à penetração (RP), esta relação é normalmente descrita pelo modelo proposto por Busscher (1990):

$$RP = a \rho^b \theta^c \quad (15)$$

onde a, b e c são constantes do ajuste. A resistência ao cisalhamento e à compressão, entre outros, são também diretamente relacionados à resistência mecânica do solo.

A dependência entre RP e o teor de água e densidade do solo faz com que tais resultados possam ser corretamente interpretados somente a partir do monitoramento concomitante destes atributos (Cassel et al., 1978). Além disso, os penetrômetros utilizados no campo apresentam problemas operacionais relacionados com a dificuldade em manter uma velocidade de penetração constante (Camargo, 1983) e com a variação do teor de água nas diversas camadas do solo (Chancellor, 1977).

A aeração do solo é o processo de troca dos gases consumidos e produzidos abaixo da superfície do solo com os gases da atmosfera (Gavande, 1972). A respiração aeróbica do sistema radicular das plantas e dos meso e microrganismos do solo levam a diferenças significativas entre a composição do ar atmosférico e a do solo. Estabelece-se, então, um gradiente de pressão parcial desses gases, sendo este a causa dos fluxos. O ar do solo apresenta, comparativamente ao atmosférico, teores mais baixos de oxigênio e mais elevados de CO₂ e vapor d'água. Para o CO₂ o sentido do fluxo é do solo para a atmosfera, pois enquanto neste último a sua concentração é de 0,03%, no ar do solo pode chegar a 1% e, em casos extremos, até 3%. Para o O₂ o sentido do fluxo é inverso, pois enquanto na atmosfera a concentração é de 22%, no ar do solo o teor pode decrescer a 10% ou menos.

As propriedades térmicas também se relacionam estreitamente com a umidade do solo (Gavande, 1972). Entre estas propriedades, pode-se mencionar a temperatura, a capacidade, a condutividade e difusividade térmica dos solos.

A temperatura do solo varia segundo a época do ano, a hora do dia e a profundidade. A variação da temperatura de um dado solo e a quantidade de calor transferida através de uma dada massa de solo pode ser calculada por meio dos coeficientes de transferência de calor e do gradiente de temperatura. No caso da variação de temperatura, a difusividade térmica é de interesse. No caso da transferência de calor, deve-se conhecer a condutividade térmica. Os dois coeficientes estão relacionados e um deles pode ser calculado a base do outro, conhecendo-se também os calores específicos, a densidade e as quantidades dos componentes do solo (Gavande, 1972).

A influência da umidade nos vários componentes de calor foi demonstrado por Kohnke (1968), citado por Gavande (1972), onde o aumento da umidade a 10% ocasionou aumento da difusividade térmica a $0,011 \text{ cm}^2/\text{s}$, depois decresceu linearmente. Quanto à condutividade térmica, o aumento da umidade de saturação ocasionou um aumento linear da mesma, chegando a $0,8 \text{ cal/cm}^3$ em 100% de umidade. E o aumento da umidade ocasionou um aumento exponencial da condutividade térmica.

Alguns autores propõem equações para predição do conteúdo de água retida pelo solo nos potenciais equivalentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, assim como para a água disponível, a condutividade hidráulica e a resistência do solo à penetração (Oliveira et al., 2002). Funções de pedotransferência ou modelos de regressões que transferem propriedades conhecidas do solo para propriedades do solo desconhecidas, com as vantagens de maior facilidade de obtenção e redução de custos, podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do solo em sistemas de manejo (Gregorich, 2006).

Segundo Scheinost et al. (1997), a textura e a matéria orgânica são os principais fatores que afetam a retenção de água no solo.

As propriedades de retenção de água são requeridas em modelos de simulação de fluxos de água e transporte de solutos, bem como muito usados em várias estratégias de manejo de água no solo. Entretanto, o uso de modelos de simulação de sistemas agrícolas tem sido limitado pela falta de informações de propriedades hidráulicas. A estimativa dos valores para essas propriedades, pelo

uso de equações empíricas ou estatísticas, ou seja, das funções de pedotransferência, pode ser uma alternativa viável, rápida e econômica (Hillel, 1998).

2.1.2 Relações entre as propriedades do solo e o manejo

A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa um desequilíbrio no ecossistema, modificando as propriedades do solo, cuja intensidade varia com as condições de clima, uso e manejos adotados e a natureza do solo (Godefroy e Jacquin, 1975). O uso intensivo dos solos geralmente favorece a deterioração de suas propriedades físicas (Coote e Ramsey, 1983), sendo esta consideravelmente variável em função da umidade (Medeiros, 2004), da textura (De Maria et al., 1999; Stone e Silveira, 2001), dos teores de matéria orgânica (Curtis e Post, 1964) e da frequência de cultivo do solo (Beutler et al., 2001; Hajabbasi et al., 1997). Segundo Kondo e Dias Júnior (1999), um dos grandes entraves à mecanização intensiva de um solo refere-se à sua susceptibilidade à compactação, que se torna crítica em condições de umidade elevada.

A degradação do solo é evidenciada principalmente pela redução dos teores de matéria orgânica e pela compactação. Compactação é o processo pelo qual ocorre aproximação entre as partículas do solo, passando estas a ocupar um volume menor do que ocupavam originalmente, o que ocorre em resposta à aplicação de uma carga externa (Peçanha, 2007). Embora as consequências mais diretas desse processo sejam o aumento da densidade e a diminuição da porosidade do solo (Fernandes, 1982), outras também podem ser citadas, como: diminuição da infiltração e da condutividade hidráulica do solo saturado; aumento da condutividade hidráulica do solo não saturado; alteração da curva de retenção de água no solo; aumento da resistência mecânica do solo à penetração, redução da aeração do solo; entre outros (Tormena e Roloff, 1996; De Maria et al., 1999; Rosolem et al., 1999; Beutler et al., 2001; Oliveira et al., 2001).

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo em seus atributos físicos são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter e Youngs, 1992). De acordo com Sanchez (1981), avaliações das modificações no solo decorrentes do cultivo deveriam ser feitas submetendo um solo sob vegetação natural às explorações agrícolas desejadas e analisando suas propriedades periodicamente.

Em solos compactados, a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes (RP), comumente, são limitantes ao desenvolvimento das plantas, mesmo havendo água disponível (Klein e Libardi, 2000).

Segundo Borges et al. (1999), o incremento da compactação acarreta o aumento da umidade do solo e a redução da porosidade de aeração, que podem alterar o suprimento de oxigênio e a disponibilidade de nutrientes e aumentar o nível de elementos tóxicos às plantas e aos microrganismos. Por sua vez, o aumento da compactação do solo aumenta a resistência à penetração, acarretando situações em que, mesmo havendo água disponível às plantas, o sistema radicular cessa o crescimento, afetando o desenvolvimento das plantas e sua produção.

2.1.3 Relações dos atributos físicos e manejo do solo com as plantas

O ambiente físico do solo ao redor das raízes é caracterizado pela aeração, temperatura, umidade e resistência mecânica, sendo todas essas propriedades físicas do solo modificadas, em grau variável, pela compactação do solo (Boone e Veen, 1994). Usando o crescimento de plantas como referência, Letey (1985) classifica os atributos físicos do solo em dois grupos: os que afetam diretamente e os que afetam indiretamente esse crescimento. Segundo Letey (1985), no primeiro grupo estariam inclusas a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura e a resistência mecânica, enquanto os demais atributos físicos estariam no segundo grupo. Num segundo momento de seu trabalho, após a constatação da interdependência entre os atributos do solo e, especialmente, da dependência de todos em relação à umidade do solo, Letey (1985) propõe a definição de uma faixa de umidade não limitante ao crescimento das plantas (NLWR – non limiting water range).

Os níveis críticos de resistência do solo à penetração para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada (Taylor et al., 1966). Num Latossolo Roxo, Petter (1990) verificou que a resistência de 2800 kPa foi limitante ao crescimento radicular da cultura da soja. Taylor e Gardner (1963), Taylor et al. (1966) e Nesmith (1987) adotaram o valor de 2000 kPa como o limite crítico de resistência para a penetração das raízes. Segundo Unger e Kaspar (1994), após fazer uma revisão de vários trabalhos sobre compactação do solo e crescimento de raiz, sugeriram o limite de 3000 kPa como limitante ao crescimento

radicular das culturas. Souza (2004) também assumiu este último valor como crítico em relação à resistência à penetração.

Gill e Bolt (1955) encontraram que plantas cultivadas, em sua maioria, possuem raízes capazes de exercer pressões axiais entre 700 e 2500 kPa e pressões radiais de 400 a 700 kPa. A eficiência da penetração de raízes em solos compactados depende tanto da espécie vegetal quanto do tipo de sistema radicular. Embora haja espécies pivotantes bastante eficientes na penetração em camadas compactadas, raízes fasciculadas finas geralmente são mais eficientes na penetração de solos com alta densidade do solo que raízes pivotantes de grande diâmetro.

A penetração de raízes em solos compactados pode ocorrer sempre que o diâmetro dos poros for maior que o diâmetro das raízes, ou menor, se esses não se apresentarem rígidos (Grohmann e Queiroz Neto, 1966). Estudos sobre a influência do tamanho e rigidez dos poros na penetração de raízes foram também realizados por Aubertin e Kardos (1965a, 1965b) com plantas de milho. O tamanho dos poros neste estudo variava de 36 a 412 μm . Quando o solo não era compactado, as raízes cresciam igualmente bem, tanto nos poros de 36 μm quanto nos de 412 μm . Quando houve certa compactação, verificou-se que poros com diâmetro abaixo de 138 μm já afetavam o crescimento de raízes.

Para um adequado manejo agrícola do solo as limitações na aeração devem ser consideradas quando se define o limite superior de umidade, pois elas podem prejudicar o desenvolvimento das plantas. Jong van Lier (2001) verificou que a porosidade total do solo, a profundidade do solo a ser aerada (profundidade do sistema radicular) e o nível de consumo de oxigênio influem significativamente na porosidade de aeração mínima necessária para uma oxigenação completa do sistema radicular. A influência destes fatores, conjuntamente com variações nas características de drenagem, determina o tempo que o sistema radicular fica exposto a uma oxigenação deficiente.

Os efeitos da compactação na aeração do solo podem ser avaliados por meio da análise da ocorrência de macroporos, fator para o qual valores críticos são frequentemente estabelecidos na literatura. Em geral, considera-se que 0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ representa uma boa porosidade de aeração e que valores abaixo de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ indicam aeração deficiente (Da Ros et al., 1997).

Jong van Lier (2001), equacionando o processo da oxigenação do solo, estimou a porosidade de aeração mínima necessária para que nenhuma parte do sistema radicular sofra falta de oxigênio por meio da equação:

$$\beta_{\min} = \left(\frac{C_{O_2} z_e^2 \alpha^2}{2[O_2]_{atm} D_{O_2}} \right)^{1/p} \quad (16)$$

onde β_{\min} é a porosidade de aeração mínima necessária para que nenhuma parte do sistema radicular sofra falta de oxigênio, C_{O_2} é o consumo biológico de O_2 , z_e é uma profundidade imediatamente abaixo do sistema radicular, α é a porosidade total do solo, $[O_2]_{atm}$ é a concentração de O_2 na atmosfera, D_{O_2} é a difusividade do ar em relação ao fluxo de oxigênio e p é um expoente cujo valor depende do solo.

Jong van Lier (2001), testando os valores 1, 10/3 e 6 para o expoente p , verificou que 10/3 resultou em valores de porosidade de aeração mínima frequentemente citados na literatura (0,10 a 0,12 $m^3 m^{-3}$). O autor destacou, no entanto, que para sistemas radiculares mais profundos e/ou com alto consumo de O_2 esta porosidade de aeração pode ser insuficiente. Por outro lado, para sistemas radiculares menos profundos e/ou com menor demanda de O_2 , estes valores poderiam ser bem mais baixos (da ordem de 0,05 $m^3 m^{-3}$).

Tentando estabelecer as taxas de difusão de oxigênio no solo para várias culturas, Winter e Simonson (1978) observaram que as culturas possuem exigências diferentes entre si, mas, de modo geral, aceita-se que uma taxa de difusão de oxigênio da ordem de 20 $10^{-8} g cm^{-3} min^{-1}$ seja adequada. Abaixo deste valor não ocorre crescimento normal de raízes.

A deficiência na aeração do solo, segundo Camargo (1983), favorece diretamente a formação de substâncias tóxicas aos vegetais (nitrito, ácido sulfídrico, etileno, Fe^{+2} etc.), a alteração do pH e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Como essa aeração é muito dependente da porosidade do solo, a compactação, ao alterá-la, modifica também o ambiente próximo das raízes (Reichardt, 1975).

Com a compactação do solo, o CO₂ se acumula e a raiz sofre seu efeito desfavorável. Por falta de oxigênio em solos anaeróbios, as plantas aumentam a respiração fermentativa e produzem pouca energia, acelerando o processo de respiração de modo a mobilizar mais energia. O gasto de produtos fotossintetizados é elevado e o desenvolvimento vegetal é reduzido. Por ter poucos produtos fotossintetizados a metabolizar, todos os processos de síntese tornam-se lentos, chegando-se, raramente, à formação de proteínas e carboidratos mais complexos, promovendo, assim, a diminuição no desenvolvimento do vegetal (Primavesi, 1984).

A aeração é indispensável para a absorção ativa de água, pois, caso contrário, não haveria oxigênio para uma respiração radicular normal, faltaria energia (ATP) para a absorção de minerais e, conseqüentemente, para a absorção osmótica de água. A absorção passiva de água se relaciona, também, com o metabolismo ativo das raízes. As raízes bem aeradas parecem ser mais permeáveis que as raízes pouco aeradas, afetando a absorção de água (Taiz e Zeiger, 2004).

Em condições de ausência de oxigênio, as raízes da maioria das plantas diminuem a acumulação de sais em suas células praticamente a zero. Este efeito foi descoberto por Labanauskas et al. (1965), citados por Gavande (1972), que encontraram que as quantidades de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, B e Fe nas raízes de plântulas de citros (*Citrus sinensis* var. Bessie) decresceram com a diminuição do teor de oxigênio na atmosfera do solo. Uma possível explicação para isso seria que o baixo nível de oxigênio no ar do solo afeta a permeabilidade da membrana celular. Outra explicação seria o efeito de um decréscimo da atividade fisiológica das células da raiz. As concentrações de N, P e K aumentam quando a concentração de O₂ no solo aumenta de 4% a 20%; no entanto, o Na se acumula em concentrações muito altas à medida que o nível de oxigênio diminui.

A presença de oxigênio no solo produz a oxidação de seus componentes, com efeitos nas condições físicas e na composição química. Em condições anaeróbicas, muitos constituintes do solo se encontram em estado reduzido, o que pode interferir diretamente na atividade biológica, e se manifestam ao apresentarem-se condições químicas não favoráveis para o crescimento da maioria das plantas superiores. A decomposição completa de substâncias orgânicas no solo, a oxidação de sais de amônio (N – NH₄⁺) a nitritos (N – NO₂⁻) e

estes a nitratos ($N - NO_3^-$), a oxidação do enxofre e compostos de enxofre a sulfatos, a oxidação de hidrogênio, metano e outras substâncias produzidas por oxidação incompleta ou redução, são exemplos importantes de oxidação no solo. Estes processos de oxidação são, em geral, benéficos ao solo. Por outro lado, os processos de redução são, ao menos em parte, danosos para o desenvolvimento das plantas (Gavande, 1972).

A capacidade de campo representa a umidade máxima do solo para qual a perda de água por drenagem é pequena. É chamada de “limite superior de disponibilidade de água”, pois, se o solo estiver com teores de água elevados, esta água, embora disponível, não o é por muito tempo. Pela própria definição, não se pode pensar em valores da capacidade de campo de um solo sem se especificar para que e como o seu valor foi determinado. Muitos pesquisadores têm utilizado, como capacidade de campo, a umidade retida a 33 kPa, 10 kPa ou 6 kPa de sucção (Silva e Ribeiro, 1997; Tormena et al., 1998).

O ponto de murcha permanente equivale à umidade do solo na qual a planta não consegue manter o fluxo xilemático em um nível mínimo para sua subsistência. Isso ocorre pela combinação da redução tanto do potencial da água quanto da condutividade hidráulica do solo. Tradicionalmente, adota-se o valor de umidade correspondente à tensão de 1500 kPa, uma vez que nessa porção da curva de retenção de água, grandes variações na tensão resultam em mudanças pouco expressivas na umidade. A importância do ponto de murcha permanente é menor do que a capacidade de campo por estar fora da faixa de umidade que ocorre, normalmente, os solos agrícolas e o seu valor é utilizado apenas para caracterizar o solo em termos da sua capacidade de água disponível (Jong van Lier, 2000).

Nem toda a água disponível, retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, pode ser igualmente utilizada pelas plantas, pelas seguintes razões: (i) à medida que o solo perde água, a tensão aumenta, exigindo um maior gasto de energia das raízes para absorção dos nutrientes e, conseqüentemente, da água; e (ii) quanto mais seco o solo, menor a condutividade hidráulica e a movimentação da água em direção às raízes (Kiehl, 1979).

Assim, um conceito utilizado por Rachwal e Dedeczek (1996) tem apresentado uma visão macroscópica do sistema em estudo, em que se define

umidade crítica como aquela imediatamente abaixo da qual a planta inicia o fechamento de estômatos e determina o limite inferior da água facilmente disponível. A umidade crítica pode ser determinada em experimentos, monitorando a umidade do solo e a transpiração, comparando-a com a transpiração na condição de água suficiente (Veihmeyer e Hendrickson, 1955; Thornthwaite e Mather, 1955; Dourado Neto e Jong van Lier, 1993).

Portanto, em situações em que a condutividade hidráulica do solo é baixa, a quantidade de água que chega às raízes pode não ser suficiente para que a planta tenha sua demanda atendida, levando-a ao murchamento (Hausenbuiller, 1978). Por outro lado, a eficiência da planta na absorção da água do solo também é função do tamanho e da distribuição espacial de seu sistema radicular. Quando há uma maior densidade de raízes no solo, diminui a distância média que a água precisa se movimentar para chegar às raízes, aumentando o tempo entre eventuais murchamentos.

Verifica-se que a disponibilidade de água às plantas é resultado de processos dinâmicos, envolvendo fluxos de água para baixo do perfil enraizado (drenagem) e em direção a raízes (extração). Assim, o estabelecimento de um valor crítico de condutividade hidráulica, associado a um potencial mátrico ou a uma umidade, seria o melhor indicador da qualidade físico-hídrica de um solo, por relacionar-se mais diretamente com o movimento de água no solo (Jong van Lier, 2000).

Quando o déficit de água no solo é prolongado, quase sempre o crescimento radicular é reduzido, sendo acompanhado tanto pelo desenvolvimento da exoderme próxima ao ápice quanto pela morte das células epidérmicas, resultando em aumento no grau de suberização da raiz e restringindo a perda de água da planta para o solo. Alterações estruturais na raiz em resposta à seca são permanentes, e o restabelecimento do crescimento, após a reidratação, usualmente envolve a formação de novas raízes laterais (Stasovski e Peterson, 1993).

O estresse hídrico diminui a fotossíntese e o consumo de fotoassimilados nas folhas. No entanto, a relativa insensibilidade da translocação à seca permite que a planta mobilize e use as reservas quando são necessárias (por exemplo, no enchimento do grão), mesmo quando o estresse é muito severo. A translocação

contínua de carbono parece ser um fator-chave em quase todos os aspectos de resistência à seca (Taiz e Zeiger, 1998).

Em relação à faixa de umidade não limitante sugerida por Letey (1985), alguns autores (Silva et al., 1994; Silva e Kay, 1997a; Silva e Kay, 1997b) sugeriram que passasse a ser chamada de LLWR (least limiting water range). Embora a expressão signifique, em português, “faixa de água menos limitante”, a partir do trabalho de Tormena et al. (1998) tem sido utilizado o termo intervalo hídrico ótimo (IHO).

O IHO integraliza, em um único parâmetro, os efeitos da disponibilidade de água, da resistência do solo à penetração (RP) e da porosidade de aeração (α_{ar}) sobre o crescimento das plantas. Definido como a amplitude de umidade do solo em que esses fatores não são limitantes, o IHO tem sido considerado um bom indicador da qualidade física do solo (Klein, 1998; Araújo et al., 2003).

Silva et al. (1994), além de discutir a questão semântica, buscaram viabilizar a determinação do IHO, adotando valores críticos para a resistência mecânica, porosidade de aeração e energia de água. Para determinação do IHO, esses autores propõem a retirada, em anéis volumétricos, de amostras indeformadas de solo, sendo estas levadas ao laboratório para determinação da curva de retenção da água e da curva de resistência à penetração, a primeira, obtida em função da tensão da água e da densidade do solo, e a segunda, da densidade do solo e do conteúdo de água.

Os valores do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) são obtidos através na curva de retenção, enquanto que o conteúdo de água referente ao limite crítico superior da resistência à penetração no solo (θ_{RP}) é determinado a partir da curva de resistência à penetração. O limite superior de umidade para que não haja problemas de aeração (θ_{PA}) é adotado por alguns pesquisadores como sendo uma porosidade de aeração mínima aceitável de 10%. Com esses resultados, são definidas curvas de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{RP} e θ_{PA} em função da densidade do solo (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998). O IHO é, então, calculado pela diferença entre um limite superior e inferior de umidade:

$$\text{IHO} = \text{mín} (\theta_{CC}, \theta_{PA}) - \text{máx} (\theta_{PMP}, \theta_{RP}) \quad (17)$$

onde mín (θ_{CC} , θ_{PA}) é o menor valor do conteúdo de água, comparando-se θ_{CC} e θ_{PA} , e máx (θ_{PMP} , θ_{RP}) é o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} .

Vale ressaltar que, segundo Silva et al. (1994), um solo com boas qualidades físicas, ou seja, com condições adequadas de ar e água e sem limitações quanto à penetração das raízes, tem seu IHO amplo e coincidindo com a água disponível (AD) quando o limite superior do IHO é a θ_{CC} e o inferior é a θ_{PMP} . Para solos compactados, θ_{PA} assume certa importância como o limite superior do IHO, enquanto θ_{RP} passa a ser predominante como limite inferior (Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2001). Por ser abrangente, o IHO pode ser utilizado para avaliar os efeitos de sistemas de uso e manejo em modificações na qualidade física do solo, a exemplo de Betz et al. (1999), Tormena et al. (1999), Benjamin et al. (2003) e Lapen et al. (2004).

A degradação da estrutura do solo resulta em redução do IHO, a qual aumenta a probabilidade de as raízes das culturas serem expostas à ocorrência de limitações físicas (Letey, 1985; Kay, 1989). Os resultados obtidos por Silva e Kay (1996) e, mais recentemente, por Lapen et al. (2004), confirmam esta hipótese. Araújo et al. (2004) e Leão et al. (2004) verificaram que o IHO foi eficaz na identificação dos solos cujos atributos físicos encontravam-se mais preservados, permitindo avaliar o impacto no solo e nas plantas de diferentes formas de manejo.

Klein e Libardi (2000) observaram, em Latossolo Roxo, que θ_{CC} foi o fator que mais determinou o limite superior do IHO, tanto sob mata como sob cultivo de sequeiro. As exceções restringem-se às amostras mais compactadas, onde θ_{PA} foi o que determinou este limite. Em condições de mata somente o fator θ_{PMP} foi observado como limite inferior do IHO (não havendo resistência à penetração crítica, assumida como igual ou maior que 2 MPa). Para o sequeiro este fator foi observado como limitante apenas quando a densidade do solo é baixa (inferior a $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$), enquanto para densidades acima desse valor θ_{RP} passou a ser o limite inferior do IHO. Estes autores concluíram que θ_{PA} e θ_{RP} são as propriedades que mais variam com as mudanças de densidade do solo.

Souza (2004), estudando três solos sob plantio de coqueiro anão, verificou que no Neossolo Quartzarênico nem aeração, nem resistência à penetração atingem níveis críticos ao desenvolvimento do sistema radicular. Nos demais solos, a resistência à penetração foi o atributo que mais contribuiu para a

ocorrência de condições críticas ao desenvolvimento do sistema radicular, sendo que 65% das amostras do Cambissolo argilo-siltoso e 100% das amostras do Argissolo Amarelo coeso apresentaram RP maior que 3 MPa em unidades acima do PMP. Porosidade de aeração menor que 10% foi verificada apenas para o Cambissolo, em 45,5% das amostras.

Avaliada por Beutler et al. (2004), a produtividade do arroz de sequeiro num Latossolo Vermelho de textura média reduziu após 70 dias desde a semeadura, uma vez que o IHO variou negativamente com decréscimo linear a partir da densidade de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ até o valor zero denominado de densidade do solo crítica (Dsc), valor este a partir do qual as condições ao desenvolvimento radicular são acentuadamente restritivas. A Dsc obtida no IHO foi de $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$, valor de Ds a partir do qual o crescimento radicular é restringido tanto pela excessiva RP do solo, quanto pelo conteúdo de água do solo corresponder à capacidade de campo.

Silva (2003), em um Latossolo Vermelho, verificou que a cultura do feijão, em preparo reduzido do solo, permaneceu três dias a mais no IHO, comparado ao preparo convencional e plantio direto, contudo não proporcionou incrementos na produtividade.

Os efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação, a qualidade física do solo e sobre as plantas é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações, como o IHO. O desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem a influência de fatores do solo, da planta e da atmosfera sobre a produtividade vegetal parece ser um caminho mais promissor ao se pensar em índices de qualidade físico-hídrica do solo (Jong van Lier, 2000).

2.2 Relações edafoclimáticas do coqueiro anão

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) pertence à família Palmae, uma das mais importantes famílias da classe monocotiledônea. A folha do coqueiro é do tipo penada, sendo constituída pelo pecíolo, que continua pela ráquis, onde se prendem numerosos folíolos (Leite e Encarnação, 2002).

Os efeitos do clima são evidentes em todo o ciclo da cultura, entretanto, estes efeitos dependem do estágio de desenvolvimento da planta quando outros fatores externos, tais como solo, manejo, pragas e doenças, não são limitantes (Peiris et al., 1995).

Por ser uma planta bastante exigente em luz, o coqueiro não se desenvolve bem em locais de baixa luminosidade. Insolação de 2.000 horas por ano, com

mínimo de 120 horas mensais, é considerada ideal para o pleno desenvolvimento vegetativo e máximo potencial produtivo. A umidade atmosférica adequada situa-se entre 80 a 90%. Locais com clima quente e umidade muito elevada também não são favoráveis para o desenvolvimento do coqueiro, pois esta umidade atmosférica elevada reduz a transpiração e absorção de nutrientes, favorece o desenvolvimento de pragas e doenças na cultura e provoca a queda dos frutos. O vento é um agente importante para esta cultura, pois atua na disseminação do pólen e fecundação das flores femininas. No entanto, sob déficit hídrico, os ventos fortes são prejudiciais para a cultura, pois propiciam excessiva evapotranspiração (Embrapa, 2003).

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos. Desempenha a função de solvente, por meio do qual gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se na planta. Tem, ainda, papel importante na regulação térmica da planta, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição do calor (Norman e Nepomuceno, 1994).

A eficiência do uso da água relaciona a produção de biomassa ou produção comercial pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada. Em agricultura irrigada, a elevação e a determinação dos níveis da eficiência do uso da água são bastante complexas e requerem conhecimentos e considerações interdisciplinares. Dinar (1993), todavia, menciona que existem meios para se elevar os valores de eficiência do uso da água, destacando-se o manejo adequado de irrigação.

A distribuição da água e a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante todo o ciclo da cultura reduzem as perdas de água por drenagem e os períodos de estresse hídrico da cultura, o que aumenta a eficiência do uso da água. Isto pode ser atingido com aplicações de água com maior frequência e em pequenas quantidades (Lin et al., 1983; Srinivas et al., 1989; Mishra et al., 1995; Andrade Júnior et al., 1997; Saeed e El-Nadi, 1997; Sousa et al., 1998).

Posse (2005), estudando as variáveis fisiológicas, climáticas e suas associações, bem como avaliando a influência do déficit hídrico nas respostas fisiológicas do coqueiro anão verde (*Cocos nucifera* L.), com idade média de seis anos, irrigados diariamente por microaspersores, observou uma redução significativa na fotossíntese após dois dias do início do tratamento com déficit hídrico. Entretanto, as plantas de coqueiro sob deficiência hídrica conseguiram

recuperar sua taxa de assimilação de CO₂ (fotossíntese) um dia após ter ocorrido uma precipitação, o que ocorreu também com o potencial hídrico foliar. Assim, concluiu que a fotossíntese foi mais sensível ao déficit hídrico do que a transpiração medida pelo fluxo de seiva, uma vez que, no período em estudo, não foi possível identificar o efeito do déficit hídrico na condutância estomática, na transpiração e no DPV folha-ar.

O solo armazena a água que será absorvida e utilizada pela planta, o que ocorrerá de acordo com o estágio fisiológico e os fatores ambientais externos. A energia da atmosfera induz a evaporação da água contida no solo e a transpiração das plantas. Em solos arenosos a coluna de água presente no sistema de capilares é quebrada mesmo sob pequenas tensões, fazendo com que a movimentação da água no solo sofra grandes resistências e o suprimento de água à planta seja interrompido. Quando a umidade do solo se torna limitante, a transpiração e a absorção de CO₂ são inibidos pelo fechamento estomático (Larcher, 2000).

O estudo das relações hídricas no coqueiro é de grande importância, uma vez que pequenos declínios na disponibilidade de água podem alterar o desenvolvimento da planta, prejudicando, assim, a produtividade. O déficit hídrico na planta tem efeito sobre a evapotranspiração e o rendimento da cultura (Doorenbos e Kassam, 1994).

Devido sua alta taxa de transpiração, o coqueiro anão consome mais água que as outras variedades, sendo, em condições edafoclimáticas semelhantes, o primeiro a apresentar os sintomas de deficiência hídrica (IRHO, 1992). Por isso, o uso de uma irrigação mal planejada ou manejada incorretamente pode levar o coqueiro a baixas produtividades, atraso de até três anos na entrada de produção e qualidade inadequada dos frutos (Agrianual, 2000).

Peçanha (2007), em um experimento com 4 níveis de compactação do solo e 4 condições de umidade em duas classes de solos (um Cambissolo e um Argissolo) ,em que as parcelas eram vasos com 100 L de solo, avaliou variáveis biométricas (altura do coqueiro, circunferência da estipe, número de folhas, massa total do coqueiro, área foliar e razão de área foliar, consumo de água) e fisiológicas (potencial hídrico ante-manhã, taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração e o déficit de pressão de vapor, entre a folha e o ar, fluorescência da clorofila *a*, teor de clorofila). Excetuando-se a razão de área foliar,

todas as demais variáveis morfológicas avaliadas sofreram efeitos significativos da irrigação (maior lâmina de água propiciou maior desenvolvimento dos coqueiros). Os maiores valores de consumo de água pelas plantas de coqueiro foram obtidos, também, nas maiores lâminas de água para os dois solos estudados.

Quanto às variáveis fisiológicas, Peçanha (2007) obteve valores menores para o déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar para o Cambissolo do que o Argissolo e valores maiores para potencial hídrico foliar (Ψ_w), taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração, leitura do medidor portátil de clorofila (LMPC) e rendimento quântico máximo do fotossistema II (F_v/F_m), exceto para as maiores lâminas. Estes resultados comprovam que a submissão das plantas a estresses hídrico e mecânico influencia a biometria, o consumo de água, o potencial hídrico foliar e as trocas gasosas do coqueiro.

As condições hídricas e mecânicas do solo podem afetar também os aspectos nutricionais das plantas de coqueiro. Valicheski (2008) em um experimento onde vasos de 100 L foram preenchidos com material de duas classes de solo (Argissolo e Cambissolo) e submetidos a diferentes níveis de compactação e de umidade avaliou teores de nutrientes em plantas de coqueiro anão. Este autor verificou que o Cambissolo, devido suas propriedades físicas e químicas, foi menos afetado pela compactação do solo, mantendo mais estável o fornecimento de nutrientes para as plantas. Por exemplo, foi determinado teor mais elevado de Mg e Cu nas plantas cultivadas neste solo. Porém, o incremento da umidade do solo no Argissolo alterou de forma significativa a absorção de nitrogênio, fazendo com que as plantas cultivadas nos níveis mais elevados de umidade apresentassem maior teor deste elemento, de K e também de Ca nas plantas.

O coqueiro não possui raiz principal, seu sistema radicular é fasciculado, característico de monocotiledôneas (Passos, 1998). Quando não existem impedimentos físicos nem déficit hídrico, as raízes podem atingir até 4 metros de profundidade, aumentando o volume de solo explorado, chegando muitas vezes a alcançar o lençol freático (IRHO, 1992).

O sistema radicular de duas variedades de coqueiro de diferentes idades, crescendo em um solo aluvial e em clima de floresta tropical seca, foi estudado por Avilán et al. (1984). Nessa situação, observou-se que a distribuição radicular foi marcadamente influenciada pelas características físicas do solo, bem como pelas

práticas agronômicas (aplicação de fertilizante e irrigação). Independente da idade da planta, a maior parte das raízes foi encontrada na camada de 0 a 0,3 m de profundidade e a até 1,5 m de distância do tronco. Portanto, os fatores físicos do solo influenciam diretamente o crescimento das plantas de coqueiro, pois determinam as taxas dos processos fisiológicos, ligados com o crescimento radicular, com a fotossíntese e com o crescimento foliar.

Cintra et al. (1996), estudando a distribuição do sistema radicular em um coqueiral (variedade Gigante do Brasil), implantado a 25 anos em Areia Quartzosa distrófica, constataram que mais de 50% das raízes finas se localizam na camada de 0 a 0,3 m de profundidade do solo. Quanto à expansão lateral, para as raízes totais, esta foi expressiva até 1,8 m de distância (concentrando-se a 0,2 – 0,4 m de profundidade) e ainda mais para as raízes finas, que apresentaram uma expansão lateral de 2,4 m (concentrando-se a 0 – 0,2 m de profundidade). Concluíram, também, que os sistemas de manejo com roçada, enxada rotativa, gradagem no início do período seco e roçada no período chuvoso, proporcionam um ligeiro aprofundamento do sistema radicular do coqueiro, em comparação ao manejo com grade.

Valichski (2008) avaliou o desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em vasos de 100 L preenchidos com material de duas classes de solo submetidas a diferentes níveis de compactação e de umidade. Este autor verificou que menores níveis de compactação, associados aos maiores níveis de umidade, proporcionaram maior densidade de raízes finas. Já para raízes médias e grossas, o incremento de 0,3 da Δds , associado à maior umidade do solo, proporcionou condição mais adequada para o desenvolvimento. Estas condições de compactação e de umidade do solo também resultaram em maior densidade total de raiz. Para o Argissolo, incrementos superiores a 0,6 da $D ds$ do solo tornaram-se severamente restritivos ao desenvolvimento das raízes; já para o Cambissolo, devido a seus atributos químicos e físicos, este efeito da compactação foi menos pronunciado.

Cintra (2002) salienta que os riscos para o coqueiro nos Tabuleiros Costeiros estão relacionados quase sempre ao baixo suprimento de água para as plantas, de modo que o seu cultivo tem sido viável, predominantemente, em sistemas irrigados. Além de regular o suprimento de água, a irrigação reduz a expressão do adensamento da camada coesa, a qual, na presença de umidade,

se torna friável, permitindo a penetração das raízes e o aprofundamento do sistema radicular. Essa condição permite a ampliação do volume de solo a ser explorada pelas raízes, melhorando o suprimento de água e nutrientes e reduzindo a vulnerabilidade das plantas a estresses hídricos.

2.3 Ferramentas para interpretação das relações solo-clima-plantas

Em diversas áreas, os pesquisadores frequentemente se deparam com o problema de relacionar a influência de variáveis quantitativas que afetam uma ou mais variáveis-resposta. Na maioria das vezes, o que se busca é conhecer, para cada variável-tratamento, como se dá este relacionamento, desejando-se frequentemente identificar uma equação matemática pela qual se possa relacionar as doses ou níveis que resultam em uma resposta de interesse (Pimentel-Gomes, 1990).

Quando se deseja relacionar, em uma única equação, uma variável-resposta a duas ou mais variáveis-tratamento, o uso da metodologia de superfície de resposta é uma possibilidade que, há algum tempo, tem sido enfatizada. Esta metodologia é, essencialmente, um conjunto de técnicas estatísticas usadas em pesquisas, com a finalidade de determinar as melhores condições e dar maior conhecimento sobre a natureza de certos fenômenos. É composta por planejamento e análise de experimentos, que procura relacionar respostas com os níveis de fatores quantitativos que afetam essas respostas (Box e Draper, 1987). As informações obtidas por meio desses estudos serão tão mais precisas quanto melhor o método utilizado para o tratamento estatístico dos dados.

O relacionamento entre respostas e níveis de fatores a partir de superfícies de respostas procura, entre outros, atingir um dos seguintes objetivos: (i) estabelecer uma descrição de como uma resposta é afetada por um número de fatores em alguma região de interesse; (ii) estudar e explorar a relação entre várias respostas e extremos obrigatórios; e (iii) localizar e explorar a vizinhança de resposta máxima ou mínima. A aplicação dessa metodologia foi realizada inicialmente na indústria química, tendo sido seus fundamentos formalizados por Box e Wilson (1951). No campo agrônomo, o uso concentrou-se no estudo do rendimento de cultivares, como efeito de níveis de nutrientes aplicados ao solo, incluindo-se outros fatores, como densidade de plantio e lâminas de irrigação.

Mesmo em um experimento simples (com apenas uma variável tratamento), a consideração do efeito de uma ou mais covariáveis quantitativas pode levar à

obtenção de uma superfície de resposta (uma equação em que duas ou mais variáveis independentes, impostas ou não por tratamentos, interferem em uma variável resposta). Neste caso, tirar-se-á proveito da covariância para verificar o efeito destas variáveis.

A análise de covariância tem as suas aplicações, segundo Steel et al. (1997) nos seguintes casos: a) ajudar na interpretação dos dados, especialmente com relação à natureza dos efeitos de tratamentos; b) dividir uma covariância total ou soma de produtos nas partes componentes; c) controlar o erro e aumentar a precisão da medida dos efeitos de tratamentos. Para que a análise de covariância seja realizada, porém, deve-se atentar para as seguintes pressuposições: as observações devem ser independentes do efeito dos tratamentos; e os erros devem ser normais e independentemente distribuídos com média zero e variância comuns.

Marciano (1999), trabalhando com aplicação de resíduos urbanos em área cultivada com cana-de-açúcar, verificou que o controle local (por meio de blocos) e a casualização dos tratamentos nas parcelas não garantiu a ausência de covariação entre os tratamentos e variáveis independentes não controladas (no caso, a granulometria do solo). Como a granulometria poderia interferir nas variáveis dependentes de interesse (argila dispersa em água, densidade e porosidade do solo; retenção de água, condutividade hidráulica, entre outras), o autor realizou análise estatística incluindo o teor de argila como covariável. Verificou, através de análises de regressão múltipla, que diferenças na retenção de água e no conteúdo de argila dispersa em água, inicialmente atribuídas aos tratamentos, de fato eram parcial ou totalmente explicadas por variações não casuais na composição granulométrica do solo.

Peçanha (2007), para o coqueiro anão verde cultivado em vasos em dois solos, obteve superfícies de resposta relacionando o consumo de água à idade da planta e à densidade e teor de água no solo, tendo havido, inclusive, interação entre estas duas últimas variáveis. Em relação à morfologia da planta, embora o autor tenha verificado diferenças entre os solos e obtido modelos relacionando estas variáveis tanto ao nível de compactação quanto condição hídrica do solo, as superfícies de resposta correspondentes não foram apresentadas, possivelmente por não ter havido interação entre estas duas últimas variáveis. Quanto às variáveis fisiológicas avaliadas, apenas o rendimento quântico máximo do

fotossistema II sofreu efeito da interação entre estes atributos quantitativos do solo. Embora possível, a obtenção da superfície de resposta correspondente também não foi feita pelo autor.

Um experimento no qual os tratamentos são arranjos em esquema fatorial é usualmente implementado no campo sob os delineamentos inteiramente casualizados e em blocos casualizados, de modo que cada combinação entre os fatores ocupe uma unidade experimental. Em certos casos, porém, quando a utilização do tamanho de parcela usual cria dificuldades para a implementação no campo de algum dos fatores estabelecidos como tratamento, há a necessidade de que esse fator seja implementado em parcelas maiores. Os fatores para os quais a dimensão da parcela não representa problema podem, então, ser implementados em parcelas menores do que o tamanho usual chamadas de subparcelas, demarcadas dentro das primeiras. Este tipo de esquema experimental é denominado de parcela subdividida. Quando o problema da implementação no campo se dá com dois ou mais fatores, pode haver mais subdivisões – gerando, por exemplo, o esquema de parcelas sub-subdivididas (Milliken e Johnson, 1984).

Os experimentos em parcelas subdivididas são utilizados principalmente na análise de dados originados de pesquisas agrícolas, industriais e biológicas, mas podem ser usados em outras áreas, quando por situações diversas, na prática não se pode instalar o experimento em esquema fatorial simples. O procedimento para análise desses tipos de experimentos está apresentado em Kempthorne (1952), Anderson e Bancroft (1952), Steel e Torrie (1980), Cochran e Cox (1976), dentre outros.

Em muitos experimentos com dois fatores conduzidos no esquema de parcelas subdivididas, os tratamentos são constituídos por fatores quantitativos, como lâminas de água e doses de nutrientes. Nesses casos, a aplicação de superfície de resposta pode ser conveniente, tanto que Custódio et al. (2000) apresentam um procedimento adequado para análise desses experimentos, procurando desenvolver a sequência de operações para a realização das análises estatísticas e justificar a aplicação de testes apropriados com outros números de níveis.

São poucos os trabalhos que relatam o uso da superfície de resposta em ensaios em parcelas subdivididas. Mischan e Pinho (1996) propuseram vários

modelos de regressão, quando pelo menos um dos fatores ou ambos são constituídos por fatores quantitativos.

Os experimentos em faixas se distinguem dos usuais em parcelas subdivididas porque neles os tratamentos não se distribuem inteiramente ao acaso nas subparcelas, mas, ao contrário, são dispostos de maneira a formar faixas. A análise em subdivididas, além de ser mais simples, dá maior precisão às comparações entre tratamentos e suas interações. Logo, os experimentos em faixas devem ser evitados, sempre que possível. Há casos, porém, em que razões práticas nos levam a adotá-los, como, por exemplo, em alguns experimentos de épocas de colheita, quando esta é feita por meios mecânicos. Convém, então, que estejam numa só faixa todos os tratamentos a serem colhidos na mesma época, a fim de facilitar o trabalho das máquinas (Pimentel-Gomes, 1990).

Em relação à análise multivariada, esta, frequentemente, é empregada quando o interesse é avaliar o comportamento de uma variável ou grupos de variáveis em covariação com outras. Os modelos estatísticos clássicos são menos sensíveis para identificação do comportamento físico do solo e de sistemas biológicos, uma vez que há dificuldade em considerar o efeito conjunto de inúmeros fatores e características que promovem as respostas ao manejo. A análise estatística multivariada, entretanto, permite detectar e descrever padrões estruturais, espaciais e temporais nas comunidades biológicas, e formular hipóteses baseadas nos numerosos fatores bióticos e abióticos que interferem sobre tais características (Valentin, 2000).

Alakukku (1996) utilizou análise multivariada para comparação e agrupamento das profundidades do solo em que variáveis físicas e químicas foram medidas. Stelluti et al. (1998) também utilizaram análise multivariada por componentes principais, para identificar e depois comparar a resistência à penetração das diferentes camadas do solo. Castrignamó et al. (2002) representaram a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em três dimensões, com interpolação por análise de cokrigagem. Weirich Neto et al. (2006) caracterizaram, verticalmente, camadas de solo com mesmo comportamento da resistência à penetração, também com auxílio de análise multivariada de componentes principais do tipo fatorial, com rotação ortogonal.

A análise fatorial não se refere a uma única técnica estatística, mas a uma variedade de técnicas relacionadas para tornar os dados observados mais

facilmente (e diretamente) interpretados. Isto é feito analisando-se os inter-relacionamentos entre as variáveis, de tal modo que estas possam ser descritas convenientemente por um grupo de categorias básicas, em número menor que as variáveis originais, chamado fatores. Assim, o objetivo da análise fatorial é a parcimônia, procurando definir o relacionamento entre as variáveis de modo simples e usando um número de fatores menor que o número original de variáveis para se gerar uma superfície de resposta (Kerlinger, 1986; Train et al., 1987).

Por isso, a utilização de uma análise multivariada, ou seja, o resumo de um conjunto de variáveis, considerando a variância do conjunto de dados, torna-se uma excelente ferramenta para definir os importantes indicadores de solo e clima que atuam nas plantas do coqueiro (Morrison, 1976). Essa metodologia pode contribuir para um melhor entendimento dos atributos físico-hídricos do solo, possibilitando, dessa forma, um melhor planejamento dos sistemas agrícola.

Lal (1994), tendo a concordância de diversos autores (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Zou et al., 2000), sugere que o comportamento físico do solo seja avaliado por um reduzido número de variáveis, integradoras de outros atributos, que expressem o ambiente físico ao qual as plantas são submetidas. A obtenção de superfícies de resposta, seja por meio de análise estatística convencional ou multivariada, pode ser uma importante ferramenta para avaliar a qualidade destas variáveis integradoras e mesmo estabelecer limites críticos para os atributos que as compõe.

3 TRABALHOS

3.1 Qualidade física de três solos do Norte Fluminense avaliada a partir de amostras com estrutura reconstituída

RESUMO

A qualidade física do solo é essencial ao crescimento das plantas e à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. O objetivo neste trabalho foi avaliar atributos determinantes da qualidade física do solo a partir de amostras com estrutura reconstituída. Um Argissolo Amarelo, um Cambissolo Háplico e um Neossolo Flúvico da Região Norte Fluminense foram coletados e caracterizados quanto à densidade das partículas, granulometria e atributos químicos. Utilizando uma prensa hidráulica, os solos foram acondicionados em vasos de 100 L, atingindo-se quatro níveis de compactação. Após essa reconstituição, amostras indeformadas foram coletadas e utilizadas para determinação da densidade (ρ), porosidade total (PT), curva de retenção de água e curva de resistência à penetração. A implementação dos níveis de compactação resultaram em ampla variação nos valores de densidade e porosidade do solo. Uma pequena diminuição da PT ocorreu em consequência da redução da macroporosidade e, em geral, a despeito de um ligeiro aumento da microporosidade. Para uma redução mais expressiva da PT, ocorreu redução também dos valores de microporosidade. A porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}) e a umidade (θ_{CC}) tiveram comportamentos idênticos ao da macroporosidade e microporosidade, respectivamente. Para os três solos, os valores de água disponível aumentaram consideravelmente com uma pequena elevação da compactação, e diminuíram com aplicação de densidades mais elevadas. O

comportamento do intervalo hídrico ótimo (IHO) é consequência da relação não linear entre a θ_{cc} e a ρ e entre a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e ρ . A resistência à penetração atua como limite inferior do IHO em quase toda a faixa de ρ estudada. O aumento da umidade de resistência à penetração crítica ($\theta_{RP-crit}$) e diminuição do IHO em função de ρ exigem um correto manejo da irrigação, principalmente em compactações mais elevadas. Os valores do índice S foram decrescentes com a aplicação de níveis adicionais de compactação, mostrando ser este um indicador sensível às variações estruturais do solo.

ABSTRACT

The physical quality of soil is essential for plant growth and sustainability of agricultural systems. The aim of this study was to evaluate determinants of physical quality attributes of soil samples from frame reconstituted. An Yellol Argisol, a Haplic Cambisol and Fluvic Neosol the Campos dos Goytacazes-RJ were collected and characterized for particle density, particle size and chemical attributes. Using a hydraulic press, the soils were placed in pots of 100 L, reaching four levels of θ compression. After this reconstitution, samples were collected and used for determining the density (ρ), porosity (TP), water retention curve and the curve of penetration resistance. The implementation of the compression levels result in large fluctuations in density and soil porosity. A small decrease in PT occurred as a result of the reduction of macroporosity and, generally, in spite of a slight increase in microporosity. For a more significant reduction of PT, there was also reduction of the values of microporosity. The aeration porosity at field capacity (PA_{CC}) and humidity (θ_{CC}) behaved similar to the macroporosity and microporosity, respectively. For all soils, the values of available water increased considerably with a small mound of soil compaction, and decreased with application of higher densities. The behavior of limiting water range (LLWR) is a consequence of the nonlinear relation between ρ and θ_{cc} and moisture between the permanent wilting point (θ_{PMP}) and ρ . The penetration resistance acts as a lower limit of the LLWR in almost the entire range of ρ studied. The increased moisture penetration resistance criticizes ($\theta_{RP-crit}$) and decreased as a function of ρ LLWR require a proper irrigation management, especially in higher compressions. The values of the index S were reduced by applying additional levels of compression, showing that this is a sensitive indicator to changes in soil structure.

INTRODUÇÃO

Por não sofrerem grandes alterações com o tempo e/ou tipo de manejo alguns atributos do solo são considerados estáticos a textura. Outros, entretanto, como densidade, porosidade e umidade, refletem de forma dinâmica as alterações ocorridas no mesmo, sendo considerados bons indicadores da qualidade do solo (Lal, 1987).

Entre os fatores físicos do solo que interferem no crescimento de plantas, há aqueles cujo efeito é direto, como a resistência à penetração de raízes, o espaço aéreo destinado às trocas gasosas e a quantidade de água disponível para as plantas (Letey, 1985; Tormena et al., 1998). Associados a esses, encontram-se inúmeros outros atributos que afetam indiretamente as plantas.

A estrutura do solo, embora não seja um fator de ação direta no crescimento, é o elemento integrador que influencia a movimentação de água, transferência de calor, aeração, densidade do solo e porosidade (Letey, 1985). O cultivo intenso de espécies anuais, aliadas à prática de preparo excessivo e superficial do solo em condições inadequadas de umidade, tem causado erosão e degradação da estrutura do solo, como compactação superficial, pelo impacto das gotas de chuva, e subsuperficial, pela formação do pé-de-arado e pé-de-grade.

A compactação do solo, que altera a estrutura do solo, é um processo de aumento de densidade no qual há a elevação da resistência mecânica do solo e redução da porosidade, continuidade de poros, permeabilidade e disponibilidade de nutrientes e água. Esse processo reduz o crescimento e o desenvolvimento radicular, aumenta as perdas de nitrogênio por denitrificação e a erosão do solo pela menor infiltração de água (Soane e Ouwkerk, 1994).

Um valor crítico de densidade do solo no qual o crescimento de raízes é prejudicado tem sido defendido, por Hakansson e Voorhees (1997), como o melhor parâmetro físico que caracteriza solos compactados. Outros pesquisadores sugerem que a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicular, mas sim a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, determinada por um penetrômetro (Voorhees, 1983).

A dinâmica global da água no solo resulta de características do solo internas (textura, porosidade, profundidade do lençol freático, tipo de argilominerais, matéria orgânica, entre outros) e externas (cobertura do solo e

densidade de plantas, precipitação, temperatura), e da relação solo-planta-atmosfera (Musy e Soutter, 1991).

Em virtude da complexa interação entre os fatores físicos, em cada condição estrutural do solo, existe uma faixa ótima de umidade que favorece o crescimento vegetal (Letey, 1985). Em razão dessas interações, Silva et al. (1994) propuseram um índice para avaliar a qualidade estrutural do solo denominado intervalo hídrico ótimo (IHO). Esse índice considera a faixa de umidade do solo como sendo aquela onde as limitações ao crescimento vegetal, associadas à umidade, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes, são minimizadas. O IHO serve como indicativo da qualidade física do solo e na avaliação do manejo do solo e culturas. Procura-se adotar práticas que visam a aumentar a água disponível às plantas, controlando os coeficientes que interferem direta ou indiretamente nesse processo, tais como a densidade do solo e o espaço poroso.

O índice “S”, introduzido no Brasil por Silva (2004) a partir dos trabalhos de Dexter (2004 a, b, c), também apresenta importante contribuição para os estudos da qualidade do solo. Este índice pode ser obtido por se ajustar a curva de retenção a uma função matemática e então calcular a inclinação no seu ponto de inflexão em termos dos coeficientes obtidos na equação de van Genuchten (1980). A análise da curva de retenção de água na literatura sugere que a degradação física do solo sempre conduz a uma mudança no formato das curvas. Uma pequena inclinação indica um solo desestruturado e, portanto, uma elevada inclinação um solo estruturado e que possui muitos poros (Dexter, 2004a).

As condições extremas dos atributos físicos do solo em condições naturais são atingidas apenas eventualmente, devido à grande variabilidade do mesmo. Em condições de manejo, a intensificação das condições de cultivo ainda que apresentem tais condições, não garante que se atinja a degradação máxima, além de exigir a coleta de uma grande quantidade de amostras e da realização de muitas análises físicas. As amostras reconstruídas, porém, nos permite ampliar a faixa de variação da densidade-porosidade total de modo a permitir uma melhor caracterização.

O objetivo neste trabalho foi avaliar atributos determinantes da qualidade física de três solos da Região Norte Fluminense a partir de amostras com estrutura reconstituída, visando prever consequências de sua degradação pelo uso agrícola.

MATERIAL E MÉTODOS

I – Coleta, caracterização e preparo das amostras de solo

Este trabalho foi realizado a partir de amostras do material do solo coletadas em três áreas cultivadas com coqueiro (*Cocos Nucifera* L.) em Campos dos Goytacazes-RJ. Segundo a classificação de Köppen, o clima é Aw, isto é, tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18°C. A temperatura média anual está em torno de 24°C.

Os solos foram classificados, de acordo com Embrapa (2006) como Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico latossólico (solo 1), Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico gleico (solo 2) e Neossolo Flúvico Tb distrófico típico (solo 3 em área com predomínio de Neossolo Quartzarênico Órtico húmico conjugado com a presença de Neossolo Quartzarênico Órtico gleissólico).

O solo 1 está inserido no ecossistema dos Tabuleiros Costeiros, localizando-se no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, próximo à área urbana de Campos. Os solos 2 e 3 são da Baixada Campista, sendo o Cambissolo na Estação Experimental da PESAGRO-Rio (área urbana de Campos) e o Neossolo na Fazenda Taí (localidade de Venda Nova).

O material do Argissolo foi coletado homoganeamente em um perfil com 1,2 m de profundidade, o do Cambissolo na camada superficial com 0,3 m de espessura (correspondente ao horizonte A moderado) e o do Neossolo até 0,6 m (correspondente ao horizonte A húmico). O material foi passado por peneira de malha 6 mm, perfazendo um total de 7 m³ para cada solo, dos quais foram coletadas 3 amostras compostas deformadas. Estas foram utilizadas para a determinação da densidade das partículas, da composição granulométrica e para a caracterização química do solo. Os resultados dos atributos químicos estão apresentados na Tabela 1 e os de composição granulométrica e densidade de partículas na Tabela 2.

Tabela 1. Atributos químicos inicial do Argissolo (solo 1), do Cambissolo (solo 2) e do Neossolo (solo 3).

SOLO	pH água	P (mg kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	----- (cmol _c dm ⁻³) -----								V %
				Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	CTC	
1	4,93	2,30	6,44	0,33	1,92	1,35	0,58	0,06	0,04	2,03	3,94	51,41
2	4,66	74,07	12,26	1,00	3,88	1,26	0,89	0,28	0,05	2,48	6,36	38,96
3	4,91	76,68	21,85	1,20	5,78	1,56	0,44	0,05	0,17	2,22	8,00	27,72

Obs.: carbono orgânico: dicromato de potássio + colorimetria (Anderson & Ingran, 1993); pH em água: potenciometria em solução solo-água 1:2,5; fósforo disponível: extraído por Mehlich-1 + espectroscopia; alumínio extraível: determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹, usando-se azul de bromotímol como indicador; cálcio e magnésio: extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; potássio e sódio trocáveis: extraídos pelo extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama; SB = Ca⁺² + Mg⁺² + K⁺ + Na⁺; CTC = SB + (H⁺+Al⁺³); V% = SB x 100 / CTC (Embrapa, 1997a).

Tabela 2. Composição granulométrica e densidade de partículas do Argissolo (solo 1), do Cambissolo (solo 2) e do Neossolo (solo 3).

SOLO	Areia ----- (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila -----	Densidade de partículas
				(Mg m ⁻³)
1	469	57	474	2,68
2	482	120	398	2,66
3	571	86	343	2,62

Obs.1: Granulometria determinada a partir da dispersão de 20 g de solo com 20 mL de NaOH + 250 mL água e agitação por 16 h a 120 ciclos por minuto; areia obtida em peneira de malha 53 µm, argila obtida pelo método da pipeta e silte por diferença; Obs.2: Densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico com álcool (Embrapa, 1997b).

Os solos foram acondicionados em vasos de 100 L, preenchidos até 75% de sua altura (camada de 0,3 m), utilizando uma prensa hidráulica para atingir quatro níveis de compactação. Esses níveis foram estabelecidos conforme descrito em Peçanha (2007) e Valicheski (2008), a partir da amplitude de variação da densidade do solo (ΔD_s), a qual corresponde à diferença entre a densidade mínima ($D_{mín}$), obtida pelo acondicionado do solo em anel volumétrico sem aplicação de carga, e a densidade máxima ($D_{máx}$), obtida no teste de Proctor normal (Stancati et al., 1981). O nível 1 correspondeu à própria $D_{mín}$, enquanto os níveis 2, 3 e 4 corresponderam a incrementos de 30%, 60% e 90% da ΔD_s , respectivamente (Tabela 3, adaptada de Peçanha, 2007).

Após o acondicionamento dos solos, em cada nível de compactação foram coletadas cinco amostras indeformadas em anéis metálicos com volume de 100 mL (com cerca de 50 mm de diâmetro e de altura), as quais foram utilizadas para determinação da curva de retenção de água, curva de resistência à penetração e outros atributos físicos.

Tabela 3. Umidade que promoveu a compactação máxima (U, obtida no teste Proctor normal), densidade mínima (Dmín, obtida pelo acondicionado do solo em anel sem aplicação de carga), densidade máxima (Dmáx, obtida no teste Proctor normal), amplitude de variação da densidade do solo (ΔD_s , obtida pela diferença entre Dmáx e Dmín) e densidades planejadas nos 4 níveis de compactação (Cp1, Cp2, Cp3 e Cp4), do Argissolo (solo 1), do Cambissolo (solo 2) e do Neossolo (solo 3).

SOLO	U	Dmín	Dmáx	ΔD_s	Cp1	Cp2	Cp3	Cp4
	(kg m ⁻³)	-----			(Mg m ⁻³)	-----		
1	0,187	1,00	1,67	0,67	1,00	1,20	1,40	1,60
2	0,208	1,00	1,60	0,60	1,00	1,18	1,36	1,54
3	0,290	1,00	1,35	0,35	1,00	1,11	1,21	1,32

Obs.: Adaptada de Peçanha (2007).

II – Atributos físicos avaliados

Densidade e porosidade total do solo

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico e a porosidade total (PT) pela relação entre a densidade do solo (ρ) e a densidade de partículas (ρ_s), segundo descrito em Embrapa (1997).

Curva de retenção de água e atributos relacionados

A curva de retenção de água foi determinada das umidades de equilíbrio, segundo o procedimento descrito em Silva et al. (1994). Estes dados, obtidos por Peçanha (2007) e Valicheski (2008), foram ajustados ao modelo de curva de retenção proposto por Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha \phi_m|^n\right)^m} \quad (1)$$

onde θ_r é a umidade volumétrica residual (m³ m⁻³); θ_s é a umidade volumétrica de saturação (m³ m⁻³); ϕ_m é o potencial mátrico (m); α (m⁻¹), n e m são parâmetros independentes estimados por meio de ajustes aos dados observados. O parâmetro independente m foi assumido como função de n ($m = 1 - 1/n$).

No presente trabalho, adotaram-se as modificações sugeridas por Tormena e Silva (2002). Assim, tanto a umidade volumétrica residual (θ_r) quanto o parâmetro de ajuste n foram considerados como funções dependentes da densidade do solo, linear e quadrática, respectivamente:

$$\theta_r = a_1 \rho + b_1 \quad (2)$$

$$n = a_2 \rho^2 + b_2 \rho + c_2 \quad (3)$$

onde a_1 , b_1 , a_2 , b_2 e c_2 são coeficientes independentes estimados durante os ajustes das curvas de retenção. A umidade de saturação (θ_s) também foi tratada como variável independente, pois também é função da densidade ($\theta_s = PT = 1 - \rho/\rho_s$). Isso permitiu que, para cada solo, fosse realizado um único ajuste do modelo, tendo o potencial mátrico e a densidade do solo como variáveis independentes.

A partir da curva de retenção de água foram obtidas funções que descrevem a relação da microporosidade, da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) com a densidade do solo. Essas variáveis resposta foram consideradas correspondentes às umidades nos potenciais mátricos -6 kPa, -10 kPa e -1500 kPa, respectivamente. Também foram obtidas funções relacionando a umidade na porosidade de aeração crítica ($\theta_{PA-crit}$) com a densidade do solo, sendo adotado como porosidade de aeração mínima aceitável o valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

$$\theta_{PA-crit} = \theta_s - 0,1 = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) - 0,1 \quad (4)$$

A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total (PT) e a microporosidade, e a porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}) pela diferença entre a porosidade total e a umidade na capacidade de campo. A água disponível às plantas (AD) foi calculada pela diferença entre θ_{CC} e θ_{PMP} . Para a determinação do índice S foram utilizados os coeficientes de ajuste das curvas de retenção de água segundo Dexter (2004), sendo m e n os que governam o formato da curva. Como este índice é um valor negativo, convenientemente é utilizado seu valor em módulo na discussão.

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{1}{m} \right)^{-(1+m)} \quad (5)$$

Curva de resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada por Valicheski (2008) nas mesmas amostras utilizadas para a determinação da curva de retenção de água. Atingido o equilíbrio nas câmaras de Richards, estas eram submetidas ao ensaio com um penetrômetro de bancada. No presente trabalho, a curva de resistência do solo à penetração foi obtida considerando o modelo de Busscher (1990), que relaciona os valores de RP aos de umidade e densidade correspondentes.

$$RP = a\theta^b \rho^c \quad (6)$$

onde a, b e c são constantes do ajuste.

Rearranjando a equações de RP e admitindo como resistência limitante ao crescimento radicular das plantas o valor de 3 MPa, foram obtidas as funções relacionando a umidade em que o solo atinge resistência à penetração crítica ($\theta_{RP-crit}$) e a densidade do solo.

$$\theta_{RP-crit} = \left(\frac{3}{a\rho^c} \right)^{1/b} \quad (7)$$

Intervalo hídrico ótimo e valores críticos de densidade e umidade

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi obtido, para cada solo e nível de compactação, pela diferença entre o limite de umidade superior (menor valor entre a θ_{CC} e a $\theta_{PA-crit}$) e o inferior (maior valor entre a θ_{PMP} e a $\theta_{RP-crit}$). O IHO foi também obtido graficamente, sendo representado pela faixa entre as funções representativas dos limites superior e inferior de umidade do solo. Neste gráfico pode-se visualizar, caso ocorram, o ponto de igualdade entre θ_{CC} e $\theta_{PA-crit}$, o ponto de igualdade entre θ_{PMP} e $\theta_{RP-crit}$, e o ponto em que o IHO se iguala a zero. A obtenção dos valores críticos de densidade e umidade do solo correspondentes a esses pontos, embora possa ser feita graficamente, seria melhor realizada matematicamente, igualando-se as funções que a determinam. No presente caso, dada a dificuldade de se isolar ρ nessas funções, sua obtenção foi feita pelo método iterativo, por meio da ferramenta “Solver” do aplicativo Microsoft Excel,

fixando-se como meta a obtenção do valor de p que minimizava a diferença entre os valores de θ previstos pelos modelos em questão. Ou seja, obtiveram-se os valores de p e θ no ponto de interseção das funções.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curva de retenção de água e resistência à penetração

Os coeficientes independentes estimados para cada solo no ajuste da curva de retenção (equações 1, 2 e 3) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes de ajuste da curva de retenção de água do solo (α , a_1 , b_1 , a_2 , b_2 e c_2), valores de R^2 , F e significância do Argissolo (solo 1), do Cambissolo (solo 2) e do Neossolo (solo 3).

Coeficientes								
Solos	α	a_1	b_1	a_2	b_2	c_2	R^2	F
1	1,463	0,112	0,026	0,172	-1,118	2,621	0,994	1174,806**
2	3,135	0,015	0,169	1,470	-4,896	5,239	0,958	153,989**
3	0,802	-0,423	0,662	4,859	-12,438	9,090	0,970	219,753**

Obs: ** $p < 0,01$ e n° de dados = 32.

Para solos com baixa umidade, o principal fenômeno responsável pela retenção de água é a adsorção superficial (Reichardt, 1990). Nesse caso, a quantidade de água retida é proporcional à superfície das partículas (solos de textura mais fina tendem a reter mais água residual) (Libardi, 2000). Para um solo específico, onde a granulometria e, portanto, a superfície específica, não é variável, a quantidade de água retida em cada amostra é proporcional à massa de solo. Ou seja, ao mesmo tempo em que a umidade gravimétrica independe da densidade, a volumétrica é diretamente proporcional a ela (equação 2), o que ocorre devido à elevação de a densidade aumentar tanto a massa de partículas quanto de água por unidade de volume do solo.

Em solos mais úmidos, o fenômeno da capilaridade passa a ter maior importância na retenção de água, pois este é função do diâmetro dos poros, segundo a lei de Jurin (Libardi, 2000). Com a compactação, o volume de macroporos diminui e, em um primeiro momento, o de microporos aumenta. Para níveis elevados de compactação, até mesmo o volume de microporos é reduzido. Assim, a quantidade de água retida é dependente da densidade não só pelo incremento de superfície de partículas, mas também por este comportamento não

linear dos microporos (isso justifica o comportamento quadrático do parâmetro n em relação à densidade – equação 3).

Segundo Linhares (2008), a incorporação da densidade do solo no modelo de Van Genuchten, em substituição de parâmetros independentes θ_r e n , promoveu uma melhoria em sua capacidade preditiva e deu-lhe maior representatividade no tempo e no espaço. A substituição da umidade residual (θ_r) por expressões correspondentes (em que a umidade gravimétrica é a constante), o modelo passa a apresentar variáveis estruturais, tornando-se mais abrangente e elevando a qualidade das estimativas. Com relação à qualidade dos ajustes, para este trabalho pode-se verificar a ocorrência de elevados valores de R^2 e F , todos significativos a 1% de probabilidade, o que demonstra boa capacidade preditiva do modelo.

Os coeficientes independentes a , b e c estimados para cada solo no ajuste da curva de resistência à penetração (equação 4) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes resultantes do ajuste não linear da curva de resistência do solo à penetração (a , b e c), valores de R^2 , F e significância do Argissolo (solo 1), do Cambissolo (solo 2) e do Neossolo (solo 3).

Coeficientes					
Solo	a	b	c	R^2	F
1	$5,04 \times 10^{-06}$	-6,67	10,30	0,977**	230,061**
2	$8,0 \times 10^{-05}$	-5,20	9,70	0,963**	139,199**
3	$4,39 \times 10^{-02}$	-2,75	7,93	0,953**	109,220**

Obs: ** $p < 0,01$ e n° de dados = 20.

A curva de resistência do solo à penetração descrita por Busscher (1990) tem sido utilizada com sucesso em diferentes solos (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999; Leão e Silva, 2006). Imhoff et al. (2000) propõem a utilização dessa curva no monitoramento da qualidade física do solo e orientação de práticas de manejo do solo em pastagens. Linhares (2008), ao determinar a resistência à penetração em solos sob cultivo de café Conilon e fragmento de Mata Atlântica, propôs uma modificação no modelo de Busscher (substituição da umidade pela tensão da água), obtendo uma melhor capacidade preditiva do modelo. No presente trabalho, porém, esta modificação apresentou desempenho inferior (resultados não apresentados) ao modelo original de Busscher (1990), possivelmente pela alta qualidade de seu ajuste, verificado pelos elevados valores de R^2 e F , significativos a 1% de probabilidade (Tabela 5).

Em situações específicas, modificações sugeridas por diversos autores têm sido bem sucedidas. Busscher et al. (1997) propuseram três diferentes equações exponenciais fundamentadas apenas no conteúdo gravimétrico de água, porém ajustadas a partir de dados coletados em solos desenvolvidos sob influência de clima temperado. Dias Júnior et al. (2004) também relacionaram a resistência do solo à penetração e o conteúdo gravimétrico de água no solo a partir de amostras coletadas em um Argissolo Amarelo e em um Plintossolo, por meio de modelos lineares. To e Kay (2005) descreveram a variação da resistência do solo à penetração, em função do seu potencial de água, e os coeficientes da equação estimados a partir do teor de argila e de matéria orgânica e da densidade do solo. Contudo, Dexter et al. (2007) propuseram, para essa relação, uma equação composta por dois termos principais: o primeiro está baseado no grau de compactação e na estruturação do solo e se refere ao índice S proposto por Dexter (2004 a,b,c), e o segundo é atribuído ao conteúdo de água no solo.

Densidade, porosidade total e atributos do solo relacionados à curva de retenção de água

Na Tabela 6 são apresentados, para cada solo e nível de compactação, os valores de densidade e porosidade total, assim como os de macroporosidade, microporosidade, porosidade de aeração na capacidade de campo, umidade na capacidade de campo, umidade no ponto de murcha permanente, água disponível, umidade na porosidade de aeração crítica e índice S, obtidos a partir das curvas de retenção. Apresentam-se também os valores de umidade na resistência à penetração crítica, obtidos a partir da curva de resistência à penetração, e de intervalo hídrico ótimo.

A densidade do solo é uma propriedade física que reflete o arranjo de suas partículas, que, por sua vez, define características como a porosidade, permeabilidade e capacidade de armazenamento de água pelo solo (Ferreira, 1993). Os valores de densidade obtidos não foram exatamente os pretendidos no processo de compactação das amostras (Tabela 3), havendo um aumento para o solo 1, no nível 2 (de 1,20 para 1,25 Mg m⁻³) e no nível 4 (de 1,60 para 1,71 Mg m⁻³) e para o solo 2, no nível 2 (de 1,18 para 1,23 Mg m⁻³) e no nível 3 (de 1,36 para 1,44 Mg m⁻³). Para o solo 3, os valores apresentaram-se abaixo dos pretendidos em todos os níveis (Tabelas 3 e 6). Essa dificuldade de manter

valores de densidade constantes no preenchimento de vasos de tamanho grande (100 L, no presente caso) deve-se a diversos fatores operacionais (medição manual de espessura, variação na eficiência da prensa, entre outros) e, ainda, de ter sido confeccionado apenas um vaso para cada nível de compactação (o que pode ter levado a uma condição específica). De qualquer modo, a ampla faixa de densidade obtida atende à necessidade de impor ao solo variabilidade suficiente para avaliar as consequências da compactação.

A densidade do solo é influenciada pela textura (Bueno e Vilar, 1998; Reichardt e Timm, 2004; Libardi, 2005), sendo que, no geral, solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8 Mg m⁻³, enquanto para os solos argilosos esta variação pode ser de 0,9 a 1,6 Mg m⁻³. Para a densidade máxima do solo, Klein et al. (2004) apresentam em um solo argiloso (66% de argila) a densidade de 1,55 Mg m⁻³, enquanto um solo arenoso (32% de areia) foi de 1,77 Mg m⁻³. No presente caso, os valores de densidade implementados como níveis de compactação, planejados a partir do teste de Proctor, são consequências tanto de variações granulométricas quanto de outros atributos do solo, sendo a amplitude de variação maior no solo 1 (47% de argila, 47% de areia, caulinitico, 0,6% de C), intermediária no solo 2 (40% de argila, 48% de areia, montmorilonítico, 1,2% de C) e menor no solo 3 (34% de argila, 57% de areia, quartzoso, 2,2% de C).

Os valores de porosidade total obtidos com a aplicação dos níveis de compactação (Tabela 6) estão situados na faixa de 0,30 m³ m⁻³ a 0,60 m³ m⁻³, citada por Hillel (1970) e Kiehl (1979) como aquela normalmente encontrada nos solos minerais. Os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de 0,32 a 0,47 m³ m⁻³, enquanto os solos argilosos variam de 0,52 a 0,61 m³ m⁻³ e os solos francos um valor intermediário (Reichardt e Timm, 2004; Libardi, 2005). Em horizontes argilosos degradados, principalmente nos superficiais, esses valores são bastante reduzidos (Dias Jr., 2000; Prevedelo, 1996).

Corroborando com a literatura (Silva et al., 2005; Corsini e Ferraudo, 1999; Silva e Kay, 1997), os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que uma pequena diminuição da porosidade total ocorre em consequência da redução da macroporosidade e, em geral, a despeito de um ligeiro aumento da microporosidade (do nível 1 para o 2, no solo 1; do nível 1 para 2 e deste para o 3,

para os solos 2 e 3). Para uma redução mais expressiva da PT, ocorre redução também dos valores de microporosidade, conforme se observa do nível de compactação 3 para o 4 no solo 3.

Valores de macroporosidade inferiores a $0,10$ a $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são frequentemente utilizados para indicar condições limitantes à sanidade das plantas e à aeração do solo. Segundo Baver et al. (1972), valores críticos estão abaixo da faixa de $0,10$ a $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Carter (1990) observou que macroporosidade maior que $0,12$ a $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são adequados para a aeração do solo e para a produção de grãos. Para Kiehl (1979), um solo em condições ideais para o desenvolvimento vegetal deve apresentar $1/3$ da porosidade total formada por macroporos e os $2/3$ restantes por microporos.

Jesus (2006), em um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso, sob quatro intensidades de pastejo animal em trigo, obteve uma porosidade total que variou de $0,49$ a $0,56 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, macroporosidade do solo com $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na média das profundidades em relação aos demais tratamentos. Em termos de distribuição de poros, verificou-se que a microporosidade variou de $0,42$ a $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A análise dos dados da Tabela 6 mostra que a PA_{CC} e a θ_{CC} têm comportamento idêntico ao da macroporosidade e microporosidade, respectivamente. Isso já era esperado, uma vez que os limites entre os dois primeiros e entre os dois últimos atributos são determinados pela curva de retenção de água por valores de tensão não muito afastados entre si. A tensão limite para macroporos e microporos é aproximadamente de $0,6 \text{ m}$ de coluna d'água, correspondente à manutenção da água em poros de raio menor que $50 \mu\text{m}$, enquanto a da PA e θ_{CC} é de $1,0 \text{ m}$ de coluna d'água, que esvazia poros de raio maior que $30 \mu\text{m}$.

O aumento da retenção de água no solo, devido à compactação (ou seja, aumento da microporosidade e de θ_{CC}) tem sido verificado por diversos autores (Corsini et al., 1986; Stone et al., 1994). Todavia, isso depende do nível de compactação atingido e da distribuição de diâmetro dos poros resultante (Hillel, 1980). No presente caso, conforme apresentado para o solo 3, elevadas densidades reduziram tanto a microporosidade quanto θ_{CC} .

Tabela 6. Valores de densidade (ρ), porosidade total (PT), macroporosidade, microporosidade, porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}), umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha (θ_{PMP}), água disponível (AD), umidade na porosidade de aeração crítica ($\theta_{PA-crit}$), umidade na resistência à penetração crítica ($\theta_{RP-crit}$), intervalo hídrico ótimo (IHO) e índice S, para os quatro níveis de compactação, nos três solos estudados.

Níveis de compactação	ρ	PT	macro	micro	PA_{CC}	θ_{CC}	θ_{PMP}	AD	$\theta_{PA-crit}$	$\theta_{RP-crit}$	IHO	S
	$Mg\ m^{-3}$	----- $m^3\ m^{-3}$ -----										
Solo 1 - Argissolo												
1	1,021	0,619	0,365	0,254	0,397	0,222	0,144	0,078	0,519	0,141	0,078	0,124
2	1,256	0,531	0,240	0,292	0,266	0,265	0,176	0,089	0,431	0,194	0,071	0,073
3	1,374	0,487	0,183	0,305	0,206	0,282	0,193	0,088	0,387	0,222	0,059	0,052
4	1,714	0,360	0,053	0,307	0,062	0,299	0,247	0,052	0,260	0,313	0,000	0,012
Solo 2 - Cambissolo												
1	1,090	0,591	0,345	0,246	0,362	0,229	0,187	0,042	0,491	0,155	0,042	0,055
2	1,230	0,536	0,253	0,283	0,272	0,264	0,196	0,068	0,436	0,194	0,068	0,045
3	1,440	0,458	0,134	0,324	0,149	0,309	0,227	0,082	0,358	0,260	0,049	0,023
4	1,510	0,431	0,105	0,325	0,118	0,313	0,237	0,076	0,331	0,284	0,029	0,020
Solo 3 - Neossolo												
1	0,962	0,633	0,239	0,393	0,275	0,357	0,259	0,098	0,533	0,192	0,098	0,087
2	1,070	0,592	0,167	0,425	0,199	0,393	0,242	0,151	0,492	0,261	0,132	0,060
3	1,187	0,547	0,098	0,449	0,120	0,427	0,274	0,153	0,447	0,353	0,074	0,036
4	1,267	0,516	0,079	0,438	0,097	0,420	0,279	0,140	0,416	0,426	0,000	0,025

A variabilidade espacial dos solos surge desde a formação dos mesmos e continua após o solo atingir o seu estado de equilíbrio dinâmico. Sendo o solo um sistema extremamente heterogêneo, o conhecimento de sua variabilidade, pela determinação de uma ampla faixa de valores, é imprescindível na avaliação de seus atributos físicos. (Beckett e Webster, 1971; Jacob e Klutte, 1976).

Atributos do solo relacionados diretamente ao crescimento das plantas

Ainda de acordo com a Tabela 6, para os três solos estudados, os valores de água disponível aumentaram consideravelmente com a elevação do nível 1 de compactação para o 2, aumentaram ligeiramente do nível 2 para o 3, e diminuíram com aplicação de densidades mais elevadas (nível 4). O comportamento da retenção de água disponível é consequência do comportamento de seus limites superior (θ_{CC}) e inferior (θ_{PMP}) frente à aplicação dos níveis de compactação. O estreitamento da faixa de AD em densidades elevadas decorre do comportamento quadrático da θ_{CC} e crescente da θ_{PMP} , acentuando o que se verificou para os valores de microporosidade e θ_{CC} (inicial aumento e posterior decréscimo, em densidades mais elevadas). Pode-se observar também que os incrementos de densidade afetaram menos os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} no Neossolo (solo 3), observando-se uma faixa maior de AD que nos demais solos.

A porosidade de aeração efetiva (PA_{efet}), que corresponde à diferença entre a PT e a umidade efetiva (θ_{efet}), é outro fator que determina a qualidade do solo para o crescimento de plantas, sendo o valor de 10% assumido como seu limite mínimo ($PA_{crit} = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Em solos compactados, a redução da PA_{CC} é tal que muitas vezes este fica abaixo do valor de PA_{crit} . Como a condição de capacidade de campo é corriqueira em períodos chuvosos ou imediatamente após a aplicação de irrigações (ou seja, a umidade efetiva é a própria θ_{CC} , ou muito próximo a ela), estabelece-se uma condição em que a PA_{efet} é igual ou muito próxima à PA_{CC} , ficando, portanto, abaixo do valor de PA_{crit} . No presente trabalho, a ocorrência de PA_{efet} inferior ao limite crítico PA_{crit} somente poderia ocorrer no nível de compactação 4 do Argissolo e do Neossolo, em que a PA_{CC} é 0,062 e 0,097 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Para todas as demais condições, valores inferiores ao limite mínimo de 0,10 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ somente ocorreriam se a umidade efetiva fosse superior à capacidade de campo, o que remeteria a uma condição de excesso de água pouco provável para os solos em questão.

Outro atributo físico adotado como indicativo da compactação do solo tem sido a resistência do solo à penetração (Imhoff et al., 2000; Stone et al., 2002), por apresentar relações diretas com o crescimento das plantas (Hoad et al., 2001) e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação comparada à densidade do solo (Silva, 2003).

Segundo Veihmeyer e Hendrickson (1948), quase sempre o valor-limite de densidade do solo em que as raízes são capazes de penetrar no solo compactado situa-se em torno de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos arenosos e $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos.

A Tabela 7 apresenta os valores de RP para os solos das áreas 1, 2 e 3, de acordo com os diferentes potenciais mátricos e níveis de compactação aplicados. Estes valores foram estimados a partir do modelo de Busscher (1990) (equação 6; Tabela 5), considerando os valores médios de ρ e os valores de θ obtidos da curva de retenção (equação 1; Tabela 4).

Tabela 7. Valores de resistência à penetração (RP) em função dos potenciais mátricos e níveis de compactação, para os três solos estudados.

Níveis de compactação	Potencial Mátrico (MPa)				
	-10	-33	-100	-500	-1500
Solo 1 – Argissolo					
1	0,14	0,63	1,35	2,24	2,59
2	0,37	1,21	2,51	4,61	5,77
3	0,62	1,67	3,22	5,93	7,63
4	4,11	6,15	8,43	12,13	14,74
Solo 2 – Cambissolo					
1	0,39	0,68	0,89	1,06	1,11
2	0,60	1,16	1,73	2,46	2,82
3	1,23	2,04	3,03	4,78	6,07
4	1,82	2,82	4,00	6,09	7,70
Solo 3 – Neossolo					
1	0,55	0,85	1,08	1,26	1,32
2	0,98	1,55	2,18	3,11	3,68
3	1,78	2,46	3,28	4,80	6,03
4	3,12	4,13	5,34	7,61	9,54

A resistência do solo à penetração é influenciada pelo conteúdo de água, textura e pela condição estrutural do solo (Tardieu, 1994), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos às plantas. Os níveis críticos variam também com a espécie cultivada (Taylor et al., 1966). Num Latossolo Roxo, Petter (1990) verificou que a resistência de 2800 kPa foi limitante ao crescimento radicular da cultura da

soja. Taylor e Gardner (1963), Taylor et al. (1966) e Nesmith (1987) adotaram o valor de 2000 kPa como o limite crítico de resistência para a penetração das raízes. Segundo Unger e Kaspar (1994), após fazer uma revisão de vários trabalhos sobre compactação do solo e crescimento de raiz, sugeriram o limite de 3000 kPa como limitante ao crescimento radicular das culturas. Souza (2004) também assumiu este último valor como crítico em relação à resistência à penetração. Neste trabalho, 3000 kPa (ou 3 MPa) foi assumido como limite para $\theta_{RP-crit}$.

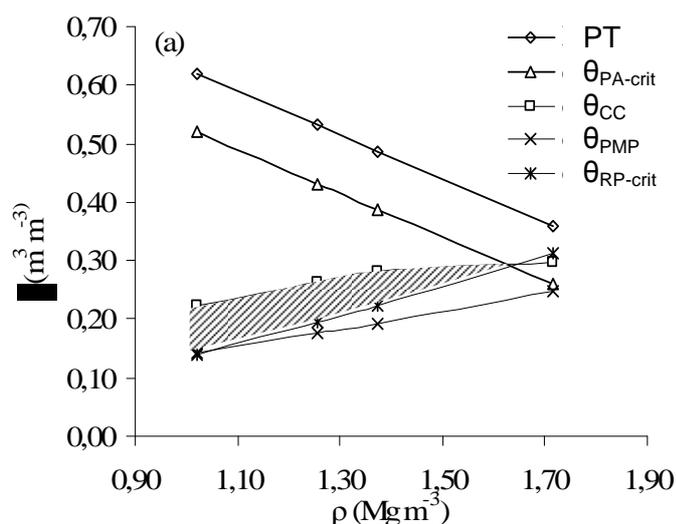
Segundo os dados da Tabela 7, comparativamente aos solos das áreas 1 e 3, o da área 2 apresenta valores baixos de resistência à penetração, o que pode ser justificado pela sua maior plasticidade e expansibilidade, assim como pela preservação de maior macroporosidade no maior nível de compactação. Além disso, valores de RP considerados críticos no presente trabalho (>3MPa) ocorreram com menor frequência nesse solo (30%) que nos demais (50%).

O IHO, definido pelo intervalo entre um limite superior (o menor valor entre θ_{cc} e $\theta_{PA-crit}$) e um inferior (o maior valor entre θ_{PMP} e $\theta_{RP-crit}$), está apresentado na Tabela 6, para cada solo e nível de compactação. O Argissolo apresentou redução do IHO desde a aplicação da primeira compactação adicional (nível 2), sendo esta acentuada a partir desse ponto, igualando-se a zero no nível 4. Para o Neossolo e o Cambissolo ocorreu ligeiro aumento deste atributo no nível 2, demonstrando que, nesse aspecto, uma pequena compactação favoreceu a qualidade física do solo (Richard et al., 2001; Hill et al., 1985; Carvalho et al., 1991; Klein e Libardi, 2002).

Para o Neossolo, houve redução do IHO nos níveis 3 e 4, igualando-se a zero neste último. No Cambissolo, embora também tenha ocorrido redução do IHO para compactações adicionais (níveis 3 e 4), esta foi menos acentuada, não se igualando a zero dentro da faixa de densidade estudada. Outros trabalhos indicaram a maior resistência do Cambissolo à degradação física. Valicheski (2008) verificou, nestes solos, a superioridade do Cambissolo em manter nutrientes para as plantas de coqueiro anão em relação ao Argissolo que pode estar relacionada aos atributos químicos e físicos deste, tais como o maior conteúdo de matéria orgânica, maiores valores de agregação e estabilidade dos agregados, maiores expansibilidade e atividade da fração argila, entre outros. Estes fatores, conjuntamente, minimizaram os efeitos danosos da compactação.

Peçanha (2007), também verificou que as plantas de coqueiro anão cultivadas no Cambissolo apresentaram-se morfológica e fisiologicamente melhores do que as cultivadas no Argissolo. Severiano et al. (2007) observaram, em um Cambissolo sob cultivo de cana-de-açúcar, esta resistência à degradação física. Este solo apresentou uma pequena redução do seu IHO e não promoção de sua nulidade, assim como maior valor de AD, promovendo um melhor ambiente de desenvolvimento para as plantas.

Os atributos θ_{CC} , $\theta_{PA-crit}$, θ_{PMP} e $\theta_{RP-crit}$ também foram plotados em função da densidade do solo, resultando nos gráficos da Figura 1, em que o IHO corresponde a área hachurada. Um aspecto interessante desses gráficos é a relação não linear que se verifica entre a θ_{CC} e a densidade, consequência de se assumir o parâmetro n da equação de van Genuchten (1980) como tendo comportamento quadrático em relação à densidade do solo (Tormena e Silva, 2004). Este comportamento também pode ser verificado na θ_{PMP} , embora de forma mais sutil (devido à proximidade do θ_r - relação linear com a densidade). Embora na literatura verifique-se apenas a ocorrência de relação linear entre ρ e os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} (Blainski et al., 2009; Kaiser et al., 2009; Serafim et al., 2008), essas relações não-lineares são coerentes com o processo anteriormente descrito, em que uma menor compactação promove um aumento dos poros menores, mas uma maior compactação a sua diminuição.



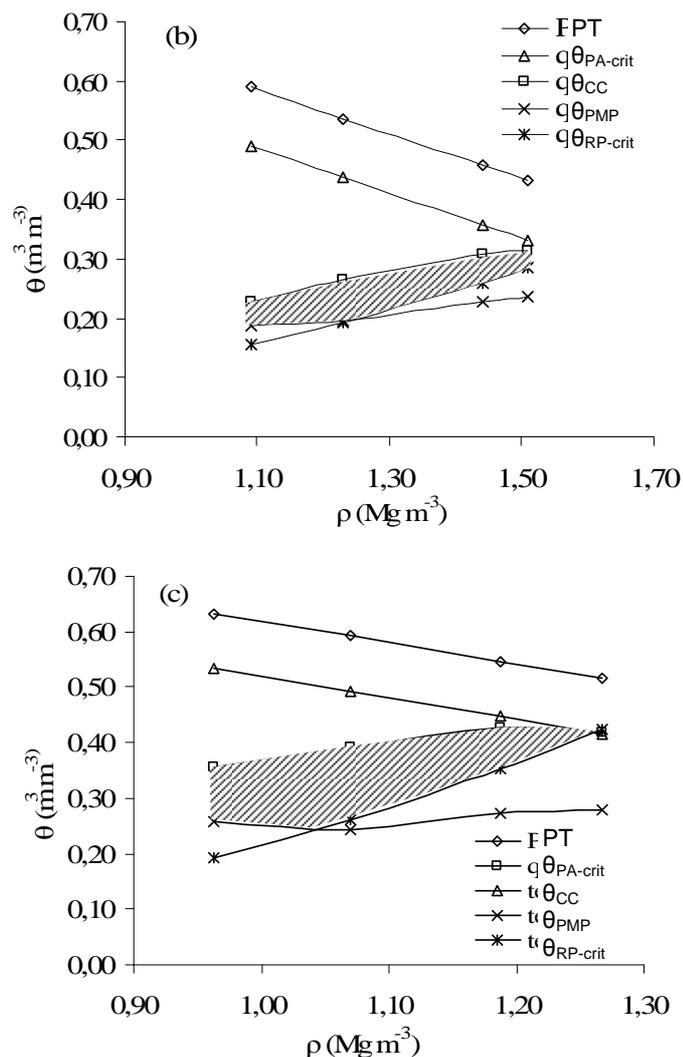


Figura 1. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos de PT, θ_{CC} , $\theta_{PA-crit}$, (porosidade de aeração de 10%), θ_{PMP} , $\theta_{RP-crit}$ (resistência à penetração de 3 MPa). A área hachurada representa o IHO nos solos: Argissolo (a), Cambissolo (b) e Neossolo (c).

A forma de apresentação que consta na Figura 1 também permite visualizar valores críticos de densidade do solo em que um fator de restrição ao crescimento radicular passa a ser mais importante que outro, ou mesmo em que o IHO se iguala a zero. Para o solo 1, pode-se verificar que, pouco acima da densidade mínima (a partir de 1,06 Mg m⁻³), a $\theta_{RP-crit}$ foi o limite inferior do IHO. Para os demais solos, este atributo foi limitante já a partir do nível 2 (1,24 Mg m⁻³ e 1,04 Mg m⁻³, para os solos 2 e 3, respectivamente). Isso corrobora com os resultados de Tormena et al. (1998), que verificaram que, em solos tropicais, o IHO foi limitado, na parte superior, pelo conteúdo de água na capacidade de campo e, na parte inferior, pela resistência do solo à penetração. No presente caso, os valores

de densidade mencionados identificam o ponto em que o IHO é máximo. Para densidades inferiores às mencionadas, o IHO pouca se altera, sendo seu limite inferior a θ_{PMP} e o superior a θ_{CC} (corresponde à AD).

A θ_{CC} limita o IHO até bem próximo ao maior nível de compactação implementado (solos 1 - 1,61 Mg m⁻³ e solo 3 - 1,24 Mg m⁻³) e mesmo acima desta (solo 2 - 1,56 Mg m⁻³, densidade já fora de sua faixa de obtenção dos modelos). Isso revela que problemas de aeração só se tornarão evidentes em condições de compactação elevada, já bem próxima do ponto em que o IHO se iguala a zero (solo 1 - 1,63 Mg m⁻³; solo 2 - 1,60 Mg m⁻³, solo 3 - 1,26 Mg m⁻³). Nesses pontos, o efeito negativo da densidade reduziu consideravelmente os macroporos e, conseqüentemente a θ_{PA} . Silva (2003), avaliando a variação do IHO para três níveis de compactação em um Argissolo Vermelho-Amarelo (120 g kg⁻¹ de argila), um Latossolo Vermelho distrófico (500 g kg⁻¹ de argila) e um Latossolo Vermelho distroférico (600 g kg⁻¹ de argila), sob plantio direto e utilizando 3 MPa como resistência a penetração crítica, verificou valores de densidade de 1,88, 1,50 e 1,42 Mg m⁻³ quando o IHO foi igual a zero. Anteriormente, Silva et al. (2002) haviam determinado que a densidade na qual o intervalo hídrico ótimo é zero foi de 1,8 Mg m⁻³ para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico e de 1,4 Mg m⁻³ para o Latossolo Vermelho distrófico e o Latossolo Vermelho distroférico típico. Para os três tipos de solos, o IHO foi decrescente com a densidade. Alguns autores (Tormena et al., 1998; Silva e Kay, 1997) encontraram que o IHO foi influenciado positivamente até a densidade de 1,1 Mg ha⁻¹ e negativamente para densidades superiores. Silva e Kay (1996) verificaram que o crescimento de milho foi correlacionado positivamente com o IHO e negativamente com a frequência de dias que o conteúdo de água no solo ficou fora dos limites do IHO.

Dexter (2004a), utilizando resultados experimentais, relacionou a qualidade estrutural do solo com a inclinação da curva de retenção, estabelecendo o atributo "S". Valores desse atributo superiores a 0,035 indicariam uma condição favorável para o crescimento das raízes, e abaixo, uma condição restritiva. Ou seja, valores $S > 0,035$ indicam uma adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independente do tipo de solo. Desta forma, fatores que alteram a distribuição do diâmetro dos poros, como o uso e manejo do solo, podem ser avaliados e comparados diretamente por esse parâmetro. O parâmetro S avalia a porosidade estrutural que corresponde aos poros interpartículas, fendas, bioporos

e poros macroestruturais resultantes do uso e manejo, sendo o maior valor de S equivalente a maior inclinação da curva de retenção de água, indicando melhor distribuição de poros e maior quantidade de poros com maior diâmetro (Dexter, 2004).

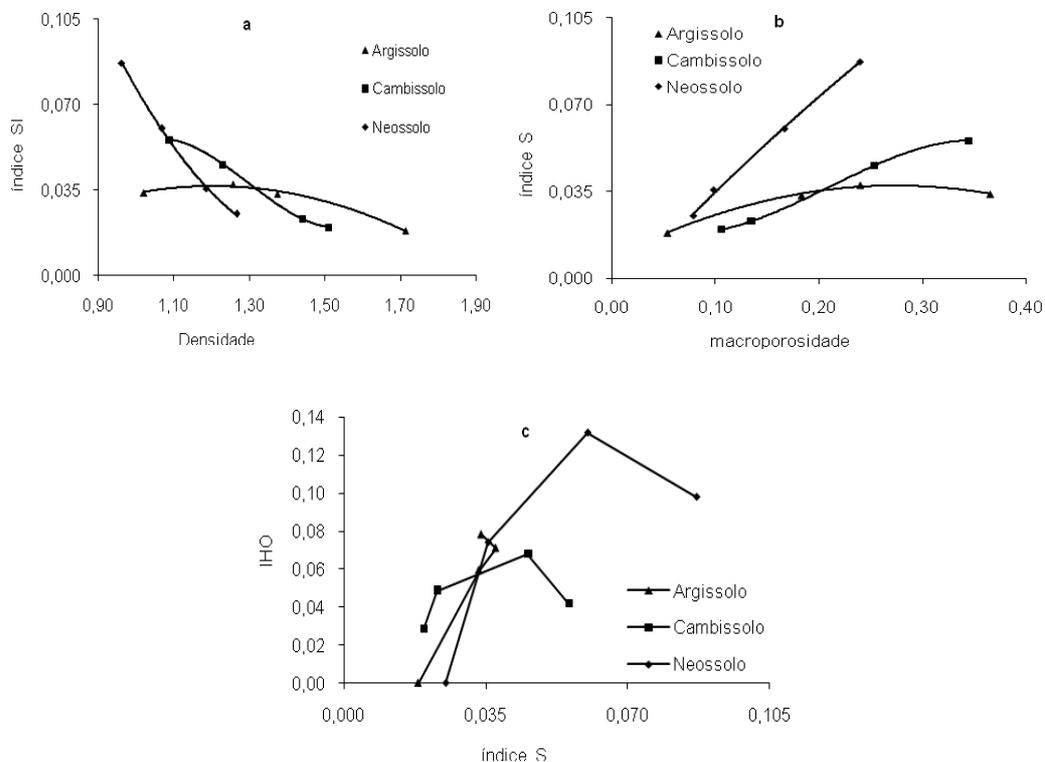


Figura 2. Valores de índice S em função da densidade (a) e da macroporosidade do solo (b), e valores de IHO em função do índice S (c) para o Argissolo, o Cambissolo e o Neossolo.

No presente caso, os solos estudados apresentaram valores do índice S decrescentes com a aplicação de níveis adicionais de compactação (Tabela 6), mostrando ser um indicador sensível às variações estruturais do solo. O Argissolo, porém, apresentou valores de índice S próximo ao valor crítico já nas densidades iniciais (Figura 2a). O Argissolo e o Cambissolo apresentaram valores de macroporosidade da ordem de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ quando o índice S apresentou o valor considerado crítico. O Neossolo apresentou valores de macroporosidade já próximo aos valores limitantes de $0,10$ a $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ quando o índice S foi de $0,035$, indicando condições limitantes à sanidade das plantas e a aeração do solo (Figura 2b).

Observa-se na Figura 2c que os valores de índice S observados foram superiores a $0,035$ até o nível 3 de compactação para o Argissolo e para o Neossolo, sendo muito inferior a esse valor em densidades mais elevadas, quando

o IHO já havia se igualado a zero. Enquanto o índice S decresceu consideravelmente do nível 3 para o nível 4 de compactação nestes solos, para o Cambissolo, o valor deste índice permaneceu entre valores aproximados a 0,020 nestes níveis, e ainda com um IHO da ordem de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Isso sugere uma maior retenção de água neste solo em detrimento a uma desfavorável avaliação de sua porosidade estrutural indicada pelos valores de índice S apresentados.

De forma geral, os resultados indicam que, nestes solos, as funções utilizadas para avaliar o IHO permitem incorporar as variações da estrutura, representadas pela densidade do solo. Portanto, a reconstituição estrutural dos solos em ampla faixa de variação da densidade permitiu avaliar o IHO, podendo tal procedimento ser utilizado para previsão dos efeitos da compactação sob amplas variações de textura e condições de manejo.

CONCLUSÕES

A incorporação da ρ no modelo utilizado para a curva de retenção levou a ajustes consistentes e permitiu identificar comportamento não linear da θ_{CC} e da θ_{PMP} com a compactação;

Uma pequena compactação do solo levou à redução da macroporosidade e a um pequeno aumento da microporosidade, mas uma compactação mais expressiva reduziu também a microporosidade. Isso também ocorreu, respectivamente, para a PA_{CC} e a θ_{CC} . Tal comportamento da microporosidade e θ_{CC} é consequência da incorporação da ρ no modelo da curva de retenção;

Os valores de AD e IHO diminuíram com a elevação da densidade do solo, o que é consequência do comportamento das funções das umidades críticas que definem esses atributos e determinam as densidades críticas.

Os valores do índice S foram decrescentes com a aplicação de níveis adicionais de compactação e mostrou-se um indicador sensível às variações estruturais do solo.

A reconstituição estrutural pode ser utilizada como ferramenta para prever os efeitos da compactação, pois permitiu avaliar a qualidade física do solo em uma ampla faixa de variação de densidade, obtendo-se de forma consistente as funções utilizadas para estimar as umidades críticas que definem o IHO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Baver, L.D.; Farwoeth; R.B.; (1972) Soil structure, effects in the growth of sugar beets. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5:45-48.
- Beckett, P.H.T.; Webster, R. (1971) Soil variability: a review. *Soils Fertily*, 34:1-15.
- Blainski, E.; Gonçalves, A.C.A.; Tormena, C.A.; Folegatti, M.V.; Guimarães, R.M.L. (2009) Intervalo Hídrico Ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 33: 273-281.
- Bueno, B.S.; Villar, O.M. (1998) *Mecânica dos solos*. São Carlos: USP, EESC, 131p.
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524.
- Busscher, W.J.; Bauer, P.J.; Camp, C.R.; Sojka, R.E. (1997) Correction of cone index water content differences in a Coastal Plain soil. *Soil Till. Res.*, 43:205-217.
- Camargo, O.A.; Alleoni, L.R.F. (1997) *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba, SNT, 132p.
- Carter, M.R. (1990) Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 70:425-433.
- Carvalho, S.R.; Bruand, A.; Hardy, M.; Leprum, J.C.; Jamagne, M. (1991) Tassement des sols ferrallitiques Podzólico Vermelho Amarelo sous culture de canne à sucre (état de Rio de Janeiro, Brésil): apport d'une analyse de la porosité associée a une connaissance détaillée de la phase minérale. *Cahiers ORSTOM Série Pedologie*, 26:195-212.
- Corsini, P.C.; Ferraudo, A.S. (1999) Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesq. Agrop. Bras.*, 34:289-298.
- Corsini, P.C.; Malheiros, E.B.; Sacchi, E. (1986) Sistemas de cultivo da cultura de cana-de-açúcar: efeitos na retenção de água e na porosidade do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 10:71-74.
- Defosse, P.; Richard, G. (2002) Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Till. Res.*, 67:41-64.
- Dexter, A.R. (2004a) Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.

- Dexter, A.R. (2004b) Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*, 120:215-225.
- Dexter, A.R. (2004c) Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120:227-239.
- Dexter, A.R.; Czyz, E.A.; Gate, O.P. (2007) A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.*, 93:412-419.
- Dias Junior, M.S. (2000) Compactação do solo. In: *Tópicos de Ciência do Solo*. Viçosa: Soc. Bras. Ci. Solo, 1:55-94.
- Dias Júnior, M.S.; Silva, A.R.; Fonseca, S.; Leite, F.P. (2004) Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:805-810.
- Embrapa (1997). *Manual de métodos de análise de solos*. 2.ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos – Embrapa Solos, 212p.
- Embrapa (2006) *Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos – Embrapa Solos, 306p.
- Fernandes, M.R. (1982) Alterações em propriedades de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, fase cerrado, decorrentes da modalidade de uso e manejo. *Tese (Mestrado)*, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Ferreira, M.M. (1993) *Física do solo*. Lavras : ESAL/UFLA-FAEPE, 71p.
- Hakansson, I.; Voorhees, W.B. (1997) Soil compaction. In: Lal, R.; Blum, W.H.; Valentin, C. *et al.* (eds.) *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: Lewis,. p.167-179.
- Hill, R.L.; Cruse, R.M. (1985) Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisoils. *Soil Science Society of America Journal*, 49:1270-1273.
- Hillel, D. (1970) *Solo e água: fenômeno e princípios físicos*. Porto Alegre: Meridional "EMMA",. 231p.
- Hillel, D. (1980a) *Applications of soil physics*. New York, Acad. Press, caps. 2 e 6.
- Hoad, S.P.; Russel, G.; Lucas, M.E.; Bingham, I.J. (2001) The management of wheat, barley, and oat root systems. *Advances in Agronomy*, 74:195- 254.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.; Tormena, C.A. (2000) Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agrop. Bras.*, 35:1493-1500.

- Jacob, W.L.; Klutte, A. (1976) Sampling soils for physical and chemical properties. *Soil Science Society America Proceedings*, 20:170-178.
- Jesus, C.P. (2006) Atributos físicos do solo e produtividade da soja após um ano de integração lavoura-pecuária em área sob plantio direto. *Dissertação* (Mestrado em Ciência do Solo) – Lages –SC. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. 45p.
- Kaiser, D.R.; Reinert, D.J. Reichert, J.M.; Collares, G.L.; Kunz, M. (2009) Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 33:845-855.
- Kiehl, E. J. (1979) *Manual de edafologia*. São Paulo, SP: Ceres.
- Klein, V. A.; Libardi, P. L. (2002) Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:857-867.
- Klein, V.A. et al. (2004) Rendimento de milho em plantio direto escarificado. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, Santa Maria, RS. *Resumos Expandidos*. Santa Maria: SBSCS, 2004a. CD-ROM.
- Lal, M. (1987) Studies on irrigation scheduling in nited stands of forage oat and legumes. *Indian Agronomy Journal*, 32:21-23.
- Leão, T.P.; Silva, A.P. (2006) Critérios estatísticos na seleção de parâmetros para avaliação da resistência do solo à penetração. *Sci. Agric.*, 63:552-557.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Libardi, P.L. (2000) *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba, O Autor, 509p.
- Libardi, P.L. (2005) *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: EDUSP, 335p.
- Linhares A.A.N. (2008) Modificações em modelos matemáticos das curvas de resistência à penetração e retenção de água no solo. *Monografia* (Graduação em Agronomia) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 29p.
- Musy, A.; Soutter, M. (1991) *Physique du sol*. Laussane: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 335 p.
- Nesmith, D.S. (1987) Soil compaction in double cropped wheat and soyabean on Ultissol. *Soil Science Society of America Journal*, 51:183-186.

- Peçanha, A.L. (2007) Relações hídricas e trocas gasosas do coqueiro anão verde em função da compactação, lâmina de irrigação e classe de solo. *Tese* (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 78p.
- Petter, R.L. (1990) Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo. *Dissertação* (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Santa Maria - RS. Universidade Federal de Santa Maria UFSM, 144 p.
- Prevedello, C.L. (1996) *Física do solo com problemas resolvidos*. Curitiba, Salesward-Discovery, 446 p.
- Reichardt, K. (1990) *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo, Manole, caps 3,5.
- Reichardt, K.; Timm, L.C. (2004) *Solo, planta e atmosfera. Conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 478p.
- Richard, G. *et al.* (2001) Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.*, 52:49-58.
- Serafim, M.E.; Vitorino, A.C.T.; Peixoto, P.P.P.; Souza, C.M.A.; Carvalho, D.F. (2008) Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. *Eng. Agríc. Jaboticabal*, 28:654-665.
- Severiano, E.C. (2007) Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. *Tese* (Mestrado). Lavras, Universidade Federal de Lavras, 71p.
- Silva, A.J.N.; Cabeda, M.S.V.; Lima, J.F.W. F. (2005) Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 29:833-842.
- Silva, A.P. (2004) Integração manejo x física. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, Santa Maria, *Palestras*. Santa Maria, UFSM, 2004. CD-ROM.
- Silva, A.P.; Kay, B.D. (1996) Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883.
- Silva, A.P.; Kay, B.D. (1997) B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil. Sc. Soc. Am. Jour.*, 61:884-888.
- Silva, A.P.; Kay, B.D.; (1994) Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1775-1781.

- Silva, R.B. (2002) Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados. *Tese* (Doutorado). Lavras, Universidade Federal de Lavras, 142p.
- Silva, V.R. (2003) Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. *Tese* (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 171p.
- Soane, B.D.; Ouwerkerk, C. van. (1994) Soil compaction problems in world agriculture. *In: Soane, B.D.; Ouwerkerk, C. van, eds. Soil compaction in crop production. Netherlands: Elsevier, . p.1-21.*
- Souza, M.S. (2004) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da Região Norte Fluminense. *Tese* (Mestrado em Produção Vegetal) - Campos dos Goytacazes–RJ. Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF. 72p.
- Stone, L.F.; Guimarães, C.M.; Moreira, J.A.A. (2002) Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Rev. Bras. Eng. Agr. e Ambiental*, 6:207-212.
- Stone, L.F.; Silveira, P.M.; Zimmermann, F.J.P. (1994) Características físico-hídricas e químicas de um Latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 18:533-539.
- Tardieu, F. (1994) Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. *Soil Till. Res.*, 30:217-243.
- Taylor, H.M. et al. (1966) Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102:18-22.
- Taylor, H.M., Gardner, H.R. (1963) Penetration of cotton seedling roots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science*, 96:153-156.
- To, J.; Kay, B.D. (2005) Variation in penetrometer resistance with soil properties: The contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126:261-276.
- Tormena, C.A. et al. (2004) Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:1023-1031.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P. (2002) Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:305-314.

- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Gonçalves, A.C.A.; Folegatti, M.V. (1999) Intervalo ótimo potencial de água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Eng. Agric.*, 3:86-292.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581.
- Unger, W.P.; Kaspar, T.C. (1994) Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal*, 86:759-766.
- Valicheski, R.R. (2008) Atributos químicos do solo, estado nutricional e desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solos sob diferentes níveis de compactação e umidade. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- Van Genuchten, M.T.A. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-897.
- Veihmeyer, F.J.; Hendrickson, A.H. (1948) Soil density as a factor in determining the permanent wilting percentage. *Soil Science*, 62:451-456.
- Voorhees, W.B. (1983) Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of America Journal*, 47:129-133.

3.2 Validação de funções de pedotransferência para atributos físicos de solos do Norte Fluminense

RESUMO

Funções de pedotransferência são equações usadas para estimar atributos do solo integradores de sua qualidade física a partir de outros de mais simples obtenção. O objetivo neste trabalho foi avaliar funções de pedotransferência sugeridas na literatura quanto à sua capacidade para prever atributos físicos de solos do Norte Fluminense (Argissolo Amarelo, Cambissolo Háplico e Neossolo Flúvico). Os solos foram coletados e caracterizados quanto à densidade das partículas, granulometria, atributos químicos e atributos estruturais (densidade, porosidade e as curvas de retenção de água e de resistência à penetração). Utilizando uma prensa hidráulica, o material dos solos foi acondicionado em quatro níveis de compactação, para determinação de atributos estruturais em uma faixa mais ampla de densidade. Funções de pedotransferência (FPTs) selecionadas foram avaliadas quanto à sua qualidade preditiva para a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (AD), porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e resistência do solo à penetração (RP). As FPTs de Pidgeon (1972), Solano (2003) e Lal (1979) apresentaram os melhores desempenhos médios nos três solos para a estimativa de θ_{CC} . Para θ_{PMP} , os destaques para os três solos foram as FPTs de Arruda et al. (1987) e Urach (2007). As equações propostas para θ_{CC} e θ_{PMP} por Dijkermam (1988) e por Oliveira et al. (2002) resultaram nos melhores desempenhos para estimar a AD, para os três solos. Para a PA_{CC} , as FPTs para θ_{CC} e θ_{PMP} propostas por Solano (2003), Lal (1979) e Pidgeon (1972) resultaram em boas estimativas, para os três solos, superando o modelo de Saxton e Raws (2006), desenvolvido especificamente para estimar PA_{CC} . A FPT proposta por Saxton e Raws (2006) foi a que apresentou melhor correlação entre os valores medidos e estimados de condutividade hidráulica do solo saturado para os três solos estudados. A FPT proposta por Silva e Kay (1997) para estimar valores de RP, aplicada para diversos potenciais mátricos, apresentou o melhor desempenho geral para o solo 3 e o pior para o solo 2 (apesar do bom resultados para o potencial mátrico de -33 KPa). O reajuste da equação para θ_{PMP} de Saxton e Raws (2006) reduziu o EM. A

utilização de pedofunções deve basear-se em calibrações locais ou ampliar o número de variáveis de entrada, o que, por um lado, pode tornar as FPTs mais eficientes mas, por outro, cria mais demandas analíticas.

ABSTRACT

Pedotransfer functions are equations used to estimate soil attributes integrators its physical quality from other simpler production. The aim of this study was to evaluate pedotransfer functions suggested in the literature about its ability to predict the physical attributes of soils of North of Rio de Janeiro State the Campos dos Goytacazes-RJ (a Yelloi Argisol, a Haplic Cambisol and Fluvic Neosol). Soil samples were collected and characterized for particle density, particle size, chemical and structural characteristics (density, porosity and water retention curves and penetration resistance). Using a hydraulic press, soil material was packed into four levels of compression, to determine the structural attributes in a wider range of density. Pedotransfer functions (PTFs) selected were evaluated for their predictive quality for moisture at field capacity (θ_{CC}), moisture at wilting point (θ_{PMP}), available water (AW), aeration porosity at field capacity (PA_{CC}), saturated hydraulic conductivity (Ks) and resistance to penetration (RP). The PTFs of Pidgeon (1972), Solano (2003) and Lal (1979) showed the best average performance in the three soils for the estimation θ_{CC} . For θ_{PMP} , the highlights for the three soils were PTFs de Arruda et al. (1987) and Urach (2007). The proposed equations for θ_{CC} e θ_{PMP} Dijkermam (1988) and Oliveira et al. (2002) resulted in better performance for estimating DC and PMP proposed θ the DA, for the three soils for the PA_{CC} , the PTFs for by Solano (2003), Lal (1979) and Pidgeon (1972) resulted in good estimates for the three soils, exceeding the standard Raws and Saxton (2006), developed specifically for estin PA_{CC} . FPT proposed by Saxton and Raws (2006) showed the best correlation between measured and calculated values of hydraulic conductivity of saturated soil for the three soils. FPT proposed by Silva and Kay (1997) to estimate values of RP, applied for several matric potentials showed the best overall performance for the third and the worst soil for soil 2 (despite the good results for the matric potential of 33 kPa). The readjustment of the equation for θ_{PMP} Raws and Saxton (2006) reduced the MS. The use of pedofunções should be based on calibrations local or expand the

number of input variables, which on the one hand, it can become more efficient but the PTFs on the other hand, creates more demands analysis.

INTRODUÇÃO

Funções de pedotransferência, definidas como funções (modelos de regressões) que transferem propriedades conhecidas do solo para propriedades do solo desconhecidas, com as vantagens de maior facilidade de obtenção e redução de custos, podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do solo em sistemas de manejo (Gregorich, 2006).

Atualmente, um número considerável de autores propõe equações para predição do conteúdo de água retida pelo solo nos potenciais equivalentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, assim como para a água disponível, a condutividade hidráulica e a resistência do solo à penetração. No entanto, estas equações não devem ser usadas indiscriminadamente, pois, em sua maioria, foram desenvolvidas com solos de clima temperado e seu uso não pode prescindir de calibrações locais. As funções de pedotransferência tendem a ser tão mais acuradas quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quão mais próximos destes estiverem os que terão seus dados estimados. Outro problema refere-se a diferenças nos métodos analíticos empregados para obtenção das variáveis dependentes e independentes (Oliveira et al., 2002).

Segundo Scheinost et al. (1997), a textura e a matéria orgânica são os principais fatores que afetam a retenção de água no solo. A textura determina a área de contato entre a água e as partículas sólidas, assim como a acomodação das partículas e a distribuição de poros. A matéria orgânica afeta uma das principais características físicas do solo, que é a agregação do solo, afetando assim, indiretamente, outras características como a densidade, porosidade, aeração e capacidade de retenção e infiltração de água (Santos e Camargo, 1999).

As propriedades de retenção de água são requeridas em modelos de simulação de fluxos de água e transporte de solutos, bem como muito usados em várias estratégias de manejo de água no solo. Entretanto, o uso de modelos de simulação de sistemas agrícolas tem sido limitado pela falta de informações de propriedades hidráulicas. A estimativa dos valores para essas propriedades, pelo

uso de equações empíricas ou estatísticas, ou seja, das funções de pedotransferência, pode ser uma alternativa viável, rápida e econômica. As funções de pedotransferência podem também ajudar a determinar valores de potencial matricial e pode prever a expressão da curva de retenção da água (Hillel, 1998).

O crescimento radicular encontra-se, às vezes, restrito devido à impedância mecânica ocasionada pela compactação do solo (Passioura, 2002). A resistência do solo à penetração obtida em diferentes condições de densidade e/ou, conteúdo de água é difícil de ser comparada (Bailey et al., 1986). Além disso, conforme Busscher (1990), diferenças na resistência do solo à penetração, ocasionadas por diferentes tratamentos, podem não ser detectadas devido ao efeito do seu conteúdo de água. A correção dos dados de resistência do solo à penetração no mesmo conteúdo de água pode reduzir problemas de interpretação de resultados obtidos em diversas condições de campo e sistemas de manejo (Busscher et al., 1997). Nesse sentido, pesquisadores têm procurado desenvolver funções de pedotransferência que traduzam essa relação.

O objetivo neste trabalho foi avaliar funções de pedotransferência sugeridas na literatura quanto à sua capacidade para prever atributos físicos de solos do Norte Fluminense, facilitando a determinação de variáveis integradoras da qualidade física do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado a partir de amostras do material do solo coletadas em três áreas em Campos dos Goytacazes-RJ. Os solos foram classificados de acordo com Embrapa (2006) como: solo 1 - Argissolo Amarelo Distrocoeso fragipânico latossólico; solo 2 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico gleico; e solo 3 - Neossolo Quartzarênico Órtico húmico + Neossolo Flúvico Tb distrófico típico.

Nos anos de 2003 e 2004, amostras deformadas e indeformadas dos solos foram coletadas em uma trincheira aberta em cada área, sendo retiradas a cada 0,10 m até a profundidade de 1,50 m (Souza, 2004; Bernardes, 2005). Embora a caracterização física e química tenha sido feita segundo essas camadas de 0,10 m, para cada atributo avaliado o valor representativo de cada horizonte identificado na descrição morfológica do perfil do solo foi obtido pela média das

camadas que compunham o referido horizonte, ponderando-se pela fração da espessura nele inserido (Souza, 2004).

Em 2005, em pontos próximos aos da coleta de 2003 e 2004, material de solo foi coletado para o acondicionamento em vasos de 100 L, em quatro níveis de compactação cada solo, obtendo-se uma ampla faixa de densidade. O material do Argissolo foi coletado homoganeamente em um perfil com 1,2 m de profundidade, o do Cambissolo na camada superficial com 0,3 m de espessura (correspondente ao horizonte A moderado) e o do Neossolo até 0,6 m (correspondente ao horizonte A húmico). Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para a caracterização física e química desses materiais.

Amostras deformadas foram utilizadas para a determinação da densidade das partículas e da composição granulométrica e para a caracterização química de cada solo, sendo os valores representativos desses atributos apresentados na Tabela 1. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de aço inox com volume de 100 mL, com cerca de 50 mm de diâmetro e de altura (cinco para cada camada ou vaso), e em anéis de alumínio com volume de 270 mL, com cerca de 70 mm de diâmetro e de altura (três para cada camada ou vaso).

Os anéis de 270 mL foram utilizados exclusivamente para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) pelo método do permeâmetro de carga constante (Embrapa, 1997), com adaptações descritas em Bernardes (2005), enquanto os anéis de 100 mL foram utilizados para a determinação dos demais atributos físicos do solo, descritos a seguir.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico e a porosidade total (PT) pela relação entre a densidade do solo (ρ) e a densidade de partículas (ρ_s), conforme descrito em Embrapa (1997). Tais variáveis também constam na Tabela 1.

Tabela 1. Valores máximo, mínimo e médio para as frações granulométricas (areia, silte e argila), densidade de partículas (ρ_s), carbono orgânico (CO), matéria orgânica (M.O.), densidade do solo (ρ) e porosidade total (PT) dos três solos estudados.

	Areia	Silte	Argila	ρ_s	CO	M.O.	ρ	PT _s
	------(%)-----			Mg m ⁻³	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	Mg m ⁻³	m ³ m ⁻³
Solo 1 - Argissolo (n = 9)								
Máximo	54,23	13,21	57,57	2,88	1,12	1,93	1,71	0,62
Mínimo	36,06	5,67	38,60	2,64	0,23	0,40	1,09	0,36
Média	45,03	8,50	46,47	2,75	0,75	1,30	1,36	0,51
Solo 2 - Cambissolo (n = 9)								
Máximo	56,97	43,58	66,26	2,71	1,30	2,24	1,51	0,63
Mínimo	4,00	8,91	34,11	2,63	0,20	0,34	0,99	0,43
Média	28,79	25,32	45,87	2,67	0,87	1,50	1,17	0,56
Solo 3 - Neossolo (n = 10)								
Máximo	94,17	8,56	34,30	2,77	2,18	3,77	1,50	0,63
Mínimo	57,13	2,14	3,67	2,57	0,05	0,09	0,96	0,45
Média	78,46	5,42	16,12	2,68	1,07	1,85	1,34	0,50

Obs. Granulometria determinada a partir da dispersão de 20 g de solo com 20 mL de NaOH + 250 mL água e agitação por 16 h a 120 ciclos por minuto; areia obtida em peneira de malha 53 μ m, argila obtida pelo método da pipeta e silte por diferença; densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico com álcool (Embrapa, 1997b); carbono orgânico determinado por dicromato de potássio + colorimetria (Anderson & Ingran, 1993); M.O. = 1,724 x C (Embrapa, 1997a); n: números de dados para cada solo.

A curva de retenção de água foi determinada a partir das umidades de equilíbrio, segundo o procedimento descrito em Silva et al. (1994). Estes dados, obtidos por Souza (2004), Peçanha (2007) e Valicheski (2008), foram ajustados ao modelo de curva de retenção proposto por Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha\phi_m|^n\right)^m} \quad (1)$$

onde θ_r é a umidade volumétrica residual (m³ m⁻³); θ_s é a umidade volumétrica de saturação (m³ m⁻³); ϕ_m é o potencial mátrico (m); α (m⁻¹), n e m são coeficientes independentes estimados por meio de ajustes aos dados observados. O parâmetro independente m foi assumido como função de n ($m = 1 - 1/n$). Conforme sugerido por Tormena e Silva (2002), tanto a umidade volumétrica residual (θ_r) quanto o parâmetro de ajuste n foram considerados como funções dependentes da densidade do solo, linear e quadrática, respectivamente:

$$\theta_r = a_1\rho + b_1 \quad (2)$$

$$n = a_2 \rho^2 + b_2 \rho + c_2 \quad (3)$$

onde a_1 , b_1 , a_2 , b_2 e c_2 são coeficientes independentes estimados durante os ajustes das curvas de retenção. A umidade de saturação (θ_s) também foi tratada como variável independente, pois também é função da densidade ($\theta_s = PT = 1 - \rho/\rho_s$). Isso permitiu que, para cada solo, fosse realizado um único ajuste do modelo, tendo o potencial mátrico e a densidade do solo como variáveis independentes.

A partir da curva de retenção de água foram obtidas funções que descrevem a relação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) com a densidade do solo. Essas variáveis resposta foram consideradas correspondentes às umidades nos potenciais mátricos -33 kPa e -1500 kPa, respectivamente.

Também foram obtidos valores de porosidade de aeração (PA_{CC}), pela diferença entre a θ_{CC} e θ_s , e de água disponível às plantas (AD), que foi calculada pela diferença entre θ_{CC} e θ_{PMP} .

A resistência do solo à penetração foi determinada por Souza (2004) e Valicheski (2008) nas mesmas amostras utilizadas para a determinação da curva de retenção de água. Atingido o equilíbrio nas câmaras de Richards, estas eram submetidas ao ensaio com um penetrômetro de bancada. No presente trabalho, a curva de resistência do solo à penetração foi obtida considerando o modelo de Busscher (1990), que relaciona os valores de RP aos de umidade e densidade correspondentes.

$$RP = a \theta^b \rho^c \quad (4)$$

onde a , b e c são constantes do ajuste.

A partir de valores obtidos na análise granulométrica (areia, silte e argila), química (carbono orgânico) e da densidade e porosidade total do solo, funções de pedotransferência disponíveis na literatura foram validadas quanto à capacidade preditiva para a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (AD), porosidade de aeração na capacidade de campo (PA_{CC}), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e resistência do solo à penetração (RP). A avaliação da eficiência dessas funções

baseou-se na comparação entre os dados observados e previstos, utilizando-se como ferramentas o coeficiente de correlação, o erro médio e a raiz do erro quadrado médio das estimativas, os coeficientes linear e angular da regressão linear (interpretação numérica e gráfica da dispersão em relação à reta 1:1).

Para a obtenção do erro médio (EM) e da raiz do erro quadrado médio aplicaram-se as equações:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{est} - X_{obs}) \quad (5)$$

e

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{est} - X_{obs})^2} \quad (6)$$

onde n é o número de amostras, X_{est} é o valor do atributo estimado pela FPTs e X_{obs} é o seu valor observado. Quando o EM apresenta valores positivos, isto indica a tendência da equação em superestimar os valores previstos, quando negativos, de subestimar estes valores.

A REQM quantifica a dispersão entre os valores observados e estimados em relação à reta 1:1. A REQM é obtida por se extrair a raiz quadrada do EM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentadas as FPTs selecionadas na literatura para a estimativa de atributos físicos de solos. Como variáveis descritoras (ou de entrada) estas FPTs consideraram principalmente os teores das frações granulométricas e de carbono orgânico (ou de matéria orgânica) e a densidade do solo. Como variáveis preditas (ou de saída) constam os valores de umidade (volumétrica ou gravimétrica) em potenciais mátricos específicos (-33 kPa, considerado como CC, e -1500 KPa, considerado como PMP), de condutividade hidráulica na saturação e de resistência à penetração. Para facilitar a comparação entre FPTs e a interpretação dos resultados, as equações que previam valores de umidade gravimétrica foram multiplicadas pela densidade relativa do solo ($\rho_r = \rho / \rho_a$), obtendo-se os valores de umidade volumétrica correspondentes. Apenas uma FPT para a estimativa água disponível é apresentada (Aina e Periaswamy, 1985), mas para os demais autores que apresentam FPTs para θ_{CC} e θ_{PMP} , o valor desta

variável foi calculado por diferença ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$). Para a estimativa da porosidade de aeração na CC também uma única FPT é apresentada (Saxton e Raws, 2006), sendo para os demais autores seu valor calculado por diferença ($\theta_s - \theta_{CC}$).

Com base na Tabela 3, observa-se que as FPTs de Pidgeon (1972), Solano (2003) e Lal (1979) apresentaram os melhores desempenhos médios nos três solos para a estimativa de θ_{CC} . Para θ_{PMP} , os destaques para os três solos foram as FPTs de Arruda et al. (1987) e Urach (2007), além do modelo da FAO (1974), para o solo2, e os de Bell e van Keulen (1996), Oliveira et al. (2002) e Soil Survey (1990; 1992). FPTs com melhor desempenho para estimar θ_{CC} e θ_{PMP} foram desenvolvidas a partir de solos mais intemperizados, de clima tropical, principalmente da África, como Pidgeon (1972), Dijkermam (1988) e Lal (1979). Oliveira et al. (2002), Arruda et al. (1987), Solano (2003) e Urach (2007), cujas FPTs para essas umidades também se destacaram, utilizaram solos brasileiros, indicando que a eficiência das equações está vinculada à aplicação em solos de natureza similar.

As equações propostas para θ_{CC} e θ_{PMP} por Dijkermam (1988) e por Oliveira et al. (2002) resultaram nos melhores desempenhos para estimar a AD, para os três solos (Tabela 3), sendo inclusive superiores ao modelo de Aina e Periaswamy (1985), que utiliza além das frações granulométricas e os valores de densidade para estimar diretamente a AD.

Para a PA_{CC} , as FPTs para θ_{CC} e θ_{PMP} propostas por Solano (2003), Lal (1979) e Pidgeon (1972) resultaram em boas estimativas, para o três solos, superando o modelo de Saxton e Raws (2006), desenvolvido especificamente para estimar PA_{CC} . Para o solo 3 destaca-se ainda a FPT de Aina e Periaswamy (1985), apresentando o menor EM para essa variável.

A FPT proposta por Silva e Kay (1997) para estimar valores de RP, aplicada para diversos potenciais mátricos, apresentou o melhor desempenho geral para o solo 3 e o pior para o solo 2 (apesar do bom resultado para o potencial mátrico de -33 KPa).

Tabela 2. Funções de pedotransferência (FPTs) utilizadas neste estudo.

Autores	FPTs
Aina e Periaswamy (1985)	$\theta_{CC} = 0,55 (\text{Argila} + \text{Silte}) - 0,13 \text{Areia} \times \text{Ds} + 12,88$ $\theta_{PMP} = 0,31 \text{Argila} + 2,13$ $\theta_{CC-PMP} = 0,03 (\text{Argila} \times \text{Silte}) - 8,78 \text{Ds} + 14,01$
Arruda et al. (1987)	$Ug_{CC} = [3,07439 + 0,629239 (\text{Silte} + \text{Argila}) - 0,00343813 (\text{Silte} + \text{Argila})^2]/100$ $Ug_{PMP} = [398,889(\text{Silte} + \text{Argila}) / 1308,09 + (\text{Silte} + \text{Argila})]/100$
Bell e van Keulen (1996)	$Ug_{CC} = [48,7 + 0,974 \text{MO} - 28,3 \text{Ds} - 0,14 \text{Argila}]/100$
Bell e van Keulen (1995)	$Ug_{PMP} = [-0,992 + 0,351 \text{Argila} + 0,047 \text{MO}]/100$
Brakensiek (1984)	$K_s = 10 \exp [19,52348 \theta_s - 8,96847 - 0,028212 \text{Argila} + 0,00018107(\text{Areia})^2 - 0,0094125 (\text{Argila})^2 - 8,395215 \theta_s^2 + 0,077718 \text{Areia} \theta_s - 0,00298(\text{Areia})^2 \theta_s^2 - 0,019492(\text{Argila})^2 \theta_s^2 + 0,0000173(\text{Areia})^2 \text{Argila} + 0,02733(\text{Argila})^2 \theta_s + 0,001434 (\text{Areia})^2 \theta_s - 0,0000035(\text{Argila})^2 \text{Areia}]$
Dijkerman (1988)	$Ug_{CC} = [36,97 - 0,35 \text{Areia}]/100$ $Ug_{PMP} = [0,74 + 0,39 \text{Argila}]/100$
Dane e Puckett (1994)	$K_s = 303,84 \exp(-0,144 \times \text{Argila})$
FAO (1974)	$Ug_{PMP} = 0,23 \text{Argila} + 10$
Campbel e Shiozawa (1994)	$K_s = 54 \exp (-0,07 \times \text{Areia} - 0,167)$
Cosby et al. (1984)	$K_s = 25,4 \times 10 (-0,6 + 0,012 \times \text{Areia} - 0,0064 \times \text{Argila})$
Lal (1979)	$Ug_{CC} = 0,334 - 0,003 \text{Areia}$ $Ug_{PMP} = 0,247 - 0,003 \text{Areia}$
Oliveira et al. (2002)	$Ug_{CC} = 0,0000333 \text{Silte} + 0,0000387 \text{Argila}$ $Ug_{PMP} = 0,0000038 \text{Areia} + 0,0000153 \text{Silte} + 0,000034 \text{Argila} - 0,03086 \text{Ds}$
Pidgeon (1972)	$Ug_{CC} = [0,0361 + 0,0016 \text{Silte} + 0,003 \text{Argila} + 0,03 \text{CO}]/0,95$ $Ug_{PMP} = [-4,19 + 0,19 \text{Silte} + 0,39 \text{Argila} + 1,8 \text{CO}]/100$
Puckett et al. (1984)	$K_s = 156,96 \exp (-0,1975 \times \text{Argila})$
Saxton e Rawls (2006)	$\theta_{CC} = \theta_{CCt} + [1,283(\theta_{CCt})^2 - 0,374(\theta_{CCt}) - 0,015]$ $\theta_{CCt} = -0,251 \text{Areia} + 0,195 \text{Argila} + 0,011 \text{MO} + 0,006(\text{Areia} \times \text{MO}) - 0,027 (\text{Argila} \times \text{MO}) + 0,452 (\text{Areia} \times \text{Argila}) + 0,299$ $\theta_{PMP} = \theta_{PMPt} + (0,14 \times \theta_{PMPt} - 0,02)$ $\theta_{PMPt} = -0,024 \text{Areia} + 0,487 \text{Argila} + 0,006 \text{MO} + 0,005 (\text{Areia} \times \text{MO}) - 0,013(\text{Argila} \times \text{MO}) + 0,068 (\text{Areia} \times \text{Argila}) + 0,031$ $\theta_{S-CC} = \theta_{(S-CC)t} + (0,636\theta_{(S-CC)t} - 0,107)$ $\theta_{(S-CC)t} = 0,278 \text{Areia} + 0,034 \text{Argila} + 0,022 \text{MO} - 0,018(\text{Areia} \times \text{MO}) - 0,027(\text{Argila} \times \text{MO}) - 0,584(\text{Areia} \times \text{Argila}) + 0,078$ $\theta_s = \theta_{CC} + \theta_{(S-CC)} - 0,097 \text{Areia} + 0,043$ $K_s = 1930 (\theta_s - \theta_{CC})^{(3-\lambda)}$ $B = [\ln (1500) - \ln (33)]/\ln \theta_{CC} - \ln \theta_{PMP}$ $\lambda = 1/ B$
Silva e Kay (1997)	$RP = C1 \times \theta^{C2} \times \text{Ds}^{C3}$ $C1 = \exp(3,67 + 0,765 \text{CO} - 0,145 \text{Argila})$ $C2 = -0,481 + 0,208 \text{CO} - 0,124 \text{Argila}$ $C3 = 3,85 + 0,0963 \text{Argila}$
Soil Survey (1975, 1990, 1992)	$Ug_{PMP} = 0,4 \text{Argila}$ $Ug_{PMP} = 0,33 \text{Argila}$ $Ug_{PMP} = 0,33 \text{Argila} + \text{CO}$
Solano (2003)	$Ug_{CC} = 0,01188 + 0,00002769 \text{Argila} + 0,00002335 \text{Silte} + 0,00246 \text{MO}$ $Ug_{PMP} = -0,01368 + 0,000022619 \text{Argila} + 0,00001409 \text{Silte} + 0,00123 \text{MO}$
Urach (2007)	$Ug_{CC} = 0,643 - 0,00238 \text{Areia} - 0,26767 \text{Ds}$ $Ug_{PMP} = 0,462 - 0,0022 \text{Areia} - 0,00074 \text{Silte} - 0,1838 \text{Ds}$

Obs 1: Ug_{CC} e Ug_{PMP} = umidade gravimétrica (kg.kg^{-1}); θ_{CC} e θ_{PMP} = umidade volumétrica nos potenciais mátricos de -33 e -1500 kPa; θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Argila = (%); Silte = (%); Areia = (%); Matéria Orgânica (MO) = (g kg^{-1}); Carbono Orgânico (CO) = (%); Densidade do solo (Ds) = (Mg m^{-3}); Densidade ajustada pelo fator (DF) = (Mg m^{-3}); Densidade ajustada (D_{DF}) = (Mg m^{-3}); K_s = Condutividade do solo saturado (mm h^{-1}); B e λ = coeficientes da curva de retenção de água; RP = resistência do solo à penetração.

As Tabelas 3 e 4 trazem, ainda, os coeficientes de correlação entre os valores previstos e observados, para todas as variáveis discutidas anteriormente. Tais valores revelam que alguns modelos apresentam desempenho satisfatório para os três solos, enquanto outros apresentam desempenho destacado para um dos solos e sofrível para outros.

Tabela 3. Erro médio (EM), raiz do erro quadrado médio (REQM) e coeficiente de correlação (R) dos valores estimados de θ_{PMP} , θ_{CC} , AD e PA_{CC} pelas FPTs para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Autores	Variável	EM			REQM			R		
		Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Aina e Periaswamy (1985)	θ_{1500}	-0,04	-0,09	-0,05	0,00	0,01	0,01	0,05	0,84	0,99
	θ_{CC}	0,10	0,18	-0,05	0,01	0,04	0,00	0,07	0,89	1,00
	AD _{est}	0,08	0,37	0,02	0,01	0,20	0,00	0,10	0,23	0,88
	PA_{CC}	0,11	0,05	0,36	0,02	0,02	0,14	0,79	0,52	0,98
Arruda et al. (1987)	AD	0,14	0,27	0,00	0,02	0,09	0,00	0,12	0,20	0,91
	θ_{1500}	0,02	0,00	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,88	0,90	0,99
	θ_{CC}	0,25	0,23	0,04	0,07	0,06	0,00	0,86	0,47	0,99
	AD	0,23	0,24	0,08	0,05	0,06	0,01	0,19	0,25	0,97
Bell e van Keulen (1995, 1996)	PA_{CC}	-0,25	-0,24	-0,04	0,07	0,08	0,00	0,97	0,25	0,94
	θ_{1500}	0,01	-0,07	-0,06	0,00	0,01	0,01	0,49	0,75	0,95
	θ_{CC}	-0,07	-0,01	0,16	0,01	0,01	0,03	0,73	0,71	0,99
	AD	-0,08	0,06	0,22	0,01	0,01	0,06	0,24	0,51	0,89
Dijkerman (1988)	PA_{CC}	0,07	0,01	-0,16	0,01	0,01	0,03	0,49	0,34	1,13
	θ_{1500}	0,05	-0,04	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,88	0,90	0,99
	θ_{CC}	0,03	0,02	-0,04	0,00	0,00	0,01	0,73	0,72	0,99
	AD	-0,02	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	0,31	0,10	0,17
FAO (1974)	PA_{CC}	-0,03	-0,02	0,04	0,00	0,00	0,01	0,98	0,92	0,52
	θ_{1500}	0,07	-0,01	0,06	0,01	0,00	0,01	0,83	0,24	0,83
	θ_{1500}	-0,06	-0,07	-0,11	0,00	0,01	0,02	0,89	0,90	0,99
	θ_{CC}	0,02	-0,01	-0,04	0,00	0,00	0,01	0,74	0,97	1,00
Lal (1979)	AD	0,08	0,06	0,08	0,01	0,00	0,01	0,02	0,11	0,73
	PA_{CC}	-0,02	0,01	0,04	0,00	0,00	0,01	0,99	0,91	0,27
	θ_{1500}	-0,01	-0,06	-0,06	0,00	0,00	0,01	0,86	0,91	0,00
	θ_{CC}	0,03	0,01	-0,06	0,00	0,00	0,01	0,67	0,99	1,00
Oliveira et al. (2002)	AD	0,04	0,07	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,29	0,91
	PA_{CC}	-0,03	-0,01	0,06	0,00	0,00	0,01	0,98	0,93	0,68
	θ_{1500}	0,02	-0,02	-0,07	0,00	0,00	0,01	0,86	0,71	0,98
	θ_{CC}	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,81	0,95	0,99
Pidgion (1972)	AD	-0,18	-0,23	-0,05	0,03	0,06	0,03	0,18	0,15	0,60
	PA_{CC}	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,99	0,82	0,76
	θ_{1500}	0,08	0,02	-0,02	0,01	0,00	0,00	0,08	0,86	0,98
	θ_{CC}	-0,16	-0,14	0,16	0,03	0,03	0,08	0,07	0,89	1,00
Saxton e Raws (2006)	AD	0,08	0,10	0,04	0,01	0,01	0,00	0,05	0,16	0,88
	PA_{CC}	-0,16	-0,12	-0,02	0,03	0,02	0,00	0,84	0,98	0,98
	θ_{1500}	-0,04	-0,10	-0,07	0,00	0,01	0,01	0,59	0,84	0,99
	θ_{1500}	0,01	-0,07	-0,06	0,00	0,01	0,01	0,72	0,74	0,99
Soil Survey (1975, 1990, 1992)	θ_{1500}	0,01	-0,06	-0,04	0,00	0,01	0,00	0,23	0,24	0,92
	θ_{1500}	-0,05	-0,09	-0,06	0,00	0,01	0,01	0,85	0,72	0,98
	θ_{CC}	0,00	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	0,98
	AD	0,05	0,07	0,04	0,00	0,01	0,00	0,08	0,18	0,95
Solano (2003)	PA_{CC}	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,98	0,82	0,84
	θ_{1500}	0,03	-0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,88	0,77	0,77
	θ_{CC}	0,11	0,06	0,09	0,01	0,01	0,02	0,88	0,88	0,94
	AD	0,09	0,09	0,08	0,01	0,01	0,01	0,00	0,29	0,52
Urach (2007)	PA_{CC}	-0,11	-0,06	-0,09	0,01	0,01	0,02	0,99	0,83	0,20

A FPT proposta por Saxton e Raws (2006) foi a que apresentou melhor correlação entre os valores medidos e estimados de condutividade hidráulica do solo saturado para os três solos estudados, enquanto a de Dane e Puckett (1994) apresentou um desempenho satisfatório para o solo 3. Apesar destes destaques, para todos os modelos houve uma grande discrepância de escala entre os valores previstos e observados. A FPT de Saxton e Raws (2006) talvez tenha sido superior por levar em consideração os valores de MO, sendo este atributo bastante variável nestes solos.

As funções de pedotransferência propostas por alguns desses autores foram desenvolvidas a partir de atributos determinados em solos de clima temperado ou com grandes diferenças texturais, como as de Saxton e Raws (2006) e de Silva e Kay (1997). Este fato ocasiona que sejam dadas importâncias equivocadas aos coeficientes de ajustes dessas equações, tornando-as pouco apropriadas para outros tipos de solos. Isto parece reforçar a idéia de que a utilização de pedofunções deve basear-se em calibrações locais, como destacado por Coelho et al. (1998).

Tabela 4. Erro médio (EM), raiz do erro quadrado médio (REQM) e coeficiente de correlação (R) dos valores estimados de Ks e RP pelas FPTs para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

		EM			REQM			R		
		Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Brakensiek et al. (1984)	Ks	-189,33	-243,63	-211,79	93987,07	88800,46	67437,09	0,97	0,28	0,64
Campbell e Shiozawa (1994)	Ks	-192,94	-247,52	-217,45	97638,06	90313,99	68820,28	0,30	0,68	0,81
Cosby et al. (1984)	Ks	-181,78	-238,46	-164,66	93701,77	87622,81	42283,03	0,18	0,88	0,90
Dane e Puckett (1994)	Ks	-192,52	-246,80	-128,42	97527,91	90110,57	24832,61	0,31	0,70	0,87
Puckett et al. (1984)	Ks	-192,92	-247,48	-182,72	97633,80	90305,13	48308,52	0,33	0,63	0,85
Saxton e Raws (2006)	Ks	-189,69	-237,69	-117,60	94781,93	85684,19	22223,18	0,88	0,03	0,93
	Ks	-148,51	-197,24	-116,80	62925,37	70498,23	22027,32	0,99	0,08	0,97
Silva e Kay (1997)	RP ₁₀	0,53	-0,60	0,63	1,36	1,95	3,45	0,91	0,20	0,69
	RP ₃₃	0,77	-0,39	0,52	4,27	1,57	5,09	0,69	0,39	0,71
	RP ₁₀₀	0,90	-1,14	0,37	11,99	3,89	6,72	0,34	0,45	0,71
	RP ₅₀₀	-0,98	-2,50	-0,01	49,30	16,18	10,05	0,04	0,45	0,71
	RP ₁₅₀₀	-1,30	-2,82	-0,26	77,72	19,97	13,22	0,003	0,39	0,58

Aplicando-se as FPTs disponíveis aos três solos estudados, verifica-se na Tabela 3 e 4 que a maior parte apresenta resíduos estatísticos com razoável nível de correlação com as próprias variáveis de entrada, indicando que se os coeficientes dos modelos utilizados fossem reajustados poderia haver uma melhoria na capacidade preditiva para os solos em questão.

Os coeficientes foram então reajustados para todas as equações apresentadas na Tabela 2, e as FPTs que apresentaram melhoria em sua previsão estão apresentadas na Tabela 5 com seus coeficientes modificados. Foram calculados os valores de EM, RQEM e R para os modelos modificados sendo então apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Enquanto na maior parte dos modelos verifica-se uma melhoria em seu desempenho (Tabela 6 e 7), alguns deles não foram bem sucedidos em estimar os valores dos atributos físicos do solo. Enquanto para Lal (1979) quanto a AD o reajuste da equação não surtiu efeito, para θ_{PMP} de Saxton e Raws (2006) houve redução do EM de 0,08 para -0,0022 para o solo 1, de 0,02 para 0,0042 para o solo 2 e de -0,02 para -0,0018 para o solo 3.

Tabela 5. Funções de pedotransferência (FPTs) com coeficientes modificados.

Autores	FPTs modificadas
Aina e Periaswamy (1985)	$\theta_{CC} = 0,47 (\text{Argila} + \text{Silte}) - 0,23 \text{ Areia} \times \text{Ds} + 39$ $\theta_{PMP} = 0,4458 \text{ Argila} + 3,15$ $\theta_{CC-PMP} = -2,53 (\text{Argila} \times \text{Silte}) - 4,98 \text{ Ds} + 10,538$
Arruda et al. (1987)	$U_{GCC} = [-10,5132 + 0,5483041 (\text{Silte} + \text{Argila}) - 4,1039 (\text{Silte} + \text{Argila})^2]/100$ $U_{GPMP} = [35227,19 (\text{Silte} + \text{Argila}) / 132230,5 + (\text{Silte} + \text{Argila})]/100$
Bell e van Keulen (1996)	$U_{GCC} = [23,3 + 0,335 \text{ MO} - 16,52 \text{ Ds} - 0,3345 \text{ Argila}]/100$
Bell e van Keulen (1995)	$U_{GPMP} = [-1,39 + 0,3442 \text{ Argila} + 0,275 \text{ MO}]/100$
Brakensiek (1984)	$K_s = 10 \exp [55,6702 \theta_s - 7,155368 - 58,69 \text{ Argila} + 25,929784 (\text{Areia})^2 - 271,5239 (\text{Argila})^2 - 103,4668 \theta_s^2 - 68,57035 \text{ Areia} \theta_s + 319,86108 (\text{Areia})^2 \theta_s^2 - 106,2855 (\text{Argila})^2 \theta_s^2 - 69,61329 (\text{Areia})^2 \text{ Argila} + 439,77233 (\text{Argila})^2 \theta_s - 147,3975 (\text{Areia})^2 \theta_s - 137,2734 (\text{Argila})^2 \text{ Areia}]$
Dijkerman (1988)	$U_{GCC} = [36,23 - 0,34 \text{ Areia}]/100$ $U_{GPMP} = [-3,46 + 0,37 \text{ Argila}]/100$
Dane e Puckett (1994)	$K_s = 256,98882 \exp(-0,45378 \times \text{Argila})$
FAO (1974)	$U_{GPMP} = 0,3753 \text{ Argila} + 1,41$
Campbel e Shiozawa (1994)	$K_s = 7535,973 \exp(-0,0334 \times \text{Areia} - 0,5285)$
Cosby et al (1984)	$K_s = 63,347463 \times 10 (2,0753471 - 0,0145 \times \text{Areia} - 0,0229 \times \text{Argila})$
Lal (1979)	$U_{GCC} = 0,3624 - 0,00334 \text{ Areia}$ $U_{GPMP} = 0,3082 - 0,003 \text{ Areia}$
Oliveira et al. (2002)	$U_{GCC} = 0,0000333 \text{ Silte} + 0,0000387 \text{ Argila}$ $U_{GPMP} = 0,0000018 \text{ Areia} + 0,000041 \text{ Silte} + 0,000045 \text{ Argila} - 0,12 \text{ Ds}$
Pidgeon (1972)	$U_{GCC} = [0,02191 + 0,0029 \text{ Silte} + 0,003 \text{ Argila} + 0,06 \text{ CO}]/0,95$ $U_{GPMP} = [-1,69183 + 0,31 \text{ Silte} + 0,26 \text{ Argila} + 4,48 \text{ CO}]/100$
Puckett et al. (1984)	$K_s = 256,9886 \exp(-0,45378 \times \text{Argila})$
Saxton e Rawls (2006)	$\theta_{PMP} = \theta_{PMPt} - (0,055 \times \theta_{PMPt} + 0,101)$ $\theta_{PMPt} = -0,404 \text{ Areia} - 0,099 \text{ Argila} - 0,146 \text{ MO} + 0,166 (\text{Areia} \times \text{MO}) - 0,261 (\text{Argila} \times \text{MO}) - 0,067 (\text{Areia} \times \text{Argila}) + 0,299$ $K_s = 1633,674 (\theta_s - \theta_{CC})^{(1,715169 - \lambda)}$ $B = [\ln(1500) - \ln(33)] / \ln \theta_{CC} - \ln \theta_{PMP}$ $\lambda = 1/B$
Soil Survey (1975, 1990, 1992)	$U_{GPMP} = 0,30 \text{ Argila}$ $U_{GPMP} = 0,30 \text{ Argila}$ $U_{GPMP} = 0,28 \text{ Argila} + \text{CO}$
Solano (2003)	$U_{GCC} = -0,02 + 0,000032 \text{ Argila} + 0,000030 \text{ Silte} + 0,004 \text{ MO}$ $U_{GPMP} = -0,02 + 0,000026 \text{ Argila} + 0,000031 \text{ Silte} + 0,003 \text{ MO}$
Urach (2007)	$U_{GCC} = 0,643 - 0,0035 \text{ Areia} - 0,26767 \text{ Ds}$ $U_{GPMP} = 0,47 - 0,0029 \text{ Areia} - 0,0004 \text{ Silte} - 0,17 \text{ Ds}$

Obs 1: U_{GCC} e U_{GPMP} = umidade gravimétrica ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); θ_{CC} e θ_{PMP} = umidade volumétrica nos potenciais mátricos de -33 e -1500 kPa; θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); Argila = (%); Silte = (%); Areia = (%); Matéria Orgânica (MO) = ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); Carbono Orgânico (CO) = (%); Densidade do solo (Ds) = ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$); Densidade ajustada pelo fator (DF) = ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$); Densidade ajustada (D_{DF}) = ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$); K_s = Condutividade do solo saturado ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); B e λ = coeficientes da curva de retenção de água.

Tabela 6. Erro médio (EM), raiz do erro quadrado médio (REQM) e coeficiente de correlação (R) dos valores estimados de θ_{PMP} , θ_{CC} , AD e PA_{CC} pelas FPTs modificadas para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo(solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Autores	Variável	EM			REQM			R		
		Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Aina e Periaswamy (1985)	θ_{1500}	0,04	-0,01	-0,02	0,05	0,03	0,05	0,07	0,89	1,00
	θ_{CC}	0,00	0,02	-0,02	0,05	0,05	0,07	-0,32	0,76	0,97
	AD _{est}	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	-0,01	-0,20	0,72
	PA_{CC}	0,00	-0,02	0,02	0,05	0,05	0,07	0,94	0,86	0,99
Arruda et al. (1987)	θ_{1500}	0,01	0,00	-0,04	0,02	0,02	0,07	0,84	0,97	0,99
	θ_{CC}	0,23	0,25	0,04	0,25	0,26	0,06	0,92	0,90	0,99
	AD	0,22	0,25	0,08	0,24	0,25	0,09	0,21	0,37	0,97
	PA_{CC}	-0,23	-0,25	-0,04	0,25	0,26	0,06	0,95	0,37	0,94
Bell e van Keulen (1995, 1996)	θ_{1500}	0,04	-0,04	-0,01	0,04	0,07	0,03	0,79	0,37	0,98
	θ_{CC}	0,02	-0,01	-0,01	0,04	0,06	0,03	0,13	0,40	0,99
	AD	-0,02	0,03	0,00	0,04	0,04	0,02	0,06	0,27	0,86
	PA_{CC}	-0,02	0,01	0,01	0,04	0,06	0,03	0,96	0,71	0,93
Dijkerman (1988)	θ_{1500}	0,05	-0,04	-0,04	0,06	0,06	0,06	0,81	0,72	0,99
	θ_{CC}	0,03	0,01	-0,05	0,03	0,03	0,10	0,88	0,90	0,99
	AD	-0,02	0,05	-0,01	0,03	0,07	0,04	0,54	0,10	0,11
	PA_{CC}	-0,03	-0,01	0,05	0,03	0,03	0,10	0,98	0,92	0,51
FAO (1974)	θ_{1500}	0,05	-0,04	-0,03	0,06	0,06	0,06	0,74	0,70	0,99
Lal (1979)	θ_{1500}	0,02	0,00	-0,03	0,03	0,02	0,07	0,87	0,96	0,98
	θ_{CC}	0,03	0,01	-0,05	0,03	0,03	0,10	0,88	0,90	0,99
	AD	0,00	0,01	-0,01	0,01	0,02	0,04	0,17	0,39	0,97
	PA_{CC}	-0,03	-0,01	0,05	0,03	0,03	0,10	0,98	0,92	0,51
Oliveira et al. (2002)	θ_{1500}	0,02	0,01	-0,02	0,04	0,02	0,05	0,24	0,95	1,00
	θ_{CC}	0,03	0,01	-0,06	0,04	0,03	0,10	0,86	0,91	0,99
	AD	0,01	0,00	-0,04	0,04	0,02	0,06	0,01	0,47	0,36
	PA_{CC}	-0,03	-0,01	0,06	0,04	0,03	0,10	0,98	0,93	0,68
Pidgeon (1972)	θ_{1500}	0,01	0,00	-0,01	0,02	0,03	0,03	0,89	0,84	0,97
	θ_{CC}	0,01	0,01	-0,02	0,02	0,05	0,04	0,80	0,69	0,98
	AD	-0,21	-0,25	-0,13	0,21	0,26	0,17	0,05	0,07	0,96
	PA_{CC}	-0,01	-0,01	0,02	0,02	0,05	0,04	0,98	0,83	0,94
Saxton e Raws (2006)	θ_{1500}	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01	0,25	0,96	1,00
	θ_{CC}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	AD	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	PA_{CC}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soil Survey (1975, 1990, 1992)	θ_{1500}	0,04	-0,04	-0,04	0,05	0,06	0,07	0,80	0,74	0,99
	θ_{1500}	0,00	-0,07	-0,06	0,02	0,09	0,08	0,77	0,74	0,99
	θ_{1500}	0,01	-0,06	-0,04	0,02	0,08	0,07	0,81	0,66	0,99
Solano (2003)	θ_{1500}	0,01	0,00	-0,01	0,02	0,03	0,03	0,89	0,84	0,97
	θ_{CC}	0,01	0,01	-0,02	0,02	0,05	0,04	0,80	0,69	0,98
	AD	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,07	0,96
	PA_{CC}	-0,01	-0,01	0,02	0,02	0,05	0,04	0,98	0,83	0,94
Urach (2007)	θ_{1500}	0,02	0,00	-0,03	0,03	0,02	0,07	0,88	0,96	0,98
	θ_{CC}	0,03	0,01	-0,05	0,03	0,03	0,10	0,88	0,90	0,99
	AD	0,01	0,01	-0,01	0,01	0,02	0,04	0,23	0,53	0,97
	PA_{CC}	-0,03	-0,01	0,05	0,03	0,03	0,10	0,98	0,92	0,51

Tabela 7. Erro médio (EM), raiz do erro quadrado médio (REQM) e coeficiente de correlação (R) dos valores estimados de Ks pelas FPTs modificadas para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo(solo 2) e o Neossolo (solo 3).

	EM			REQM			R		
	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Brakensiek et al. (1984)	-19,02	-3,20	16,79	3617,5	972,94	3604,77	0,30	0,68	0,81
Campbel e Shiozawa (1994)	-57,99	28,36	20,12	66294,5	9867,7	14340,56	0,18	0,88	0,90
Cosby et al. (1984)	-57,98	28,36	20,12	66293,8	9867,9	14340,94	0,33	0,63	0,85
Dane e Puckett (1994)	13,83	-38,66	21,85	61112,45	32536,9	18455,34	0,31	0,70	0,87
Puckett et al. (1984)	13,83	-38,66	21,85	61112,4	32536,9	18455,33	0,97	0,28	0,64
Saxton e Raws (2006)	-18,13	-55,75	69,24	159,53	196,29	87,50	0,93	0,04	0,94

Outra possibilidade é ampliar o número de variáveis de entrada, o que, por um lado, cria mais demandas analíticas, mas, por outro, pode tornar as FPTs mais eficientes. Tal afirmação pode ser corroborada, no presente trabalho, pela relação existente entre os resíduos estatísticos e outras variáveis que não estavam incluídas no modelo. Como exemplo, cita-se a inclusão da PT no modelo de Saxton e Raws (2006), o que reduziu a previsão de EM de -0,0022 para 0,0005 para o solo 1, de 0,0042 para 0,0028 para o solo 2 e de -0,0018 para -0,0030 para o solo 3. (Figura 1c e Tabela 7).

Tabela 8. Função de pedotransferência proposta por Saxton e Raws (2006) modificada e com a inclusão da PT para estimar a θ_{PMP} .

Modificada	$\theta_{PMP} = \theta_{PMPt} + (-0,055 \times \theta_{PMPt} - 0,101)$ $\theta_{PMPt} = -0,404 \text{ Areia} - 0,099 \text{ Argila} - 0,146 \text{ MO} + 0,166 \text{ (Areia} \times \text{MO)} - 0,261 \text{ (Argila} \times \text{MO)} - 0,067 \text{ (Areia} \times \text{Argila)} + 0,299$
Com inserção da PT	$\theta_{PMP} = [\theta_{PMPt} + (0,098 \times \theta_{PMPt} - 0,033)] \times 0,967 \text{ PT} + 0,330$ $\theta_{PMPt} = -0,835 \text{ Areia} - 0,224 \text{ Argila} - 0,220 \text{ MO} + 0,278 \text{ (Areia} \times \text{MO)} - 0,377 \text{ (Argila} \times \text{MO)} + 0,116 \text{ (Areia} \times \text{Argila)} + 0,110$

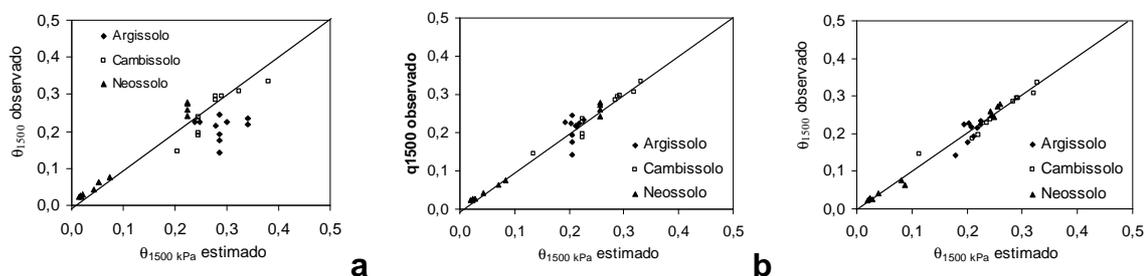


Figura 1. Valores de θ_{PMP} observados e estimados (a), modificados (b) e com a inclusão da PT na FPT proposta por Saxton e Raws (2006) (c), em relação à reta 1:1, para os solo 1, 2 e 3.

Thurler (2000) obteve pedofunções para a determinação da retenção de água em diferentes tensões e da capacidade de campo “em situ” de quatro solos do Terciário da Formação Barreiras, três destes localizados no Norte Fluminense. As pedofunções foram obtidas por meio de regressões múltiplas que selecionaram as combinações de variáveis independentes que tiveram maior correlação com as variáveis dependentes. Este autor verificou que, para estes solos, mais de três variáveis independentes sistematicamente não melhoraram os erros de estimativa.

Os valores medidos e estimados pelas FPTs para os atributos físicos dos três solos estudados foram plotados em gráficos de dispersão, de modo que se possa relacioná-los com a reta 1:1. Estes gráficos estão apresentados nas Figuras 1 a 5 no Apêndice 2, pelos quais pode-se reiterar as afirmações anteriores.

CONCLUSÕES

As funções de pedotransferência utilizadas devem ser aplicadas levando-se em consideração as classes texturais e a condição física do solo por serem altamente dependentes de atributos determinantes destes fatores.

Devem-se considerar minuciosamente os coeficientes de ajuste das FPTs, para se evitar uma equivocada interpretação do comportamento de seus atributos dependentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aina, P.O. Periaswamy, S.P. (1985) Estimating available water-holding capacity of Western Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. *Soil Sci.* 140:55–58.
- Arruda, F.B., Júlio Jr., J. and Oliveira, J.B. (1987) Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 11:11–15.
- Bailey, A.C.; Johnson, C.E.; Schafer, R.L. (1986) A model for agricultural soil compaction. *J. Agric. Eng. Res.*, 33:257-262.
- Bell, M.A.; van Keulen, H. (1995) Soil pedotransfer functions for four mexican soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:865-871.
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE*, 33: 519-524.
- Busscher, W.J.; Bauer, P.J.; Camp, C.R.; Sojka, R.E. (1997) Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. *Soil Till. Res.*, 43:205-217.

- Coelho, E.F.; Conceição, M.A.F.; Souza, V.A.B. (1998) Estimativa dos limites de disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. *Rev. Ceres*, 45:183- 192.
- Dijkerman, J. C. (1988) An Ustult-Aquult-Tropept Catena in Sierra Leone, West Africa, II. Land Qualities and Land. *Geoderma*,42: 29-49.
- Embrapa (1997). *Manual de métodos de análise de solos*. 2.ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos – Embrapa Solos, 212p.
- FAO (1974) Management properties of Ferralsols. In: *FAO Soils Bull.* 23, FAO, Rome.
- Gregorich, G. (2006) *Quality. Encyclopedia of Soil Science*. Columbus: Taylor & Francis Group, 1388-1391.
- Hillel, D. (1998) .Flow of water in unsaturated soil. In: HILLEL, D. *Environmental soil physics*. New York: Academic Press, p.203-241.
- Lal, R., (1979) Physical characteristics of soils of the tropics: determination and management. In: Lal, R. and Greenland, D.J., Editors, 1979. *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics*, John Wiley, Chichester, pp. 7–44.
- Oliveira L. B.; Ribeiro M. R.; Jacomine P. K. T.; Rodrigues, J. V. V.; Marques, F. A. (2002) Funções de Pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:315-323
- Passioura, J.B. (2002) *Soil condictions and plant growth*. *Plant Cell Environ.*, 25:311-318.
- Peçanha, A.L. (2007) Relações hídricas e trocas gasosas do coqueiro anão verde em função da compactação, lâmina de irrigação e classe de solo. *Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 78p.*
- Pidgeon, J.D., (1972) The measurement and prediction of available water capacity of Ferrallitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.* 23: 431–441.
- Santos, G; Camargo, F. (1999) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Ed Gênese edições. Porto Alegre, Brasil, 508 p.
- Saxton, K. E. Rawls, W. J.: (2006) Soil water characteristic estimates by texture and organic 30 matter for hydrologic solutions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:1569–1578.
- Scheinost, A.C.; Sinowski, W.; Auerswald, K. (1997) Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, 78:129-143.

- Silva, A.P.; Kay, B.D. (1997) Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883.
- Silva, A.P.; Kay, B.D.; (1994) Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781.
- Soil Survey Staff, (1975) Soil Taxonomy. Soil Conservation Service, USDA. In: *Agriculture Handbook* 436, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C.
- Soil Survey Staff (1990) Keys to Soil Taxonomy. In: (4th ed.), *SMSS Tech. Monogr.* 19, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg. Soil Conserv. Serv., USDA, Washington, D.C.
- Soil Survey Staff (1992) Keys to Soil Taxonomy. In: (5th ed.), *SMSS Tech. Monogr.* 19, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg. Soil Conserv. Serv., USDA, Washington, D.C.
- Solano, P.J.E. (2003) Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul. 2003, 117f. *Dissertação* (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Thurler, A.M. (2000) Determinação da capacidade de campo e retenção de umidade em solos do Terciário da Formação Barreira em função de suas características granulométricas e fatores estruturais. *Tese* (Doutorado em Ciência do Solo) – Seropédica-RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. 144p.
- To, J.; Kay, B.D. (2005) Variation in penetrometer resistance with soil properties: The contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126:261-276.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P. (2002) Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:305-314.
- Urach, F.L. (2007) Estimativa de retenção de água em solos para fins de irrigação. 2007. 81p *Dissertação* (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- Valicheski, R.R. (2008) Atributos químicos do solo, estado nutricional e desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solos sob diferentes níveis de compactação e umidade. *Tese* (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- van Genuchten, M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898.

3.3 Inclusão e substituição de variáveis físicas do solo em modelos estatísticos clássicos para a reinterpretação de resultados experimentais

RESUMO

O conhecimento dos atributos físicos do solo e suas inter-relações são essenciais ao manejo adequado do solo para as culturas agrícolas. O objetivo neste trabalho foi inserir e/ou substituir variáveis físicas do solo em modelos estatísticos a fim de melhor explicar os diversos aspectos do desenvolvimento das plantas. O presente trabalho foi desenvolvido a partir dos dados obtidos no experimento conduzido em conjunto com Peçanha (2007) e Valicheski (2008) em casa de vegetação, no município de Campos dos Goytacazes - RJ. Um Argissolo Amarelo e um Cambissolo Háplico foram submetidos a quatro níveis de compactação e a quatro condições hídricas. Modelos matemáticos foram obtidos incluindo e/ou substituindo variáveis-tratamento por outras que lhe são reconhecidamente correlacionadas reduzindo, assim, os resíduos estatísticos. Os dados foram submetidos a uma análise de trilha para o estudo da natureza dos efeitos dos atributos de solo sobre as variáveis-resposta da planta. Quando se procedeu a substituição entre as variáveis que possuem alta correlação, estabeleceram relações fisicamente mais adequadas, ainda que equivalentes do ponto de vista matemático, como ocorreu com a porosidade total (PT) em vez da densidade (D_s) e a água efetivamente disponível (AD_{efet}) em vez da umidade efetiva (θ_{efet}). A porosidade de aeração efetiva (PA_{efet}) foi incluída em alguns casos, e substituiu a D_s e a θ_{efet} em outros, possivelmente traduzindo um efeito dessas variáveis. Para outras variáveis que apresentam correlação mais baixa com as demais, como a resistência à penetração efetiva (RP_{efet}), a tensão efetiva (τ_{efet}) e a condutividade efetiva (K_{efet}) estas foram acrescentadas aos modelos melhorando sua qualidade preditiva. Não foi possível pela análise de trilha confirmar a colinearidade entre variáveis e nem identificar a natureza dos efeitos das variáveis físicas do solo utilizadas neste trabalho.

ABSTRACT

Knowledge of soil physical attributes and their interrelationships are essential to adequate soil management for agricultural crops. The objective was to enter and/or replace soil physical variables in statistical models to better explain

various aspects of plant development. This work was developed from data obtained in the experiment conducted in conjunction with Peçanha (2007) and Valicheski (2008) in a greenhouse in the town of Goytacazes RJ. A Yellol Argisol and a Haplic Cambisol were subjected to four levels of compression and four water conditions. Mathematical models were obtained including and/or replacing other treatment variables that are known to correlate, thereby reducing the waste statistics. Data were subjected to a path analysis to study the nature of the effects of soil attributes on plant response variables. When carried out substitution between the variables that it possesses high correlation, established relationships physically more appropriate, although the equivalent mathematical point of view, as with the total porosity (TP) rather than density (Ds) and the water actually available (AD_{efet}) instead of effective moisture (θ_{efet}). The effective aeration porosity (PA_{efet}) was included and in some cases, and replacing the Ds and θ_{efet} in others, possibly reflecting an effect of these variables. For other variables that have the lowest correlation with the others, such as resistance to penetration effective (RP_{efet}), were the effective stress (τ_{efet}), and conditiva effective (K_{efet}) added to these models improving its predictive quality. Unable path analyses confirm the collinearity between variables, nor identify the nature of the effects of soil physical variables used in this paper.

INTRODUÇÃO

Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações em suas propriedades físicas, as quais podem ser permanentes ou temporárias. Assim, o interesse em avaliar a qualidade física do solo tem sido incrementado por considerá-lo como um componente fundamental na manutenção e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola (Lima et al., 2004).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando-se diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: compactação do solo (Hakansson et al., 1988), densidade (De Maria et al., 1999), resistência do solo à penetração das raízes (Tormena e Roloff, 1996), estrutura (Ribeiro, 1999), porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (Beutler et al., 2001), adsorção e absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (Dürr e Aubertot, 2000). As

modificações nestas propriedades ocasionadas pelo manejo inadequado resultam em decréscimo de produção (Radford et al., 2001), aumento da suscetibilidade do solo a erosão e aumento da potência necessária para o preparo do solo (Canillas e Salokhe, 2002).

A relação entre atributos do solo e o desempenho das culturas agrícolas pode ser avaliada pela análise de dados obtidos tanto em áreas de produção quanto em experimentos planejados. No primeiro caso, as ferramentas estatísticas podem ser desde a correlação simples até as análises multivariadas. No segundo caso, as ferramentas mais frequentes são a análise de variância (em que se considera determinado arranjo entre tratamentos e desenho experimental), seguida de testes de comparação de médias ou análises de regressão (Box e Draper, 1987).

Em experimentos planejados, a inclusão de outras fontes de variação no modelo e a utilização de análise multivariada pode levar à redução do erro experimental e/ou permitir quantificar a contribuição relativa de cada variável independente sobre o comportamento da variável resposta (Valentin, 2000).

Mesmo em um experimento simples (com apenas uma variável tratamento), a consideração do efeito de uma ou mais variáveis quantitativas pode levar à obtenção de uma superfície de resposta (uma equação em que duas ou mais variáveis independentes, impostas ou não por tratamentos, interferem em uma variável resposta).

Os modelos estatísticos clássicos tornam-se menos sensíveis em sistemas biológicos, em razão das particularidades próprias de cada manejo, e não consideram o efeito conjunto de inúmeros fatores e características para promover as respostas ao manejo. A análise estatística multivariada, entretanto, permite detectar e descrever padrões estruturais, espaciais e temporais nas comunidades biológicas, e formular hipóteses baseadas nos numerosos fatores bióticos e abióticos que interferem sobre tais características (Valentin, 2000).

A análise de fatores consiste em um conjunto de métodos estatísticos que procuram explicar o comportamento de grande número de variáveis observadas, em termos de número menor de variáveis latentes ou de fatores. As variáveis são agrupadas por meio de suas correlações, e as que caracterizam determinado fator estão fortemente correlacionadas entre si, mas fracamente em outro fator (Johnson e Wichern, 1988).

Entre as causas de variação no crescimento de plantas submetidas a diferentes condições de ambiente, a qualidade do solo e o manejo cultural são vistos como fatores comumente responsáveis por parte significativa dessa variação. O estudo dos efeitos dos vários fatores do solo sobre o crescimento das plantas pode ser feito de maneira isolada, pela análise de correlação simples, ou conjunta, envolvendo vários caracteres em um sistema causal de efeitos diretos e indiretos. Esse tipo de análise pode permitir a interpretação das relações físicas existentes entre as variáveis dependentes e independentes.

As análises de correlação, contudo, não dão a exata importância relativa dos efeitos diretos e indiretos dos fatores sobre a variável dependente (Cruz e Regazzi, 1994). A técnica de análise de trilha consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres em uma variável básica, em que as estimativas dos efeitos são obtidas por meio de equações de regressão, nas quais as variáveis são previamente padronizadas (Bhatt, 1973; Santos et al., 1994). A análise de trilha é composta por uma expansão da regressão múltipla quando estão envolvidas inter-relações complexas (Cruz e Carneiro, 2003). As informações obtidas por meio desses estudos serão tão mais precisas quanto melhor o método utilizado para o tratamento estatístico dos dados.

Fiorio et al. (2005), estudando equações discriminantes para tipo de solo de um conjunto de tipos desenvolvidos na região de Barra Bonita (SP), avaliaram o efeito de colinearidade das variáveis, para evitar quaisquer possibilidades de tendenciosidade na análise, uma vez que duas ou mais variáveis poderiam estar sobrepondo-se. Borges e Coutinho (2004), ao estudarem a distribuição, os teores e as quantidades de metais pesados absorvidas do solo pelas plantas, utilizaram somente as frações (trocável e orgânica) do elemento no solo que apresentaram coeficientes de correlação menores do que 0,70 com os teores extraídos, para evitar problemas de interpretação gerados por possíveis efeitos de colinearidade. Ruivo et al. (2006) utilizaram a análise de trilha para avaliar a relação da biomassa microbiana do solo com as características químicas da manta orgânica, da matéria orgânica leve e do solo. Também submeteram as características explicativas ao teste de multicolinearidade para eliminar as características que estavam inflacionando a variância.

O objetivo neste trabalho foi reinterpretar resultados experimentais, por meio da inserção e/ou substituição de variáveis físicas do solo em modelos

estatísticos a fim de melhor explicar os diversos aspectos do desenvolvimento das plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do experimento, variáveis independentes e variáveis resposta

O presente trabalho foi desenvolvido a partir dos dados obtidos no experimento conduzido em conjunto com Peçanha (2007) e Valicheski (2008). Esses trabalhos tiveram como foco avaliar o efeito dos fatores classe, compactação e condição hídrica do solo sobre os diversos aspectos do comportamento de plantas de coqueiro (morfológico, fisiológico, hídrico e nutricional) e da química do solo, buscando obter funções simples ou mesmo superfícies de resposta que equacionem estas relações.

O experimento foi realizado em casa de vegetação, em Campos dos Goytacazes-RJ. O delineamento foi o de blocos ao acaso com três repetições e tratamentos em esquema fatorial 2 x 4 x 4, sendo: duas classes de solo (Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico e Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico gleico), quatro níveis de compactação do solo (nível 1 como densidade mínima; níveis 2, 3 e 4 como incrementos de, respectivamente, 30%, 60% e 90% da amplitude de variação da densidade do solo) e quatro condições hídricas (nível 2, correspondente à capacidade de vaso; nível 1 obtido pela elevação de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ da umidade de referência “nível 2”; níveis 3 e 4 obtidos pela redução de 0,04 e $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ da umidade de referência). Cada parcela correspondeu a um vaso plástico de 100 L, preenchidos até 75% de sua altura (camada de 0,3 m), utilizando uma prensa hidráulica para atingir os quatro níveis de compactação.

No citado experimento, Peçanha (2007) mediu a evapotranspiração do sistema solo-planta instalado nos vasos dos 90 até 284 dias após o plantio (entre meados de junho/2006 e o início de janeiro/2007), a partir de pesagens e da quantificação dos volumes aplicados por vaso em cada irrigação. Avaliou, ainda, variáveis biométricas (altura do coqueiro, circunferência do estipe, número de folhas, massa total do coqueiro, área foliar e razão de área foliar, consumo de água) e fisiológicas (potencial hídrico ante-manhã, taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração e o déficit de pressão de vapor, entre a folha e o ar, fluorescência inicial da clorofila *a*, teor de clorofila). Adicionalmente,

Valicheski (2008) relacionou os resultados da análise química do solo, o teor de nutrientes das folhas e desenvolvimento do sistema radicular das plantas de coqueiro aos tratamentos.

No presente trabalho, os mesmos aspectos do comportamento da planta estudados por Peçanha (2007) e Valicheski (2008) foram explicados, tentativamente, por outras variáveis físicas do solo, que decorrem diretamente dos tratamentos. Assim, para os solos estudados, ao invés de se buscar a explicação para um determinado comportamento das plantas unicamente no binômio compactação-condição hídrica do solo, atributos físicos como porosidade total, porosidade de aeração, tensão de água, resistência à penetração e condutividade hidráulica do solo foram levadas em conta como variáveis independentes.

Tratamento estatístico dos dados

Inicialmente, devido à ocorrência de parcelas perdidas e a uma exigência do programa estatístico utilizado (pacote estatístico SAEG), foi realizado o balanceamento de dados nas variáveis-resposta (o valor da parcela perdida foi estimado pela média das demais repetições). Quando havia apenas uma repetição, o tratamento foi eliminado da análise fatorial, o que ocorreu somente com a variável morfológica altura da folha central.

Após o balanceamento, os valores de cada variável resposta foram corrigidos pela subtração do efeito de bloco, o qual foi obtido pela diferença entre a média geral e as médias dos blocos. Tal procedimento foi adotado tendo em vista que o objetivo da utilização de controle local por meio dos “blocos” é apenas de interesse estatístico.

Em relação ao fator solo, os resultados de Peçanha (2007) e Valicheski (2008) revelaram que este foi o fator tratamento com maiores efeitos, inclusive ocorrendo, em alguns casos, interação com os demais fatores. Apesar disso, e a despeito desse fator ser de grande interesse prático, traz consigo inúmeras fontes secundárias de variação (mineralogia, química, granulometria, entre outras), algumas não prontamente identificáveis, sendo uma variável qualitativa de difícil inclusão nos modelos matemáticos. Assim, optou-se por avaliar os dados de cada solo separadamente, incluindo apenas variáveis independentes quantitativas.

Após estes procedimentos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando o esquema fatorial 4 x 4 (quatro níveis de

compactação e quatro condições hídricas). Para a análise do consumo diário de água das plantas foi considerada a média dos três últimos períodos avaliados – diferentemente de Peçanha (2007), que considerou os 16 períodos de avaliação como um quarto fator no esquema fatorial (16 x 2 x 4 x 4).

Obtenção das variáveis correlacionadas

A análise de variância atribui apenas às variáveis-tratamento (variáveis independentes controladas) os efeitos diretos e/ou indiretos sobre as variáveis-resposta. Como, no presente caso, as variáveis-tratamento possuem outras que lhe são reconhecidamente correlacionadas, a substituição das variáveis independentes pôde ser realizada tirando-se proveito de algumas dessas inter-relações, elencadas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis-tratamento e variáveis-correlacionadas.

Variáveis controladas	Variáveis correlacionadas
Solo*	Atributos mineralógicos Atributos relativos à matriz do solo Atributos químicos
Densidade	Porosidade total Porosidade de aeração Tensão
Umidade	Água disponível Resistência do solo à penetração Condutividade hidráulica

*Variável qualitativa, utilizada para definição de dois conjuntos de dados, pelo que as variáveis correlacionadas não foram incluídas no modelo.

A seguir é apresentada, resumidamente, a forma como as variáveis correlacionadas às variáveis-tratamento foram obtidas no presente trabalho.

Porosidade total

A porosidade total (PT) é a relação entre o volume dos poros (V_p) e o volume do solo (V_s), sendo usualmente estimada aplicando-se a equação a seguir:

$$PT = 1 - \rho / \rho_s \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do solo e ρ_s é a densidade de partículas.

Porosidade de aeração efetiva

A porosidade de aeração (PA_{efet}) foi obtida pela diferença entre a porosidade total (PT) e a umidade mantida em cada vaso (θ_{efet}), aplicando-se a equação 2:

$$PA_{\text{efet}} = PT - \theta_{\text{efet}} \quad (2)$$

Tensão efetiva da água no solo

Para descrever a relação entre o potencial mátrico e a umidade do solo, os dados obtidos por Peçanha (2007) e Valicheski (2008) foram ajustados ao modelo de curva de retenção proposto por Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha\phi_m|^n\right)^m} \quad (3)$$

onde θ_r é a umidade volumétrica residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s é a umidade volumétrica de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ϕ_m é o potencial mátrico (m); α (m^{-1}), n e m são coeficientes independentes estimados por meio de ajustes aos dados observados. O parâmetro independente m foi assumido como função de n ($m = 1 - 1/n$). A tensão (τ) equivale a ϕ_m , mas com sinal positivo.

No presente trabalho adotaram-se as modificações sugeridas por Tormena e Silva (2002). Assim, tanto a umidade volumétrica residual (θ_r) quanto o parâmetro de ajuste n foram considerados como funções dependentes da densidade do solo, linear e quadrática, respectivamente:

$$\theta_r = a_1 \rho + b_1 \quad (4)$$

$$n = a_2 \rho^2 + b_2 \rho + c_2 \quad (5)$$

onde a_1 , b_1 , a_2 , b_2 e c_2 são coeficientes independentes estimados durante os ajustes das curvas de retenção. A umidade de saturação (θ_s) também foi tratada como variável independente, pois também é função da densidade ($\theta_s = PT = 1 - \rho/\rho_s$). Isso permitiu que, para cada solo, fosse realizado um único

ajuste do modelo, tendo o potencial mátrico e a densidade do solo como variáveis independentes.

A tensão efetiva (τ_{efet}) foi obtida a partir da curva de retenção, em planilha eletrônica, pelo método iterativo, por meio da ferramenta “Solver” do aplicativo Microsoft Excel, fixando-se como meta a obtenção do valor de ϕ_m em que se atingia o valor de umidade medida em cada vaso (θ_{efet}).

Água disponível efetiva

A água efetivamente disponível às plantas (AD_{efet}) foi calculada pela diferença entre a umidade verificada nos vasos e aquela correspondente ao ponto de murcha permanente:

$$AD_{\text{efet}} = \theta_{\text{efet}} - \theta_{\text{PMP}} \quad (6)$$

Resistência do solo à penetração

A curva de resistência do solo à penetração foi determinada a partir dos dados de Valicheski (2008), considerando-se o modelo de Busscher (1990):

$$RP = a\theta^b\rho^c \quad (7)$$

onde RP é a resistência do solo à penetração e a, b e c são coeficientes de ajuste. A partir dos modelos obtidos, substituindo-se os valores de densidade e umidade efetiva de cada vaso, estimou-se o valor da resistência à penetração efetiva (RP_{efet}) a que cada planta ficou submetida ao longo do período experimental.

Condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica do solo (K) em cada vaso foi determinada a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980), que combina uma equação que descreve a curva de retenção de água com o modelo de Mualem (1976).

$$K(\theta) = K_s \omega^\lambda \left[1 - \left(1 - \omega^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (8)$$

sendo que:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

onde ω é a saturação efetiva, λ é um parâmetro empírico estimado por Mualem (1976) em 0,5 para a maioria dos solos, e K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado. Para o presente trabalho, K_s foi obtida por meio do permeâmetro de carga constante descrito em Bernardes (2005), para cada combinação solo-densidade.

Análise multivariada de fatores

Embora os níveis de compactação sejam uniformes nos dois solos e as condições hídricas uniformes entre as combinações solo-densidade, em virtude da grande interação dos atributos físicos do solo descrita anteriormente, mesmo as variáveis mais diretamente correlacionadas às variáveis-tratamento (densidade e umidade do solo) passam a não manter esta uniformidade. Isso resulta, por exemplo, em diferentes valores de densidade entre os solos para um mesmo nível de compactação. Para a umidade do solo, os valores divergem tanto entre os níveis de compactação para uma mesma condição hídrica, quanto entre os solos para uma mesma combinação compactação-condição hídrica. Esta não proporcionalidade limita a realização de análise de covariância, tendo sido preferível utilizar técnicas estatísticas da análise multivariada, como análise de regressão múltipla e análise de trilha.

Obtenção de modelos matemáticos

Os modelos matemáticos foram obtidos por meio do programa estatístico BuildQSAR, primeiramente utilizando apenas as variáveis densidade e umidade. Na sequência, estas foram substituídas, respectivamente, pelas variáveis porosidade total e água disponível (que lhes são linearmente correlacionadas), e/ou incluindo outras variáveis (ou seja, outras causas de variação) que reduziram os resíduos estatísticos.

Os modelos estatísticos convencionais são normalmente descritos conforme o apresentado a seguir:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \sigma_i + e_{ij} \quad (10)$$

onde Y_{ij} é a variável-resposta no i -ésimo tratamento e na j -ésima repetição (bloco); μ é a média geral; β_j é o efeito de bloco; σ_i é o efeito de tratamento e e_{ij} é o erro experimental no i -ésimo tratamento e na j -ésima repetição.

Para este trabalho o Y_{ij} foi corrigido quanto ao efeito de bloco, resultando em:

$$Y_{ij_cor} = Y_{ij} - \beta_j \quad (11)$$

onde Y_{ij_cor} é a variável-resposta no i -ésimo tratamento e na j -ésima repetição. Assim, o modelo estatístico utilizado pode ser apresentado como:

$$Y_{ij_cor} = \mu + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_1\sigma_2 + e_{ij} \quad (12)$$

onde σ_1 é o efeito do fator “nível de compactação” (que, com a individualização dos solos, é correspondente à variável “densidade do solo”), σ_2 é o efeito do fator “condição hídrica”, $\sigma_1\sigma_2$ é o efeito da interação entre estes dois fatores e e_{ij} é o erro experimental no i -ésimo tratamento e na j -ésima repetição.

A partir dessa “ANOVA”, foram obtidos os modelos matemáticos correspondentes. Alternativamente, estes modelos foram alterados para:

$$Y_{ij_cor} = \mu + \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_1\sigma'_2 + e_{ij} \quad (13)$$

onde σ'_1 é o efeito da variável porosidade total (linearmente correlacionada à “densidade do solo”), σ'_2 , $\sigma_1\sigma_2$ é o efeito da interação entre estes dois fatores é o efeito do fator “condição hídrica” e e_{ij} é o erro experimental no i -ésimo tratamento e na j -ésima repetição.

Ademais, os tratamentos não são apenas o binômio nível de compactação-condição hídrica, mas também suas variáveis correlacionadas. Portanto o modelo estatístico para estes dados pode ser apropriadamente descrito assim:

$$Y_{(corrigido)} = \mu + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n + e_{ij} \quad (14)$$

onde $Y_{(corrigido)}$ é a variável-resposta sem o efeito de bloco para cada solo; μ é a média geral dos tratamentos; σ_n são variáveis-tratamento controladas (níveis de compactação e condição hídrica) e/ou as correlacionadas (PT, AD, PA, τ , RP e K) e e_{ij} é o erro experimental.

A pertinência da inserção e/ou permanência de uma determinada variável no modelo explicativo do comportamento das plantas foi avaliado estatisticamente pela sua contribuição na melhora da estimativa deste comportamento. Isto foi feito avaliando-se tanto o modelo como um todo (pela correlação entre os dados

previstos e observados; pelo valor e significância das estatísticas R^2 e F) quanto o(s) parâmetro(s) de ajuste vinculado(s) à referida variável (individualmente, tanto pela significância da estatística t e quanto pelo tipo de relação que estabelece com a variável resposta – ou seja, se o efeito é positivo ou negativo).

Análise de trilha

Os dados foram submetidos a uma análise de trilha para o estudo da natureza dos efeitos (diretos e indiretos) dos atributos de solo sobre as diversas variáveis avaliadas (morfológicas, fisiológicas, hídricas e nutricionais).

Foi utilizado o programa estatístico SAEG, que determinou a partir do conjunto de dados avaliados um coeficiente de trilha. Este coeficiente varia de -1 a +1, sendo o total o somatório dos efeitos diretos e indiretos. Para cada variável-tratamento, o efeito é identificado via outra variável-tratamento sobre uma determinada variável-resposta. Cada análise de trilha possui um coeficiente de determinação utilizado para a sua avaliação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de variância convencional

Os valores de F e de coeficientes de variação obtidos na análise de variância deste trabalho foram ligeiramente diferentes dos apresentados por Peçanha (2007) e Valicheski (2008). Isso deve ter ocorrido devido ao balanceamento dos dados realizado nas variáveis-respostas, o qual promoveu, para algumas variáveis, a redução da variabilidade, já que o valor da parcela perdida foi estimado pela média das demais repetições (Tabelas de ANOVA apresentadas no Apêndice I).

A análise de cada solo em separado permitiu estudar melhor os efeitos dos fatores compactação e condição hídrica, isolados ou em interação, sobre as variáveis-resposta, evitando que esses fossem mascarados pelo comportamento médio dos dois solos. Por exemplo, efeito de interação compactação x condição hídrica sobre as variáveis nutricionais enxofre e cloro, agora identificado no solo 1, e do nitrogênio, no solo 2, não haviam sido observados por Valicheski (2008). Embora não se tenha incluído o fator solo nos modelos propostos neste trabalho, alguns autores utilizaram dados qualitativos (cor do solo) em modelos a partir de procedimentos matemáticos como a interpolação qualitativa (Lescheck, 2008).

Variáveis correlacionadas aos tratamentos

No presente trabalho os fatores tratamento (compactação e condição hídrica) são conceitualmente independentes, atendendo ao pressuposto da estatística clássica para a análise de variância (Pimentel-Gomes, 1990). Quando se substitui tais fatores por outros que lhe são correlacionados, esta independência não pode ser garantida de forma absoluta. Como exemplo cita-se, por um lado, que a densidade do solo representa o próprio fator compactação, pois os níveis implementados em cada solo foram definidos a partir da própria densidade. Por outro lado, embora a umidade efetiva também represente com bastante proximidade o fator condição hídrica (uma vez que seus níveis foram estabelecidos considerando acréscimos na umidade em relação a uma condição de referência), esta variável apresenta certo grau de correlação com a densidade do solo. Isso ocorre porque a condição de referência depende não só do solo, mas também de seu nível de compactação. Neste caso, os dados não poderiam ser tratados como independentes, pois isso comprometeria a ANOVA com as variáveis substitutas e um tratamento estatístico mais adequado seria necessário (Eguchi, 2001). Outras variáveis apresentam diferentes níveis de interação com as demais variáveis independentes, o que é condizente com as relações matemáticas apresentadas nas equações anteriormente apresentadas.

A despeito das restrições mencionadas acima, desde que a análise estatística seja desenvolvida de forma pertinente, as variáveis-tratamento (controladas) podem ser substituídas por outras que se correlacionam matematicamente a elas. Quando se considera um modelo preditivo para as variáveis-resposta, tanto as variáveis controladas quanto as que lhe são correlacionadas podem ser admitidas como independentes. Por outro lado, pode-se fazer não só a substituição, mas também a inclusão de novas variáveis nos modelos, principalmente quando o grau de correlação com os tratamentos é baixo.

Tabela 2: Valores de densidade (Ds), porosidade total (PT), umidade (θ), água disponível (AD), porosidade de aeração (PA), tensão (τ), resistência do solo à penetração (RP) e condutividade hidráulica do solo (K) efetivos para cada tratamento e cada solo.

Comp	C.híd	Ds	PT	θ_{efet}	AD _{efet}	PA _{efet}	τ_{efet}	RP _{efet}	K _{efet}
		Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----				kPa	MPa	mm h ⁻¹
Solo 1 – Argissolo									
1	1	1,0	0,627	0,337	0,198	0,290	2,430	0,007	579,95
1	2	1,0	0,627	0,295	0,188	0,331	3,562	0,018	544,44
1	3	1,0	0,627	0,258	0,194	0,369	5,467	0,044	567,34
1	4	1,0	0,627	0,219	0,155	0,408	9,827	0,128	430,66
2	1	1,2	0,552	0,344	0,151	0,208	2,729	0,043	419,28
2	2	1,2	0,552	0,308	0,148	0,244	4,265	0,088	409,45
2	3	1,2	0,552	0,269	0,118	0,283	7,936	0,219	317,75
2	4	1,2	0,552	0,231	0,114	0,321	18,423	0,595	305,87
3	1	1,4	0,478	0,366	0,110	0,112	2,017	0,134	296,07
3	2	1,4	0,478	0,325	0,077	0,153	4,249	0,298	211,58
3	3	1,4	0,478	0,284	0,075	0,193	10,670	0,732	206,10
3	4	1,4	0,478	0,247	0,074	0,231	36,752	1,873	204,44
4	1	1,6	0,403	0,380	0,167	0,023	0,603	0,416	222,85
4	2	1,6	0,403	0,338	0,167	0,065	2,685	0,896	222,45
4	3	1,6	0,403	0,301	0,171	0,102	9,920	1,934	229,01
4	4	1,6	0,403	0,263	0,130	0,140	66,904	4,747	166,67
Solo 2 – Cambissolo									
1	1	1,0	0,624	0,399	0,129	0,225	0,685	0,010	165,77
1	2	1,0	0,624	0,360	0,139	0,264	0,918	0,016	179,07
1	3	1,0	0,624	0,318	0,090	0,306	1,341	0,031	115,02
1	4	1,0	0,624	0,280	0,092	0,344	2,069	0,061	116,95
2	1	1,18	0,556	0,402	0,098	0,154	0,806	0,046	124,88
2	2	1,18	0,556	0,368	0,056	0,188	1,192	0,072	77,56
2	3	1,18	0,556	0,326	0,051	0,231	2,166	0,139	72,66
2	4	1,18	0,556	0,289	0,060	0,268	4,034	0,256	81,89
3	1	1,36	0,489	0,415	0,171	0,074	0,650	0,154	108,02
3	2	1,36	0,489	0,378	0,171	0,110	1,363	0,249	107,93
3	3	1,36	0,489	0,339	0,175	0,150	3,240	0,441	111,59
3	4	1,36	0,489	0,299	0,129	0,190	9,771	0,853	75,48
4	1	1,54	0,421	0,413	0,134	0,008	0,103	0,524	79,42
4	2	1,54	0,421	0,393	0,131	0,028	0,411	0,677	76,82
4	3	1,54	0,421	0,349	0,086	0,072	2,456	1,268	48,46
4	4	1,54	0,421	0,312	0,092	0,109	10,736	2,235	51,60

Tabela 3: Valores dos coeficientes de correlação (r) das variáveis-tratamento controladas: densidade (Ds) e umidade (θ_{efet}), e de suas correlacionadas: porosidade total (PT), água disponível (AD_{efet}), porosidade de aeração (PA_{efet}), tensão (τ_{efet}), resistência à penetração (RP_{efet}) e condutividade hidráulica (K_{efet}) do solo 1 (acima da diagonal) e do solo 2 (abaixo da diagonal).

Variáveis		Ds	PT	θ_{efet}	AD _{efet}	PA _{efet}	τ_{efet}	RP _{efet}	K _{efet}
Solo 1 – Argissolo									
Ds		1,000	1,000	0,354	0,693	0,021	0,041	0,911	0,498
PT		1,000	1,000	0,354	0,413	0,698	0,722	0,346	0,380
θ_{efet}		0,240	0,240	1,000	0,413	0,917	0,491	0,731	0,584
AD _{efet}		0,888	0,219	0,219	1,000	0,917	0,326	0,263	0,662
PA _{efet}		0,234	0,646	0,896	0,896	1,000	0,326	0,598	0,084
τ_{efet}		0,046	0,763	0,614	0,298	0,298	1,000	0,598	0,809
RP _{efet}		0,735	0,463	0,557	0,229	0,722	0,722	1,000	0,809
K _{efet}		0,099	0,002	0,305	0,051	0,240	0,248	0,248	1,000
Solo 2 – Cambissolo									

Obs: Valores em negrito indicam alta correlação entre as variáveis (acima de 0,8).

Obtenção de modelos matemáticos alternativos

Os valores de F das ANOVAS (Apêndice) foram utilizados para verificar os efeitos das variáveis-tratamento controladas e testar suas substituições por outras que lhe são correlacionadas e mesmo incluir os efeitos de suas interações nos modelos explicativos dos diversos aspectos do comportamento das variáveis-resposta. Como os fatores compactação e condição hídrica são claramente representados pelas variáveis independentes densidade e umidade, inicialmente foram obtidos modelos com estas variáveis.

Os valores de r (Tabela 3) também foram utilizados para estabelecer as possíveis substituições e até mesmo a inclusão das demais variáveis correlacionadas nos modelos matemáticos. Algumas variáveis correlacionadas substituíram as variáveis independentes densidade e umidade, como, por exemplo, a PT em vez da Ds, em quase todos os casos, e a AD_{efet} em vez da θ_{efet} , em alguns casos.

A substituição e inclusão de variáveis com base na ANOVA e nos coeficientes de correlação foram bem sucedidas para a maior parte das variáveis-resposta, obtendo-se modelos lineares e/ou quadráticos, conforme se observa nas Tabelas 4 a 10. Os modelos obtidos apresentaram baixos valores de R^2 por se ter utilizado o inteiro conjunto de dados, ou seja, os valores das variáveis de cada vaso e não a média dos tratamentos.

Para o consumo diário de água e o teor foliar de cálcio do Cambissolo e para a circunferência do caule em ambos os solos obtiveram-se modelos em que a PT e a AD_{efet} substituíram a Ds e a θ_{efet} , respectivamente. Para o consumo de água e a fluorescência inicial (F_0) no Argissolo não foi possível nem mesmo essas substituições.

Para a variável química do solo carbono orgânico, que havia se relacionado apenas com a umidade, não foi possível a substituição dessa variável tratamento, mas sim a inclusão das variáveis correlacionadas PA_{efet} ou K_{efet} .

Tabela 4: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para o consumo de água (CONS), nos solos 1 e 2.

Nº	Modelo	R^2	F
Argissolo			
01	CONS = 8,36 (\pm 7,58) Ds - 3,40 (\pm 2,91) Ds ² + 4,24 (\pm 2,68) θ_{efet} - 5,20 (\pm 4,87)	0,26	5,27**
Cambissolo			
02	CONS = 14,94 (\pm 9,97) Ds - 6,16 (\pm 3,92) Ds ² + 4,16 (\pm 2,98) θ_{efet} - 9,13 (\pm 6,28)	0,32	6,82**
03	CONS = 46,06 (\pm 29,05) PT - 43,31 (\pm 27,75) PT ² + 4,06 (\pm 2,97) AD _{efet} - 11,44 (\pm 7,48)	0,31	6,67**

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Tabela 5: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para a variável fisiológica fluorescência inicial (F_0), no solo 1.

Nº	Modelo	R^2	F
Argissolo			
01	$F_0 = -308,88 (\pm 248,30)$ Ds - 1379,88 ($\pm 1126,57$) θ_{efet} + 996,76 ($\pm 970,25$) Ds ² θ_{efet}^2 + 1236,18 ($\pm 471,86$)	0,21	3,79*

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Tabela 6: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para a variável morfológica circunferência do caule (CIR), nos solos 1 e 2.

Nº	Modelo	R^2	F
Argissolo			
01	CIR = 1,09 (\pm 0,97) Ds - 0,45 (\pm 0,37) Ds ² + 0,38 (\pm 0,34) θ_{efet} - 0,57 (\pm 0,62)	0,22	4,06*
02	CIR = 2,94 (\pm 2,79) PT - 2,83 (\pm 2,69) PT ² + 0,37 (\pm 0,34) AD _{efet} - 0,60 (\pm 0,70)	0,21	3,90*
Cambissolo			
03	CIR = 1,29 (\pm 1,21) Ds - 0,54 (\pm 0,48) Ds ² + 0,47 (\pm 0,36) θ_{efet} - 0,69 (\pm 0,76)	0,24	4,74**
04	CIR = 4,05 (\pm 3,54) PT - 3,78 (\pm 3,38) PT ² + 0,45 (\pm 0,36) AD _{efet} - 0,91 (\pm 0,91)	0,24	4,55**

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Tabela 7: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para a variável nutricional teor de cálcio na planta (Ca), no solo 2.

Nº	Modelo	R^2	F
Cambissolo			
01	Ca = - 16,72 (\pm 15,40) Ds + 6,82 (\pm 6,05) Ds ² - 9,89 (\pm 4,60) θ_{efet} + 18,43 (\pm 9,69)	0,35	7,99**
02	Ca = - 48,77 (\pm 44,74) PT + 47,67 (\pm 42,74) PT ² - 9,82 (\pm 4,57) AD _{efet} + 18,56 (\pm 11,51)	0,35	7,95**

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Tabela 8: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para a variável química do solo carbono orgânico (CARB), no solo 1.

Nº	Modelo	R^2	F
Argissolo			
01	$CARB = 0,79 (\pm 0,49) \theta_{\text{efet}} + 0,24 (\pm 0,21) PA_{\text{efet}} + 0,53 (\pm 0,18)$	0,19	5,39**
02	$CARB = 0,37 (\pm 0,35) \theta_{\text{efet}} + 1,12 \cdot 10^{-4} (\pm 1,00 \cdot 10^{-4}) K_{\text{efet}} + 0,69 (\pm 0,11)$	0,18	4,87*

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$;

A inserção da porosidade de aeração no modelo traz pouca possibilidade de reinterpretação dos resultados, pois esta variável é obtida pela diferença entre porosidade total e umidade efetiva. A relação positiva entre PA_{efet} e carbono orgânico indica que o aumento da aeração não promoveu maior mineralização e consequente redução do teor de carbono no solo, como se poderia esperar. Pelo contrário, o aumento do carbono com a umidade indica que pode ter ocorrido aumento da microbiota, possivelmente pouco decompositora e que utiliza os nutrientes do próprio solo para formação de sua biomassa (Andrén et al., 1992; De Bona et al., 2006), ou mesmo pela exudação de compostos orgânicos pelo sistema radicular (Moreira e Siqueira, 2003; Cattelan e Vidor, 1990).

A condutividade hidráulica também é dependente dos atributos do solo (porosidade total, distribuição dos espaços porosos e a geometria dos poros no solo), e a interpretação da pouco expressiva relação observada entre esta variável e o teor de carbono é difícil. A compactação tem grande influência na redução da condutividade hidráulica do solo saturado, pois diminui a quantidade de poros grandes. Em condição de não-saturação, a extração de um determinado volume de água pelas plantas ocasiona maior redução da condutividade hidráulica nas proximidades das raízes em um solo mais arenoso e/ou menos compacto do que em um solo mais argiloso e/ou mais compacto, devido à elevação da tortuosidade do filme de água que reveste as partículas ser maior nos primeiros que nos últimos (Resende, 2000).

Nos modelos apresentados nas Tabelas 9 e 10, tanto para o solo 1 como para o solo 2, verifica-se que para a maioria das variáveis radiculares foram poucos os modelos obtidos em que a PT e a AD_{efet} substituíram a D_s e a θ_{efet} , respectivamente. Esta substituição ocorreu apenas para a densidade radicular com base no comprimento (DCR), no Argissolo, e para densidade radicular com base no volume (DVR), massa de raízes finas (DRF) e total DRT e poder relativo de penetração radicular (PRPR), no Cambissolo.

Por outro lado, as Tabelas 9 e 10 permitem verificar que, para a maioria das variáveis radiculares, foi possível incluir quase todas as variáveis correlacionadas, indicando que estas variáveis-resposta são afetadas pelos diversos aspectos da condição física do solo (Centurion e Demattê, 1985; Castro et al., 1987).

Tabela 9: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para a densidade radicular com base no diâmetro médio (D_{med}), comprimento (DCR), superfície (DSR), volume (DVR), massa de raízes finas (DRF), massa de raízes total (DRT) e para o poder relativo de penetração radicular (PRPR), no solo 1.

N ^o	Modelo	R ²	F
Argissolo			
01	$D_{med} = 0,36 (\pm 0,19)$ Ds - $0,05 (\pm 0,04)$ $RP_{efet} + 0,95 (\pm 0,23)$	0,26	7,79**
02	$D_{med} = 0,25 (\pm 0,17)$ Ds - $0,0027 (\pm 0,0022)$ $\tau_{efet} + 1,07 (\pm 0,21)$	0,21	6,06**
03	DCR = - $221,47 (\pm 99,04)$ Ds + $550,19 (\pm 477,26)$ $\theta_{efet} 264,33 (\pm 155,66)$	0,32	10,51**
04	DCR = $358,19 (\pm 273,40)$ PT + $527,38 (\pm 470,14)$ $AD_{efet} - 101,11 (\pm 130,12)$	0,31	10,31**
05	DCR = - $425,71 (\pm 232,30)$ Ds - $547,65 (\pm 476,67)$ $PA_{efet} + 812,59 (\pm 399,52)$	0,32	10,49**
06	DSR = - $925,86 (\pm 462,58)$ Ds + $2799,39 (\pm 2229,10)$ $\theta_{efet} + 1002,62 (\pm 727,03)$	0,28	8,88**
07	DSR = - $1965,27 (\pm 1085,03)$ Ds - $2786,92 (\pm 2226,44)$ $PA_{efet} + 3792,55 (\pm 1866,10)$	0,28	8,85**
08	DSR = $5288,23 (\pm 2909,97)$ $\theta_{efet} + 2483,41 (\pm 1239,12)$ $PA_{efet} - 1481,30 (\pm 1076,37)$	0,28	8,90**
09	DVR = - $490,68 (\pm 302,60)$ Ds + $1809,67 (\pm 1458,19)$ $\theta_{efet} + 476,34 (\pm 475,60)$	0,22	6,41**
10	DVR = - $1162,20 (\pm 709,83)$ Ds - $1800,71 (\pm 1456,54)$ $PA_{efet} + 2279,18 (\pm 1220,80)$	0,22	6,38**
11	DVR = $3129,61 (\pm 1903,62)$ $\theta_{efet} + 1316,70 (\pm 810,60)$ $PA_{efet} - 840,46 (\pm 704,13)$	0,22	6,42**
12	DRF = - $0,46 (\pm 0,33)$ Ds + $1,76 (\pm 1,61)$ $\theta_{efet} + 0,49 (\pm 0,52)$	0,17	4,67*
13	DRF = - $1,11 (\pm 0,78)$ Ds - $1,75 (\pm 1,61)$ $PA_{efet} + 2,24 (\pm 1,35)$	0,17	4,64*
14	DRT = - $0,87 (\pm 0,68)$ Ds + $3,38 (\pm 3,30)$ $\theta_{efet} + 0,94 (\pm 1,08)$	0,15	4,04*
15	DRT = $34,20 (\pm 25,68)$ PT - $27,60 (\pm 24,52)$ $PT^2 - 3,44 (\pm 3,15)$ $PA_{efet} - 8,53 (\pm 6,54)$	0,24	4,64**
16	PRPR = $106,76 (\pm 89,50)$ $\theta_{efet} + 88,82 (\pm 38,11)$ $PA_{efet} - 36,41 (\pm 33,10)$	0,34	11,84**
17	PRPR = - $76,41 (\pm 68,73)$ $\theta_{efet} - 5,58 (\pm 2,68)$ $RP_{efet} + 41,68 (\pm 21,32)$	0,30	9,55**
18	PRPR = - $101,19 (\pm 81,27)$ $\theta_{efet} - 0,3499 (\pm 0,22)$ $\tau_{efet} + 48,94 (\pm 25,82)$	0,20	5,61**

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * p < 0,05; ** p < 0,01;

Tabela 10: Modelos estatístico-matemáticos, valores de R^2 , de F e nível de significância obtidos para a densidade radicular com base no diâmetro médio (D_{med}), comprimento (DCR), volume (DVR), massa de raízes grossas (DRG), massa de raízes finas (DRF), massa de raízes total (DRT) e para o poder relativo de penetração radicular (PRPR), no solo 2.

Nº	Modelo	R^2	F
Cambissolo			
01	$D_{med} = 4,91 (\pm 3,67) Ds - 1,70 (\pm 1,41) Ds^2 + 0,0033 (\pm 0,0019) K_{efet} - 2,17 (\pm 2,39)$	0,28	5,59**
02	$DCR = 851,13 (\pm 611,28) \theta_{efet} + 412,80 (\pm 279,00) PA_{efet} - 216,51 (\pm 249,57)$	0,19	5,14**
03	$DCR = 1743,13 (\pm 1546,66) Ds - 726,20 (\pm 606,45) Ds^2 - 6,80 (\pm 6,68) \tau_{efet} - 841,55 (\pm 963,99)$	0,28	5,60**
04	$DVR = 6558,48 (\pm 5378,48) Ds - 2755,09 (\pm 2113,27) Ds^2 + 2414,66 (\pm 1605,46) \theta_{efet} - 4183,24 (\pm 3386,43)$	0,31	6,51**
05	$DVR = 20730,12 (\pm 15541,45) PT - 19339,21 (\pm 14846,46) PT^2 + 2456,03 (\pm 1589,30) AD_{efet} - 5344,62 (\pm 3998,88)$	0,31	6,71**
06	$DVR = 8765,78 (\pm 5850,41) Ds - 3379,85 (\pm 2253,75) Ds^2 + 3,56 (\pm 3,00) K_{efet} - 5318,93 (\pm 3807,35)$	0,26	5,12**
07	$DVR = 7338,14 (\pm 5645,15) Ds - 2963,98 (\pm 2213,48) Ds^2 - 26,91 (\pm 24,38) \tau_{efet} - 3906,53 (\pm 3518,45)$	0,25	4,81**
08	$DVR = 5661,02 (\pm 5414,08) Ds - 2759,76 (\pm 2112,56) Ds^2 - 2416,05 (\pm 1603,14) PA_{efet} - 1773,59 (\pm 3530,84)$	0,31	6,52**
09	$DVR = 3564,54 (\pm 2170,81) \theta_{efet} + 1165,16 (\pm 990,80) PA_{efet} - 1012,76 (\pm 886,27)$	0,20	5,55**
10	$DRG = 7,37 (\pm 5,58) Ds - 2,97 (\pm 2,19) Ds^2 + 1,67 (\pm 1,66) AD_{efet} - 4,23 (\pm 3,49)$	0,24	4,59**
11	$DRF = 7,55 (\pm 4,88) Ds - 3,13 (\pm 1,92) Ds^2 + 2,04 (\pm 1,46) \theta_{efet} - 4,60 (\pm 3,07)$	0,34	7,58**
12	$DRF = 23,57 (\pm 14,18) PT - 22,02 (\pm 13,55) PT^2 + 2,01 (\pm 1,45) AD_{efet} - 5,94 (\pm 3,65)$	0,34	7,53**
13	$DRF = 26,72 (\pm 14,82) PT - 25,86 (\pm 14,36) PT^2 + 0,0030 (\pm 0,0027) K_{efet} - 6,41 (\pm 3,79)$	0,30	6,34**
14	$DRF = 25,15 (\pm 14,47) PT - 23,59 (\pm 13,84) PT^2 - 0,03 (\pm 0,02) \tau_{efet} - 5,97 (\pm 3,71)$	0,32	6,80**
15	$DRF = 26,28 (\pm 14,27) PT - 22,14 (\pm 13,52) PT^2 - 2,04 (\pm 1,45) PA_{efet} - 6,69 (\pm 3,70)$	0,34	7,62**
16	$DRF = 3,11 (\pm 2,04) \theta_{efet} + 1,09 (\pm 0,93) PA_{efet} - 0,76 (\pm 0,83)$	0,18	4,84*
17	$DRT = 14,77 (\pm 10,09) Ds - 6,11 (\pm 3,96) Ds^2 + 3,63 (\pm 3,01) \theta_{efet} - 8,96 (\pm 6,35)$	0,29	6,23**
18	$DRT = 45,94 (\pm 29,21) PT - 42,98 (\pm 27,91) PT^2 + 3,68 (\pm 2,99) AD_{efet} - 11,57 (\pm 7,52)$	0,30	6,34**
19	$DRT = 50,78 (\pm 29,51) PT - 43,20 (\pm 27,97) PT^2 - 3,63 (\pm 3,00) PA_{efet} - 12,90 (\pm 7,65)$	0,30	6,24**
20	$DRT = 48,86 (\pm 29,64) PT - 45,90 (\pm 28,36) PT^2 - 0,05 (\pm 0,04) \tau_{efet} - 11,64 (\pm 7,61)$	0,28	5,86**
21	$PRPR = - 31,74 (\pm 12,20) Ds - 95,90 (\pm 55,89) \theta_{efet} + 93,92 (\pm 22,08)$	0,53	25,67**
22	$PRPR = 685,70 (\pm 519,01) PT - 550,79 (\pm 495,80) PT^2 - 96,26 (\pm 53,07) AD_{efet} - 171,42 (\pm 133,54)$	0,58	20,56**
23	$PRPR = 559,47 (\pm 526,16) PT - 545,23 (\pm 498,71) PT^2 + 94,80 (\pm 53,61) PA_{efet} - 136,67 (\pm 136,39)$	0,58	20,15**
24	$PRPR = 163,44 (\pm 47,29) PT - 0,18 (\pm 0,10) K_{efet} - 54,80 (\pm 20,78)$	0,55	27,19**
25	$PRPR = 108,60 (\pm 35,57) PT + 0,88 (\pm 0,87) \tau_{efet} - 39,23 (\pm 19,56)$	0,46	19,06**
26	$PRPR = - 204,03 (\pm 79,69) \theta_{efet} - 1,70 (\pm 1,14) \tau_{efet} + 96,18 (\pm 30,13)$	0,37	13,40**
27	$PRPR = - 164,97 (\pm 54,88) \theta_{efet} - 11,29 (\pm 4,16) RP_{efet} + 82,91 (\pm 19,98)$	0,55	27,23**
28	$PRPR = - 180,47 (\pm 63,20) \theta_{efet} + 0,15 (\pm 0,07) K_{efet} + 73,97 (\pm 21,13)$	0,46	18,99**

Obs 1: Valores entre parênteses é o erro padrão utilizado nos modelos obtidos. Obs 2: * < 0,05; ** < 0,01;

No Argissolo as variáveis radiculares apresentaram modelos em que a PA_{efet} foi a variável correlacionada que com maior frequência substituiu as variáveis tratamento, tanto a densidade (ρ) quanto a umidade efetiva (θ_{efet}). Isso ocorre porque a PA_{efet} apresenta uma relação direta com ambas, segundo a equação:

$$PA_{\text{efet}} = 1 - \rho / \rho_s - \theta_{\text{efet}} \quad (15)$$

a qual é obtida pela substituição, na equação 2, da expressão que representa a variável PT (equação 1). Portanto, a presença da PA_{efet} nos modelos pode não traduzir um efeito direto da aeração do solo no desempenho do sistema radicular da planta. Quando entra em substituição à umidade, o sinal negativo de seu coeficiente de ajuste revela uma relação inversa ao que se poderia esperar (ou seja, uma maior aeração estaria prejudicando o desenvolvimento radicular) e, nesses casos, a PA_{efet} de fato estaria representando de forma indireta o efeito da umidade do solo. Quando substitui a densidade, o sinal positivo do coeficiente revela o efeito que se poderia esperar (ou seja, uma maior aeração favoreceria o desenvolvimento radicular) e, nesses casos, a PA_{efet} estaria representando um efeito próprio. Assim, o efeito atribuído à densidade no modelo original é que pode ser indireto, indo de encontro ao que sugere Letey (1985), quando coloca a densidade entre as variáveis físicas do solo com efeito indireto e a aeração do solo entre as com efeito direto sobre o desenvolvimento vegetal. No Cambissolo, embora com menor frequência, este mesmo comportamento da PA_{efet} ocorreu.

No caso da variável PRPR, a PA_{efet} foi incluída e melhorou a capacidade preditiva do modelo para o Argissolo (Tabela 9, N° 16). Nesse caso a PA_{efet} possivelmente traduz um efeito próprio, uma vez que ocorre em adição ao efeito da umidade efetiva e o sinal de seu coeficiente é positivo, revelando o efeito esperado (maior aeração favorecendo o desenvolvimento radicular).

A RP_{efet} foi incluída, para o Argissolo, nos modelos referentes ao D_{med} (Tabela 9, N° 01) e ao PRPR (Tabela 9, N° 17) e, para o Cambissolo, na variável PRPR (Tabela 10, N° 27), sendo que estas inclusões possivelmente refletem efeito próprio da RP_{efet} . Para o D_{med} , o efeito ocorreu em adição ao da densidade e a despeito de não ter havido efeito da umidade (ou seja, não reflete um efeito indireto desta). Para o PRPR, o efeito ocorreu em adição ao da umidade e a despeito de não ter havido efeito da densidade (ou seja, também não reflete um efeito indireto desta). A ação da RP_{efet} sobre as variáveis-respostas resulta em

alterações morfológicas no sistema radicular que comprometem o seu desenvolvimento (Tavares Filho et al, 2001).

Para o Argissolo, a τ_{efet} foi incluída no modelo referente ao D_{med} (Tabela 9, N° 02), sendo que o efeito ocorreu em adição ao da densidade e aparentemente não se trata de efeito indireto da umidade, pois esta não foi significativa. Também foi incluída no modelo referente ao PRPR (Tabela 9, N° 18), o que ocorreu em adição à umidade, a qual, no entanto, mostrou comportamento inverso ao esperado (o PRPR diminuiu com o aumento da umidade, ao invés de aumentar). Nesse caso, a umidade parece não estar representando um efeito próprio, mas sim de outra variável com a qual se correlaciona, possivelmente a PA_{efet} (equação 15).

Para o Cambissolo, em que o modelo original para a variável PRPR (Tabela 10, N° 21) foi função de θ_{efet} e D_s , a τ_{efet} também apareceu nos modelos N° 25 e 26 da Tabela 10. Chama a atenção o fato de que no modelo original a umidade parece não estar representando um efeito próprio, pois, diferente do esperado, o coeficiente a ela vinculado aparece com sinal negativo. No modelo 25, em que θ_{efet} foi substituída por τ_{efet} , esta última não deve estar representando efeito direto nem da umidade, nem seu (pois o sinal esperado para o coeficiente seria negativo, e não positivo). No modelo 26, τ_{efet} e θ_{efet} aparecem como variáveis independentes e, nesse caso, parece ter havido simplesmente a substituição de D_s por τ_{efet} , pois o sinal negativo do coeficiente da D_s se manteve para o da τ_{efet} . Isso era de se esperar, pois pode-se demonstrar que, para uma dada umidade já afastada da saturação, a tensão aumenta com a densidade (ou seja, têm relação direta). Tal substituição ocorre sem que se possa dizer que revele efeito direto de qualquer uma delas, pois o efeito representado pode ser de uma terceira variável (talvez da PT, que substitui D_s nos modelos 22 a até 25 do Cambissolo).

Ainda tratando-se da variável τ_{efet} no Cambissolo, esta esteve presente, em substituição à θ_{efet} , em modelos que descrevem o comportamento das variáveis DCR, DVR, DRF e DRT (Tabela 10, N° 03, 07, 14 e 20). O sinal dos coeficientes relacionados a essas variáveis independentes revelam a natureza de seu efeito sobre estas densidades radiculares (positivo para a umidade e negativo para a tensão da água).

Para o Argissolo, a variável K_{efet} não esteve presente em nenhum modelo obtido. Para o Cambissolo, conforme a Tabela 10, a K_{efet} apareceu em modelos

referentes ao D_{med} (Nº 01), DVR (Nº 06), DRF (Nº 13) e PRPR (Nº 24 e 28). Nos modelos referentes à densidade radicular (Nº 06 e 13), sua presença ocorreu em substituição à umidade, com a qual têm relação direta (ambas as variáveis são determinantes da facilidade com que a planta acessa a água do solo). Para o D_{med} , mesmo não havendo efeito significativo da umidade, ocorreu a inclusão da K_{efet} no modelo, evidenciando que a disponibilidade de água para a planta não é determinada apenas pela umidade, mas também pelas características físicas do solo que determinam a dinâmica da água em direção às raízes (Jong van Lier e Libardi, 1997). No modelo 24, o sinal negativo do coeficiente da K_{efet} (como também o da θ_{efet} no modelo 21) indica que não se trata de efeito direto (mas sim de efeito indireto de alguma outra variável). No modelo 28, K_{efet} e θ_{efet} aparecem como variáveis independentes, mas, nesse caso, parece não se tratar de uma simples substituição de D_s por K_{efet} , pois o sinal negativo do coeficiente da D_s não se manteve para o da K_{efet} . Isso ocorreu a despeito de ser possível demonstrar que, para uma dada umidade já afastada da saturação, K_{efet} aumenta com a densidade (ou seja, têm relação direta). Assim, a presença dessa variável no modelo não é um reflexo indireto do efeito da D_s , mas possivelmente representa o efeito da própria K_{efet} sobre a disponibilidade de água para o crescimento radicular (Jong van Lier e Libardi, 1997; Jong van Lier, 2000).

Os resultados do presente trabalho demonstram que, para a avaliação da qualidade do solo, é importante que se determine não só suas variáveis físicas, mas também variáveis da planta ou do ambiente que respondam de forma integrada às condições a que estão submetidas, como o sistema radicular. Segundo Dexter (1988), em algumas situações as culturas conseguem crescimento radicular satisfatório mesmo em solos com um grau maior de compactação, principalmente em períodos de maior umidade e em zonas de menor densidade ou em fendas no solo. Além disso, Unger e Kaspar (1994) argumentam que parte do sistema radicular que não está sob impedimento pode compensar o crescimento, acarretando adequações na distribuição radicular.

Análise de trilha

Foi realizada uma análise de trilha para identificar a natureza dos efeitos diretos e indiretos das variáveis-tratamento sobre as variáveis-resposta. Os baixos valores de R^2 da análise de trilha indicam que houve efeitos de outra natureza

sobre as variáveis-respostas não atribuídas às variáveis-tratamento controladas e/ou correlacionadas. Se os valores de R^2 fossem elevados, a análise de trilha poderia confirmar a colinearidade entre as variáveis com elevado coeficiente de correlação e indicar a natureza do efeito (direto ou indireto) das variáveis-tratamento sobre as variáveis-resposta.

CONCLUSÕES

A substituição, em modelos matemáticos, de variáveis independentes por outras que lhe são correlacionadas e a inclusão de novas variáveis revelam relações de dependência direta com a variável-resposta, o que é fisicamente desejável (como ocorreu com a PT em vez da Ds e a AD_{efet} em vez da θ_{efet}).

Variáveis dependentes que respondem de forma integrada às condições físicas a que estão submetidas são consideradas boas indicadoras da qualidade do solo, como as que representam o desenvolvimento radicular das plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrén, O.; Steen, E.; Rajkai, K. (1992) Modelling the effects of moisture on barley straw and root decomposition in the field. *Soil Biol. Biochem.*, 24:727-736.
- Bernardes, R.S. (2005) Condutividade hidráulica de três solos da Região Norte Fluminense. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes, RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Beulter, A.N.; Silva, M.L.N.; Curi, N.; Ferreira, M.M.; Cruz, J.C.; Pereira Filho, I.A. (2001) Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:167-177.
- Bhatt, G.M. (1973) Significance of path coefficient analysis in determining the nature of character association. *Euphytica*, 22:338-343.
- Borges, M.R.; Coutinho, E.L.M. (2004) Metais Pesados do Solo após Aplicação de Biossólido. II - disponibilidade. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:557-568.
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524.
- Canillas, E.C.; Salokhe, V.M.A (2002) Decision support system for compaction assessment in agricultural soils. *Soil Till Res*, 65:221-230.

- Castro, O.M.; Camargo, O.A.; Vieira, S.R.; Dechen, S.C.F.; Cantarella, H. (1987) Caracterização química e física de dois Latossolos em plantio direto e convencional. Campinas, Instituto Agrônomo, 23p. (*Boletim científico*, 11)
- Cattelan, A.J., Vidor, C. (1990) Sistemas de cultura e a população microbiana no solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 14:125–132.
- Centurion, J.F.; Demattê, J.L.I. (1985) Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 9:263-266.
- Cruz, C.D.; Carneiro, P.C.S. (2003) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa: UFV, v.2.
- Cruz, C.D.; Regazzi, A.J. (1994) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa: UFV, 390p.
- De Bona, F.D; Bayerll, C.; Bergamaschilll, H.; Dieckow, J. (2006) Carbono orgânico no solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 30:911-919.
- De Maria, I.C.; Castro, O.M.; Dias, H.S. (1999) Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709.
- Dexter, A.R. (1988) Advances in characterization of soil structure. *Soil Till Res*, 11:199-238.
- Dürr, C.; Aubertot, J.N. (2000) Emergence of seedling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by aggregate size, roughness and position of aggregates in the seedbed. *Plant and Soil*, 219:211-220.
- Eguchi, S.Y. (2001) Controle Microbiológico em Cosméticos. *Rev. Racine*. 11:14-20.
- Fiorio, P.R.; Demattê, J.A.; Nanni, M.R. Formaggio, A.R. Epiphânio, J.C.N. (2005) Equações Discriminantes para Solos, Utilizando Variáveis Espectrais. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril, INPE*, p. 111-118.
- Hakansson, I.; Voorhees, W.R.; Riley, H. (1988) Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Till Res*, 11:239-282.
- Iescheck, A.; Sluter, C.; Ayup-Zouain, R.. (2009) Interpolação qualitativa de dados espaciais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 1:7-14.

- Johnson, R.A.; Wichern, D.W. (1988) *Applied multivariate statistical analysis*. 2.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 606p.
- Jong van Lier, Q.; LIBARDI, P.L. (1997) Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 21:535-542.
- Jong Van Lier, Q. de. (2000) Índices de disponibilidade de água para as plantas. *In: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Schaefer, C.A.G.R. Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1:95-106.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Lima, C.L.R.; Silva, A.P.; Imhoff, S.; Lima, H.V.; Leão, T.P. (2004) Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:409-414.
- Moreira, F.M.S.; Siqueira, J.O. (2003) *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 626p.
- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3):513-522.
- Peçanha, A.L. (2007) Relações hídricas e trocas gasosas do coqueiro anão verde em função da compactação, lâmina de irrigação e classe de solo. *Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 78p.*
- Pimentel Gomes, F. (1990) *Curso de estatística experimental*. 12. ed. São Paulo: Nobel, 467p.
- Radford, B.J.; Yule, D.F.; MCGARRY, D.; PLAYFORD, C. (2001) Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil Till. Res.*, 61:157-166.
- Rezende, J.O. (2000) *Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: limitações agrícolas e manejo*. Salvador: SEAGRI, Série de Estudos Agrícolas, 117p.
- Ribeiro, M.A.V. (1999) Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade. 71p. *Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*
- Ruivo, M.L.P.; Barros, N.F. Schaefer, C.E.G.R. (2006) Relações da biomassa microbiana do solo com características químicas de frações orgânicas e minerais do solo após exploração mineral na Amazônia Oriental. *Ciências Naturais*, 1:121-131.

- Santos, C.A.F.; Menezes, E.A.; PAINI, J.N. (1994) Coeficiente de trilha no estudo dos componentes primários e secundários na produção de grãos do Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp). *Revista Ceres*, 41:299-305.
- Tavares Filho, J.; Barbosa, G.M.C.; Guimarães, M.F.; Fonseca, I.C.B. (2001) Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo roxo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:725-730.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P. (2002) Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:305-314.
- Tormena, C.A.; Roloff, G. (1996) Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 20:333-339.
- Unger, W.P.; Kaspar, T.C. (1994) Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal*, 86:759-766.
- Valentin, J.L. (2000) *Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos*. Rio de Janeiro: Interciência, 117p.
- Valicheski, R.R. (2008) Atributos químicos do solo, estado nutricional e desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solos sob diferentes níveis de compactação e umidade. *Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF*.
- Van Genuchten, M.T.A. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-897.

4 RESUMOS E CONCLUSÕES

No presente trabalho, um Argissolo Amarelo, um Cambissolo Háplico e um Neossolo Flúvico de Campos dos Goytacazes-RJ foram caracterizados e avaliados quanto a sua qualidade física. Foram possíveis as seguintes conclusões:

- Uma pequena compactação do solo levou à redução da macroporosidade e a um pequeno aumento da microporosidade, mas uma compactação mais expressiva reduziu também a microporosidade. Isso também ocorreu, respectivamente, para a PA_{CC} e a θ_{CC} . Tal comportamento da microporosidade e θ_{CC} é consequência da incorporação da ρ no modelo da curva de retenção;
- Os valores de AD e IHO diminuíram com a elevação da densidade do solo, o que é consequência do comportamento das funções matemáticas para as umidades críticas que definem esses atributos e determinam as densidades críticas.
- Os valores do índice S foram decrescentes com a aplicação de níveis adicionais de compactação e mostrou-se um indicador sensível às variações estruturais do solo.
- A reconstituição estrutural de amostras de solo pode ser utilizada como ferramenta para prever os efeitos da compactação, pois permitiu avaliar a qualidade física do solo em uma ampla faixa de variação de densidade, obtendo-se de forma consistente as funções utilizadas para estimar as umidades críticas que definem o IHO.

- As funções de pedotransferência utilizadas devem ser aplicadas levando-se em consideração as classes texturais e a condição física do solo por serem altamente dependentes de atributos determinantes destes fatores.
- Devem-se considerar minuciosamente os coeficientes de ajuste das FPTs, para se evitar uma equivocada interpretação do comportamento de seus atributos dependentes.
- A substituição, em modelos matemáticos, de variáveis independentes por outras que lhe são correlacionadas pode revelar relações de dependência direta com a variável-resposta, o que é fisicamente desejável (como ocorreu com a PT em vez da D_s e a AD_{efet} em vez da θ_{efet}).
- Variáveis dependentes, como aquelas que representam o desenvolvimento radicular das plantas, que respondem de forma ampla aos diversos aspectos da condição física podem ser consideradas boas indicadoras da qualidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agriannual: Anuário da agricultura brasileira. (2000) *Coco-da-baía*. FNP – Consultoria e Comércio, São Paulo, 330-340p.
- Alakukku, L. (1996) Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II – Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil Till Res*, 37(4):223-238.
- Anderson, R.L.; Bancroft, T.A. (1952) *Statistical theory in research*. New York: McGraw-Hill Book, 399p.
- Andrade Júnior, A.S.; Rodrigues, B.H.N.; Athayde Sobrinho, C.; Melo, F. de B.; Bastos, E.A.; Cardoso, M.J.; Ribeiro, V.Q. (1997) Produtividade e qualidade de frutos de melancia em função de diferentes níveis de irrigação. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 15(1):43-46.
- Andreatta, J.A. (1990) Determinação da razão entre a evapotranspiração máxima de dois cultivares de milho (*Zea mays* L.) e a evapotranspiração potencial. (*Tese de Mestrado*). Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, 94p.
- Araújo, M.A.; Tormena, C.A.; Silva, A.P. (2004) Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:337-345.
- Araújo, M.C. (2003) Demanda hídrica e distribuição de raízes do coqueiro anão verde (*Cocos nucifera* L.) na Região Norte Fluminense. *Tese (Mestrado em Produção Vegetal)* – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 46p.

- Aspiazú, C.; Ribeiro, G.A.; Vianello, R.L.; Ribeiro, J.C.; Valente, O.F.; Paula Neto, F. (1990) Análise dos componentes principais aplicada na classificação climática do Estado de Minas Gerais. Teste metodológico. *Revista Árvore*, Viçosa, 14(1):1-15.
- Aubertin, Y.M., Kardos, L.T. (1965a) Root growth in porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29:290-293.
- Aubertin, Y.M., Kardos, L.T. (1965b) Root growth through porous media under controlled conditions. II. Effects of aeration levels and rigidity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29:363-365.
- Avilán, L.; Rivas, N.; Sucre, R. (1984) Estudio del sistema radical del cocotero (*Cocos nucifera* L.). *Oleagineux*, 39(1): 13-23.
- Barrada, Y. (1971) Water balance studies. FAO, Roma, (*Boletim Técnico*, 13), 90-96p.
- Benjamin, J.G.; Nielsen, D.C.; Vigil, M.F. (2003) Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148.
- Berlato, M.A.; Molion, L.C.B. *Evaporação e evapotranspiração*. Porto Alegre: IPAGRO/Secretaria de Agricultura, 1981. 95 p. (Boletim Técnico, 7).
- Bernardes, R.S.; Marciano, C.R.; Valicheski, R.R. (2006) Condutividade hidráulica do solo saturado em três áreas da região Norte Fluminense. *Resumo*. XVI Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Aracaju.
- Bernardes, R.S. (2005) Condutividade hidráulica de três solos da Região Norte Fluminense. *Tese* (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes, RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Betz, D.L.; Allmaras, R.R.; Copeland, S.M.; Randall, G.W. (1998) Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Science Society of America Journal*, 62:1384-1393.

- Beutler, A.N.; Centurion, J.F.; Silva, A.P.; Roque, C.G.; Ferraz, M.V. (2004) Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesq. Agrop. Bras.*, 39(6):575-580.
- Beutler, A.N.; Centurion, J.F.; Souza, Z.M.; Andrioli, I.; Roque, C.G. (2002) Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:829-834.
- Beutler, A.N.; Silva, M.L.N.; Curi, N.; Ferreira, M.M.; Cruz, J.C.; Pereira Filho, I.A. (2001) Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:167-177.
- Boone, F.R.; Veen, B.W. (1994) Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: Soane, B.D.; Ouwerkerk, C. van (eds.) *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, Cap. 11, 237-264.
- Borges, A.L.; Kiehl, J.C.; Souza, L.S. (1999) Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um latossolo amarelo álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 23:1019-1025.
- Box, G.E.P.; Draper, N.R. (1987) *Empirical model building and response surfaces*. New York: J. Wiley, 669p.
- Box, G.E.P.; Cox, D.R. (1964) Na analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Oxford, 26:211-252.
- Box, G.E.P.; Wilson, K.B. (1951) On the experimental attainment of optimum conditions (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, B*, London, 13:1-45.
- Burman, R.D.; Nixon, P.R.; Wright, J.L.; Pruitt, W.O. Water requirements. In: Jensen, M.E. (Ed.) (1983) *Design and operation of farm irrigation systems*. (Monograph, 3), St. Joseph: ASAE, 189-232.
- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 33:519-524.

- Camargo, O.A.; Alleoni, L.R.F. (1997) *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba, SNT, 132p.
- Camargo, O.A. (1983) *Compactação do solo e desenvolvimento das plantas*. Campinas: Fundação Cargill, 44p.
- Cassel, D.K., Bowen, H.D., Nelson, L.A. (1978) An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal*, 42:116-120.
- Castrignamó, A. et al. (2002) 3-D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in southern Italy. *Soil Till. Res.*, 65:95-108.
- Chancellor, W.J. (1977) *Compaction of soil by agricultural equipment*. Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, Bulletin 1981, 53p.
- Child, R. (1974) *Coconut*. London: Longman. 335p.
- Cintra, F.L.D. (2002) Solo. In: Fontes, H.R.; Ferreira, J.M.; Cintra, F.L.D.; Fontes, H.R.; Leal, M.L.S. (1996) Distribuição do sistema radicular do coqueiro gigante do Brasil submetido a diferentes sistemas de manejo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 20:327-332.
- Cintra, F.L.D.; Libardi, P.L.; Saad, A.M. (2000) Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb*, 4:23-28.
- Cintra, F.L.D.; Fontes, H.R.; Leal, M.L.S. (1996) Distribuição do sistema radicular do coqueiro gigante do Brasil submetido a diferentes sistemas de manejo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 20: 327-332.
- Cochran, W.G.; Cox, G.M. (1976) *Diseños experimentales*. 3.ed. México: Trilla, 661p.
- Curtis, R.O.; Post, B.W. (1964) Estimating bulk density from organic matter content in some Vermont forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28:285-286.
- Custódio, T.N.; Morais, A.R.; Muniz, J.A. (2000) Superfície de resposta em experimento com parcelas subdivididas. *Ciênc. Agrotec.*, 24(4):1008-1023.

- Da Ros, C.O., Secco, D., Fiorin, G.W. (1997) Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 21:241-247
- Davies, W.J.; Zangh, J. (1991) Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol*, 42:55-76.
- De Maria, I.C.; Castro, O.M.; Souza Dias, H. (1999) Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709.
- Dexter, A.R.; Youngs, I.M. (1992) Soil physic toward 2000. *Soil Till. Res.*, 24:101-106
- Dinar, A. (1993) Economic factors and opportunities as determinants of water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 14:47-52.
- Doorenbos, J.; Kassam, A.H. (1994) *Efeito da água no rendimento das culturas*. Tradução de Gheyi, H.R.; Sousa, A.A.; Damasceno, F.A.V.; Medeiros, J.F. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 306p.
- Dourado Neto, D.; Jon van Lier, Q. (1993) Estimativa do armazenamento de água no solo para realização do balanço hídrico. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 17:9-15.
- Embrapa (2006) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos – Embrapa Solos, 306p.
- Embrapa (2003) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Coco produção aspectos técnicos*. (Frutas do Brasil, 27). Aracaju, 106p.
- Fernandes, M.R. (1982) Alterações em propriedades de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, fase cerrado, decorrentes da modalidade de uso e manejo. Tese (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Gavande, S.A. (1972) *Física de suelos: principios y aplicaciones*. Limusa-Wiley, México, 351p.

- Gill, W.R., Bolt, G.H. (1955) Pfeffers studies of root growth pressure exerted by plants. *Agron. J.*, 47:166-168.
- Godefroy, J.; Jacquin, F. (1975) Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et le apports organiques en conditions tropicales;comparasion avec les sols forestiers. *Fruits*, 30:595-612.
- Grohmann, F.; Queiroz Neto, J.P. (1966) Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. *Bragantia*, Campinas, 25:421-431.
- Guandique, M.E.G.; Libardi, P.L. (1997) Balanço hídrico no solo e consumo de água para a cultura de Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10., Piracicaba. *Anais*. Piracicaba, S.B.A., ESALQ/USP, 1997. 638-640.
- Hajabbasi, M.A.; Jalalian, A.; Karimzadeh, H.R. (1997) Deforestation effects on soil physical and chemical properties, *Plant Soil*, 190:301-308.
- Hamblin, A.P. (1985) The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-158.
- Hausenbuiller, R.L. (1978) *Soil Science: principles and practices*. 2 ed. Washington, Wm. C. Brouw Company Publishes, 611p.
- Hillel, D. (1980a) *Applications of soil physics*. New York, Acad. Press, caps. 2 e 6.
- Hillel, D., Krentos, V.D., Styliou, Y. (1972) Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, 114: 395-400.
- Hillel, D. (1971) *Soil and Water – Physical principles and processes*. New York: Academic Press, 287p.
- Howell, T.A.; Tolk, J.A.; Schneider, A.D.; Evett, S.R. (1998) Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agronomy Journal*, 90:3-9.

- Imhoff, S.; Da Silva, A.P.; Dias Júnior, M.S.; Tormena, C.A. (2001) Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18.
- IRHO – Coconut (1992) Climatology. *Oleagineux*, 47(6):331-332.
- Jong Van Lier, Q. de. (2001) Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:233-238.
- Jong Van Lier, Q. de. (2000) Índices de disponibilidade de água para as plantas. In: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Schaefer, C.A.G.R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1:95-106.
- Kay, B.D. (1989) Assessing the suitability of different soils for new cropping systems in terms of rates of change in soil structure. In: Larson, W.E.; Blake, G.R.; Allmaras, R.R.; Voorhees, W.B.; Gupta, S.C. Mechanics and related processes in structured agricultural soils. Dordrecht, *NATO series in Applied Sciences*, 223-232.
- Kay, B.D. (1989) Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12:1-51.
- Kempthorne, O. (1952) *The designs and analysis of experiments*. Nova York: Wiley, 631p.
- Kerlinger, F.N. (1980) *Metodologia da pesquisa em ciências sociais*. São Paulo:EPU.
- Kiehl, E.J. (1979) *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Ceres, 262p.
- Klein, V.A.; Libardi, P.L. (2000) Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Ci. Rural*, 30:959-964.
- Klein, V.A., Libardi, P.L., Silva, A.P. (1998) Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Engenharia Agrícola*, 18:45-54.

- Kohnke, H. (1968) Soil physics, McGraw Hill, New York, 224p.
- Kondo, M.K.; Dias Junior, M.S. (1999) Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218.
- La Loma, J.L. (1966) *Experimentación agrícola*. 2 ed. México: UTEHA, 493p.
- Labanauskas, C.K. et al. (1965) Effects of soil temperature and oxygen on the amounts of macronutrients and micronutrients in citrus seed-lings (citrus sinensis var. Bassie), *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29:60-64.
- Lal, R. (1994) Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support Service, USDA, U.S. Agency for International Development. Ohio, Ohio State University, (*Technical Monograph nº21*), 78p.
- Lapen, D.R.; Topp, G.C.; Gregorich, E.G.; Curnoe, W.E. (2004) Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170.
- Larcher, W. (2000) *Ecofisiologia vegetal*. Tradução de Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: RiMa, 531p.
- Leão, T.P.; Silva, A.P.; Macedo, M.C.M.; Imhoff, S.; Euclides, V.P.B. (2004) Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423.
- Leite, I.R.M.; Encarnação, C.R.F. (2002) Fenologia do coqueiro na zona costeira de Pernambuco. *Pesq. Agrop. Bras.*, 37:745-752.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294.
- Libardi, P.L. (2000) *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba, O Autor, 509p.
- Libardi, P.L.; Reichardt, K.; Nielsen, D.R. & Biggar, J.W. (1980) Simple field methods for estimating hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:3-6.

- Lin, S.S.M.; Hubbel, J.N.; Samson Isou, S.C.S.; Splittstoesser, W.E. (1993) Drip irrigation and tomato yield under tropical conditions. *Hortscience*, Fort Collins, 18:460-1.
- Marciano, C.R. (1999) Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. *Tese* (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Piracicaba-SP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ. 93p.
- Marques, D.G. (1999) As pressuposições e a precisão dos ensaios de competição de cultivares de milho no Estado do Rio Grande do Sul. Santa Maria – RS, 1999. 42p. *Dissertação* (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.
- Masle, A.; Passioura, J.B. (1987) Effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 14:634-656.
- Medeiros, R.D. (2004) Efeitos da compactação do solo e da umidade sobre a absorção de N, P, K, os componentes de produção e a produtividade de grãos de arroz. *Tese* (Doutorado) – Lavras – MG. Universidade Federal de Lavras-UFLA, 162p.
- Milliken, G.A.; Johnson, D.E. (1984) *Analysis of messy data; designed experiments*. New York: Van Nostrand Reinhold, 485p.
- Mischan, M.M.; Pinho, S.Z. (1996) *Experimentação agrônômica: dados não balanceados*. Botucatu: Fundibio, 456p.
- Mishra, H.S.; Rathore, T.R.; Tomar, V.S. (1995) Water use efficiency of irrigated wheat in the Tarai Region of India. *Irrigation Science*, New York, 16:75-80.
- Morrison, D.E. (1976) *Multivariate statistical methods*. New York: McGraw-Hill, 338p.
- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522.
- Nesmith, D.S. (1987) Soil compaction in double cropped wheat and soybean on ultissol. *Soil Science Society of American Journal*, 51:183-186.

- Norman, N.; Nepomuceno, A.L. (1994). Water management. In: *FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Tropical soybean: Improvement and production. FAO - Plant Production and Protection Series, 27, Rome, Italy, 153-160.
- Olbrich, B.W., Roux, D.Le, Poulter, A.G. (1993) Variation in water use efficiency and G13C levels in Eucalyptus grandis clones. *J. Hydrology*, 150:615-633.
- Oliveira, J.O.A.P.; Vidigal Filho, P.S.; Tormena, C.A.; Pequeno, M.G.; Scapim, C.A.; Muniz, A.S.; Sagrilo, E. (2001) Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:443-450.
- Passioura, J.B.; Gardner, P.A. (1990) Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Aust. J. Plant Physiol.*, 17:149-157.
- Passos, E.E.M. (1998) Morfologia do coqueiro. In: Ferreira, J.M.S.; Warwick, D.R.N.; Siqueira, L.A. *A cultura do coqueiro no Brasil*. 2.ed. Brasília: EMBRAPA/CPATC. Cap. 3. 57-64p.
- Peçanha, A.L. (2007) Relações hídricas e trocas gasosas do coqueiro anão verde em função da compactação, lâmina de irrigação e classe de solo. *Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 78p.*
- Peiris, T.S.G.; Thattil, R.O.; Mahindapala; R. (1995) An analysis of the effect of climate and weather on coconut (*Cocos nucifera*). *Expl. Agric*, 31:451-460.
- Petter, R.L. (1990) Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em latossolo. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Santa Maria - RS. Universidade Federal de Santa Maria UFSM, 144 p.*
- Pimentel-Gomes, F. (1994) A importância do número de repetições nos experimentos. *Revista de Agricultura*, 69:243-245.
- Pimentel-Gomes, F. (1990) *Curso de estatística experimental*. 13 ed. Piracicaba: Nobel, 468p.

- Posse, R.P. (2005) Relações hídricas em plantas de coqueiro anão verde (*Cocos nucifera* L.) na Região Norte Fluminense. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 104p.
- Prevedello, B.M.S.; Prevedello, C.L.; Libardi, P.L. (1981) Simplificação analítica do método do perfil instantâneo para obtenção da condutividade hidráulica não saturada em condições de campo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 5:93-97.
- Primavesi, A. (1984) *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. 6. ed. São Paulo: Nobel, 541p.
- Rachwal, M.F.G.; Dedecek, R.A. (1996) Influência da aeração e da disponibilidade hídrica em Cambissolos e Latossolos com diferentes níveis de erosão sobre a produtividade e a qualidade da cultura da batata. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 20:485-491.
- Reichardt, K.; Timm, L.C. (2004) *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri, SP, Manole, cap. 3, 6, 7, 9, 11, 12, 16.
- Reichardt, K. (1990) *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo, Manole, caps 3,5.
- Reichardt, K. (1988) Capacidade de Campo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216.
- Reichardt, K.; Libardi, P.L.; Saunders, L.C.U.; Cadima, Z.A. (1979) Dinâmica da água em solo cultivado com milho. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 3:1-5.
- Reichardt, K. (1975) *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Campinas: Fundação Cargill, 268p.
- Resende, M.D.V. (1989) Seleção de genótipos de milho (*Zea mays* L.) em solos contrastantes. Piracicaba – SP, 1989. 212p. *Dissertação* (Mestrado em Melhoramento de Plantas) – Curso de Pós-graduação em Melhoramento de Plantas, Universidade de São Paulo.
- Richards, R.A.; López-Castañeda, C.; Gomezmacpherson, H.; Condon. A.G. (1993) Improving the efficiency of water use by plant breeding and molecular biology. *Irrigation Science*, 14:93-104.

- Ritschel, P.S.; Sousa, V.F. de; Conceição, M.A.F.; Souza, V.A.B. de; Coêlho, E.F. (1994) Efeito da época de suspensão da irrigação na produtividade do meloeiro (*Cucumis melo L.*). In: Congresso Brasileiro de Irrigação e Drenagem, 10., 1994, Salvador. *Anais ...*Salvador: ABID, 135-142p.
- Rose, C.W.; Stern, W.R. (1967) Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. *Aust. J. Soil Res.*, 5:11-19.
- Rose, C.W. (1966) *Agricultural physics*. Pergamon Press, London, 230p.
- Rosolem, C.A.; Fernandez, E.M.; Andreotti, M.; Crusciol, C.A.C. (1999) Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesq. Agrop. Bras.*, 34:821-828.
- Ross, P.J.; Williams, J.; Bristow, K.L. (1991) Equations for extending water - retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:923-927.
- Saeed, I.A.M.; El-Nadi, A.H. (1997) Irrigation effects on the growth, yield and water use efficiency of alfalfa. *Irrigation Science*, 17:63-68.
- Sanchez, P.A. (1981) *Suelos del trópico - características y manejo*. San José, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 645p.
- Segóvia, R.M.; Andrade, E.G. (1982) Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola. *Coleção Análise e Pesquisa*. Brasília: IAPAR. v.24.
- Silva, V.R. (2003) Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. *Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria*. 171p.
- Silva, A.P.; Kay, B.D. (1997) B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil. Sc. Soc. Am. Jour.*, 61:884-888.
- Silva, A.P.; Kay, B.D. (1997) Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883.
- Silva, A.P.; Kay, B.D. (1996) The sensivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329.

- Silva, A.P.; Kay, B.D.; Perfect, E. (1994) Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil. Sc. Soc. Am. Jour.*, 58:1775-1781.
- Silva, W. (1993) Tolerância de *Eucalyptus* spp. a herbicidas e a eficiência desses produtos no controle de plantas daninhas. Viçosa, UFV, 1993. Tese (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 86p.
- Silva, M.S.L.; Ribeiro, M.R. (1992) Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 16:397-402.
- Slatier, R.O. (1967) *Plant-water relationships*. New York, Academic Press, 366 p.
- Snedecor, G.W.; Cochran, W.G. (1967) *Statistical methods*. 6 ed. Ames: Iowa State University, 593p.
- Souza, M.S. (2004) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da Região Norte Fluminense. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) - Campos dos Goytacazes–RJ. Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF. 72p.
- Sousa, V.F. de; Coêlho, E.F.; Frizzone, J.A.; Folegatti, M.V.; Andrade Júnior, A.S.; Oliveira, F. das C. (1998) Frequência de irrigação por gotejamento na eficiência do uso da água no meloeiro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: SBEA, 214-216.
- Srinivas, K.; Hegde, D.M.; Havanagi, G.V. (1989) Plant water relations, canopy temperature, yield and water-use efficiency of watermelon (*Citrullus lanatus* (Thamb) Matsum et Nakai) under drip and furrow. *Journal of Horticultural Science*, 64:115-124.
- Stasovski, E., Peterson, C.A. (1993) The effects of drought and subsequent rehydration on the structure vitality and permeability of *Allium cepa* L. adventitious roots. *Canadian Journal of Botany*, 71:700-707.
- Steel, R.G.D.; Torrie, J.H.; Dickey, D. (1997) *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. 3 ed. Boston: WCB/McGraw Hill, 666p.

- Steel, R.G.D.; Torrie, J.H. (1980) *Principles and procedure of statistics*. 2.ed. Nova York: McGraw-Hill,. 633p.
- Steel, R.G.D.; Torrie, J.H. (1960) *Principles and procedures of statistics*. New York: McGraw-Hill, 481p.
- Stelluti, M. et al. (1998) Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. *Soil Till. Res.*, 46:145-151.
- Stone, L.F.; Silveira, P.M. (2001) Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 25:395-401.
- Taiz, L.; Zeiger, E. (2004) *Plant physiology*. Tradução de Eliane Romanato Santarém. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 719p.
- Taiz, L., Zeiger, E. (1998) *Plant physiology*. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates. 792p.
- Taylor, H.M., Willatt, S.T. (1983) Shrinkage of soybean roots. *Agron. J.*, 75:818-820.
- Taylor, H.M. Roberson, G.M., Parker Júnior., J.J. (1966) Soil strength-root penetrations relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102:18-22.
- Taylor, H.M., Gardner, H.R. (1963) Penetration of cotton seedling roots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science*, Baltimore, 96:153-156.
- Thorntwaite, C.W.; Mather, J.R. (1955) *The water balance*. Centerton, Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, v.8, n.1, 107p.
- Thurler, A.M. (2000) Determinação da capacidade de campo e retenção de umidade em solos do Terciário da Formação Barreira em função de suas características granulométricas e fatores estruturais. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Seropédica–RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. 144p.

- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. (1999) Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52:223-232.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581.
- Tormena, C.A.; Roloff, G. (1996) Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 20:333-339.
- Unger, P.W.; Kaspar, T.C. (1994) Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.*, 86:759-766.
- Valentin, J.L. (2000) *Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos*. Rio de Janeiro: Interciência, 117p.
- Valicheski, R.R. (2008) Atributos químicos do solo, estado nutricional e desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solos sob diferentes níveis de compactação e umidade. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- Van Genuchten, M.Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sc. Soc. Am. Jour.*, 44:892-898.
- Veihmeyer, F.J.; Hendrickson, A.H. (1955) Does transpiration decrease as the soil moisture decreases? *Trans. Am. Geophys. Um.* 36:425-448.
- Veihmeyer, F.J.; Hendrickson, A.H. (1949) Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil Sci*, 68:75-95.
- Veihmeyer, F.J.; Hendrickson, A.H. (1931) The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.*, 32:181-193.
- Weirich Neto, P.H.; Borghi, E.; Sverzut, C.B.; Mantovani, E.C.; Gomide, R.L.; Neues, W.L.C. (2006) Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. *Ciência Rural*, 36:1186-1192.

Winter, E., Simonson, R.W. (1978) Effects of soil compaction and development and yield of corn (maize). *Soil Science*, Baltimore, 58:435-443.

Zou, C.; Sands, R.; Buchan, G.; Hudson, I. (2000) Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. Jour. Soil Res.*, 38:947-958.

APÊNDICES

APÊNDICE A

As variáveis-resposta foram submetidas à análise de variância (ANOVA), confirmando os resultados obtidos por Peçanha (2007) e Valicheski (2008) e auxiliando nas análises propostas. Estes resultados estão apresentados nas tabelas de 1 a 6.

Tabela 1: Valores de F, níveis de significância e coeficiente de variação, para o consumo diário de água pelos coqueiros no solo 1 e 2.

Fonte de variação	Consumo de água	
	Solo 1	Solo 2
Comp (C)	2,97*	3,48*
Umid (U)	4,02*	1,38 ^{ns}
CXU	1,57 ^{ns}	0,70 ^{ns}
CV (%)	37,24	42,68

Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

Tabela 2: Valores de F, níveis de significância e coeficientes de variação para as variáveis fisiológicas avaliadas no solo 1 e 2: leitura do medidor portátil de clorofila (CLO), potencial hídrico ante-manhã (PSI), fluorescência inicial (F₀), rendimento quântico máximo (FVF), área foliar (ARE), fotossíntese líquida (FOT), condutância estomática (CON), transpiração (TRS), e déficit de pressão de vapor folha-ar (DPV).

Fonte de variação	CLO	PSI	FO	FVF	ARE	FOT	CON	TRS	DPV
	Solo 1								
Comp (C)	1,37 ^{ns}	0,55 ^{ns}	3,84 ^{ns}	4,52**	1,52 ^{ns}	2,59 ^{ns}	2,26 ^{ns}	0,89 ^{ns}	1,70 ^{ns}
Umid (U)	3,59*	3,28*	2,82 ^{ns}	10,53**	4,95**	3,28*	2,79 ^{ns}	3,49*	1,72 ^{ns}
CXU	0,96 ^{ns}	0,95 ^{ns}	4,01**	3,52**	3,02**	0,90 ^{ns}	1,11 ^{ns}	1,35 ^{ns}	1,85 ^{ns}
CV (%)	15,20	67,74	8,93	2,95	19,05	57,66	60,12	48,44	20,03
	Solo 2								
Comp (C)	5,42*	4,99**	0,71 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,33 ^{ns}	1,13 ^{ns}	1,96 ^{ns}	1,54 ^{ns}	0,90 ^{ns}
Umid (U)	3,41*	3,01*	3,31*	3,60*	1,51 ^{ns}	2,40 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,66 ^{ns}
CXU	1,19 ^{ns}	1,70 ^{ns}	2,14 ^{ns}	1,66 ^{ns}	1,20 ^{ns}	1,43 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,40 ^{ns}	1,55 ^{ns}
CV (%)	11,00	56,26	8,05	1,93	37,98	40,47	56,41	37,04	20,25

Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

Tabela 3: Valores de F, níveis de significância e coeficientes de variação para as variáveis morfológicas avaliadas no solo 1 e 2: altura da folha central (FCE), número de folhas (NFL, circunferência da estipe (CIR), altura da folha maior (FMA), folha com folíolos abertos (FFO), número de folhas mortas (FMO).

Fonte de variação	FCE	NFL	CIR	FMA	FFO	FMO
	Solo 1					
Comp (C)	-	1,86 ^{ns}	2,45 ^{ns}	2,21 ^{ns}	1,54 ^{ns}	1,05 ^{ns}
Umid (U)	-	5,56*	3,29*	1,83 ^{ns}	3,20*	0,20 ^{ns}
CXU	-	0,79 ^{ns}	0,85 ^{ns}	1,45 ^{ns}	0,37 ^{ns}	1,03 ^{ns}
CV (%)	-	24,22	24,80	19,31	56,01	46,26
Solo 2						
Comp (C)	-	3,81*	3,43*	3,05*	6,88**	0,43 ^{ns}
Umid (U)	-	3,29*	8,09**	4,58**	7,05**	0,44 ^{ns}
CXU	-	1,42 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,70 ^{ns}	1,56 ^{ns}	0,67 ^{ns}
CV (%)	-	15,17	21,61	17,12	24,25	83,23

Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

Tabela 4: Valores de F, níveis de significância e coeficientes de variação (CV) para os atributos nutricionais das plantas no solo 1 e 2: nitrogênio (N), fósforo (P), magnésio (Mg), potássio (K), cálcio (Ca), enxofre (S), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e cloro (Cl).

Fonte de variação	N	P	Mg	K	Ca	S	Mn	Fe	Cu	Zn	Cl
	Solo 1										
Comp (C)	0,08 ^{ns}	1,80 ^{ns}	0,12 ^{ns}	3,18 ^{ns}	0,62 ^{ns}	2,96*	9,28**	0,45 ^{ns}	1,52 ^{ns}	1,66 ^{ns}	5,01**
Umid (U)	1,88 ^{ns}	0,15 ^{ns}	1,38 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,59 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,24 ^{ns}	2,14 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,65 ^{ns}	2,07 ^{ns}
CXU	1,33 ^{ns}	1,09 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,77 ^{ns}	1,71 ^{ns}	2,05*	1,04 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,60 ^{ns}	2,61*
CV (%)	10,19	8,30	14,66	22,59	15,78	18,90	21,63	35,15	14,53	22,78	18,50
Solo 2											
Comp (C)	2,13 ^{ns}	3,90*	0,04 ^{ns}	0,21 ^{ns}	1,62 ^{ns}	1,07 ^{ns}	0,82 ^{ns}	1,20 ^{ns}	2,63 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,71 ^{ns}
Umid (U)	3,08*	0,59 ^{ns}	2,01 ^{ns}	1,01 ^{ns}	7,37**	0,69 ^{ns}	1,02 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,75 ^{ns}	3,76 ^{ns}
CXU	2,91*	1,76 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,69 ^{ns}	1,91 ^{ns}	1,30 ^{ns}	1,98 ^{ns}	1,63 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,79 ^{ns}
CV (%)	6,71	6,38	10,20	17,34	13,78	11,51	28,47	29,51	14,69	11,01	14,53

Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

Tabela 5a: Valores de F, níveis de significância e coeficientes de variação (CV) para os atributos químicos do solo 1: pH, teor de magnésio (Mg), potássio (K), cálcio (Ca), alumínio (Al), hidrogênio e alumínio (H+Al), sódio (Na) e carbono (C), teor de fósforo (P), soma de bases (SB), CTC efetiva (CTC_{ef}), CTC a pH 7,0 (CTC₇), saturação de alumínio (m%), saturação de bases (V%) e saturação de sódio (Na%).

Fonte de variação	pH	Mg	K	Ca	Al	H+Al	Na	C
	Cmol g kg							
Profundidade 0,0 – 0,10 m								
Comp (C)	1,73 ^{ns}	2,25 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,36 ^{ns}	2,29 ^{ns}	0,72 ^{ns}	1,45 ^{ns}
Umid (U)	0,88 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,15 ^{ns}
CXU	0,77 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,44 ^{ns}	1,81 ^{ns}	0,72 ^{ns}	1,09 ^{ns}
CV (%)	8,88	50,30	57,98	52,05	56,91	17,15	71,95	6,82
Profundidade 0,10 – 0,20 m								
Comp (C)	0,24 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,36 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,14 ^{ns}	2,16 ^{ns}	0,54 ^{ns}
Umid (U)	0,95 ^{ns}	2,02 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,36 ^{ns}	1,94 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,30 ^{ns}	0,34 ^{ns}
CXU	0,61 ^{ns}	0,51 ^{ns}	1,14 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,09 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,33 ^{ns}
CV (%)	5,75	56,14	33,81	60,55	32,33	10,76	26,13	8,62
Profundidade 0,20 – 0,30 m								
Comp (C)	5.12 ^{**}	3.62 [*]	1.35 ^{ns}	1.13 ^{ns}	0.58	0,79 ^{ns}	4,02 [*]	2,00 ^{ns}
Umid (U)	0.66	2.82	0.05 ^{ns}	1.52 ^{ns}	0.45	0,44 ^{ns}	2,49 ^{ns}	3,98 [*]
CXU	1.38	2.42 [*]	1.65 ^{ns}	1.44 ^{ns}	0.64	0,87 ^{ns}	1,44 ^{ns}	0,63 ^{ns}
CV (%)	3.49	37,99	69,03	32,68	31,13	35,04	52,39	6,78
Profundidade 0,0 – 0,10 m								
	P	SB	CTC _{ef}	CTC ₇	m%	V%	Na%	
Comp (C)	1,21 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,86 ^{ns}	1,56 ^{ns}	0,52 ^{ns}	
Umid (U)	0,89 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,92 ^{ns}	
CXU	1,03 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,80 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,63 ^{ns}	
CV (%)	20,30	45,60	43,30	31,66	84,79	14,79	49,20	
Profundidade 0,10 – 0,20 m								
Comp (C)	4,77 ^{**}	1,24 ^{ns}	1,24 ^{ns}	1,35 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,79 ^{ns}	2,30 ^{ns}	
Umid (U)	0,60 ^{ns}	1,35 ^{ns}	1,37 ^{ns}	1,26 ^{ns}	2,13 ^{ns}	1,68 ^{ns}	0,32 ^{ns}	
CXU	0,50 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,14 ^{ns}	
CV (%)	14,81	52,72	47,85	30,71	70,86	22,33	21,86	
Profundidade 0,20 – 0,30 m								
Comp (C)	1,41 ^{ns}	1,68 ^{ns}	1,67 ^{ns}	2,13 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,51 ^{ns}	2,27 ^{ns}	
Umid (U)	0,19 ^{ns}	1,90 ^{ns}	1,77 ^{ns}	1,99 ^{ns}	1,40 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,97 ^{ns}	
CXU	0,94 ^{ns}	1,56 ^{ns}	1,50 ^{ns}	2,17 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,65 ^{ns}	1,13 ^{ns}	
CV (%)	20,43	30,55	29,31	20,90	42,48	12,02	39,07	

Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

Tabela 5b: Valores de F, níveis de significância e coeficientes de variação (CV) para os atributos químicos do solo 2: pH, teor de magnésio (Mg), potássio (K), cálcio (Ca), alumínio (Al), hidrogênio e alumínio (H+Al), sódio (Na) e carbono (C), teor de fósforo (P), soma de bases (SB), CTC efetiva (CTC_{ef}), CTC a pH 7,0 (CTC₇), saturação de alumínio (m%), saturação de bases (V%) e saturação de sódio (Na%).

Fonte de variação	pH	Mg	K	Ca	Al	H+Al	Na	Carb
Profundidade 0,0 – 0,10 m								
Comp (C)	2,43 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,23 ^{ns}	1,01 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,16 ^{ns}	2,86 ^{ns}
Umid (U)	2,88 ^{ns}	1,39 ^{ns}	3,08*	2,31 ^{ns}	5,50**	3,14*	2,24 ^{ns}	1,40 ^{ns}
CXU	0,81 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,52 ^{ns}
CV (%)	8,90	97,98	48,76	36,83	57,41	17,93	69,08	4,96
Profundidade 0,10 – 0,20 m								
Comp (C)								
Umid (U)								
CXU								
CV (%)								
Profundidade 0,20 – 0,30 m								
Comp (C)	1,75 ^{ns}	1,29 ^{ns}	2,77 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,83 ^{ns}	0,61 ^{ns}	1,53 ^{ns}	1,37 ^{ns}
Umid (U)	2,63 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,57 ^{ns}	2,12 ^{ns}	2,79 ^{ns}	0,69 ^{ns}	1,18 ^{ns}	3,43*
CXU	0,40 ^{ns}	0,35 ^{ns}	1,02 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,29 ^{ns}	1,66 ^{ns}	1,38 ^{ns}	0,76 ^{ns}
CV (%)	7,18	28,81	35,79	28,87	44,10	30,07	48,80	10,10
Profundidade 0,0 – 0,10 m								
	P	SB	CTC _{ef}	CTC ₇	M%	V%	Na%	
Comp (C)	0,53 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,28 ^{ns}	
Umid (U)	1,55 ^{ns}	2,14 ^{ns}	1,59 ^{ns}	1,48 ^{ns}	5,23**	3,79 ^{ns}	2,86 ^{ns}	
CXU	0,75 ^{ns}	1,04 ^{ns}	1,08 ^{ns}	1,05 ^{ns}	0,88 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,60 ^{ns}	
CV (%)	17,03	52,17	42,50	27,44	77,05	24,63	52,71	
Profundidade 0,20 – 0,30 m								
Comp (C)	0,17 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,58 ^{ns}	1,58 ^{ns}	1,00 ^{ns}	2,25 ^{ns}	
Umid (U)	3,40*	1,72 ^{ns}	2,27 ^{ns}	0,53 ^{ns}	1,94 ^{ns}	1,11 ^{ns}	1,05 ^{ns}	
CXU	1,66 ^{ns}	0,88 ^{ns}	1,13 ^{ns}	1,70*	0,33 ^{ns}	1,29 ^{ns}	1,30 ^{ns}	
CV (%)	30,38	20,30	17,74	16,86	48,31	17,72	40,70	

Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

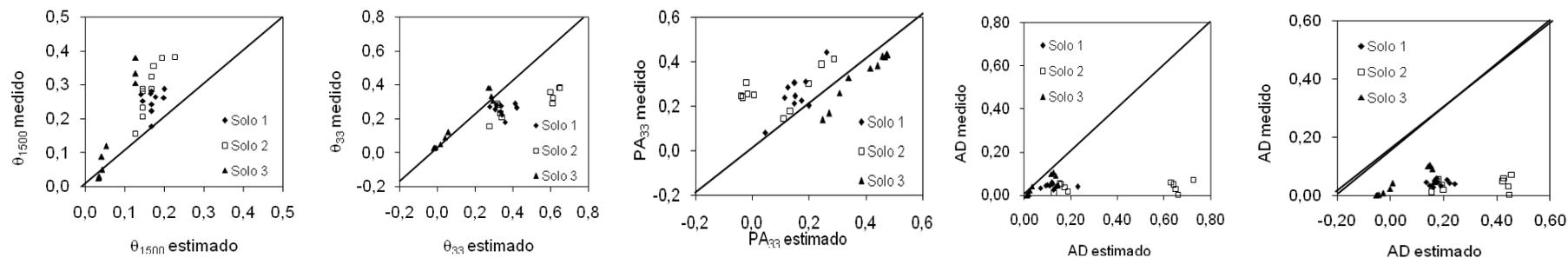
Tabela 6: Valores de F, níveis de significância e coeficientes de variação (CV) para densidade radicular (D_{med}), comprimento (compL), superfície (supL), volume (volL), densidade de raízes grossas (DRG), densidade de raízes finas (DRF), densidade total (DRT) e poder relativo de penetração radicular (PRPR) no solo 1 e 2.

Fonte de variação	Dmed	compL	supL	volL	DRG	DRF	DRT	PRPR
Solo 1								
Comp (C)	3,69*	6,10**	4,86**	3,69*	3,21*	3,29*	3,53*	17,08**
Umid (U)	2,87 ^{ns}	2,74 ^{ns}	3,11*	3,19*	2,29 ^{ns}	2,43 ^{ns}	2,56 ^{ns}	0,83 ^{ns}
CXU	2,28*	1,08 ^{ns}	1,08 ^{ns}	1,26 ^{ns}	2,10 ^{ns}	1,52 ^{ns}	1,79 ^{ns}	0,92 ^{ns}
CV (%)	7,79	49,76	51,24	54,60	59,30	53,04	53,48	59,37
Solo 2								
Comp (C)	1,53 ^{ns}	4,96**	4,98**	5,07**	3,96*	6,50**	5,32**	14,29**
Umid (U)	6,15**	5,61**	7,92**	10,58**	3,70*	8,23**	5,94**	4,10*
CXU	1,54 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,84 ^{ns}	1,08 ^{ns}	1,05 ^{ns}	1,32 ^{ns}	1,22 ^{ns}	0,63 ^{ns}
CV (%)	9,79	40,45	41,21	4,98	51,39	35,43	40,95	42,01

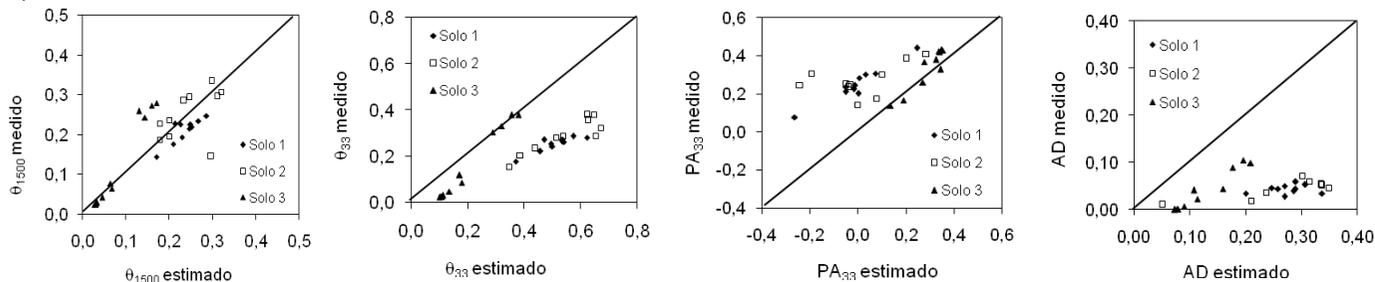
Obs: * < 0,05; ** < 0,01; ns: não significativo

APÊNDICE B

Aina and Periaswamy (1985)



Arruda et al. (1987)



Bell e van Keulen (1995, 1996)

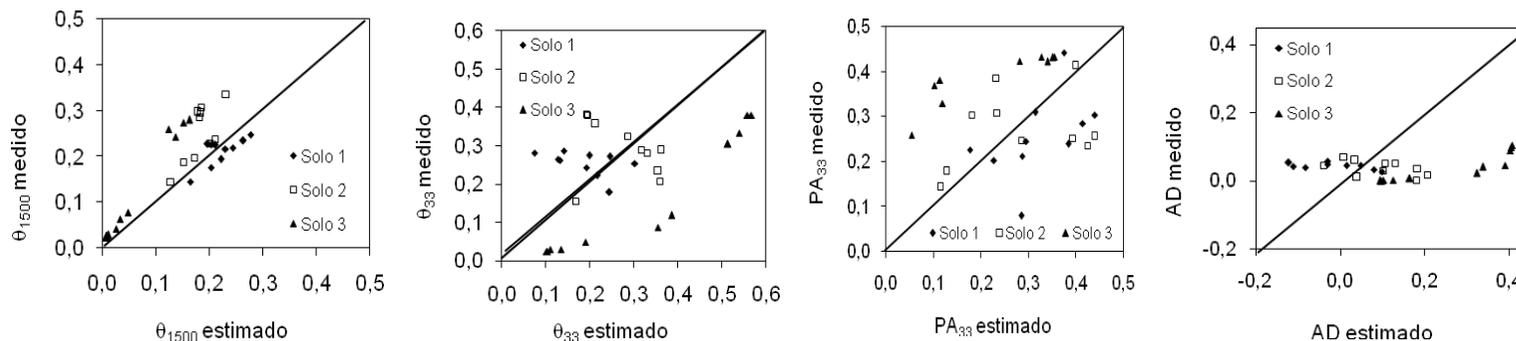
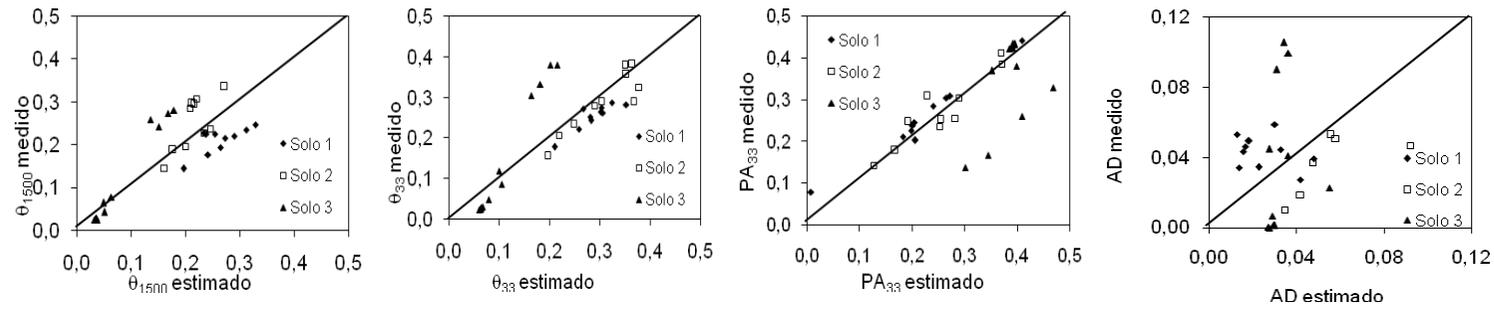
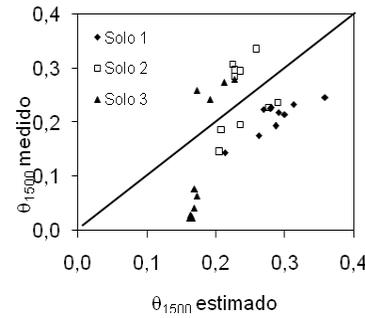


Figura 1. Gráficos de correlações entre os valores dos atributos do solo observados e os estimados pelas FPTs, para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Dijkerman (1988)



FAO (1974)



Lal (1979)

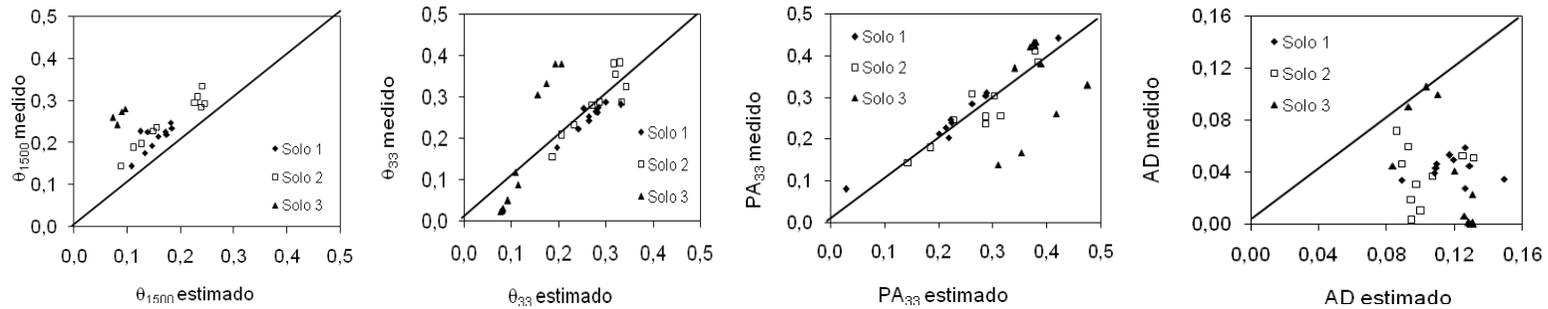
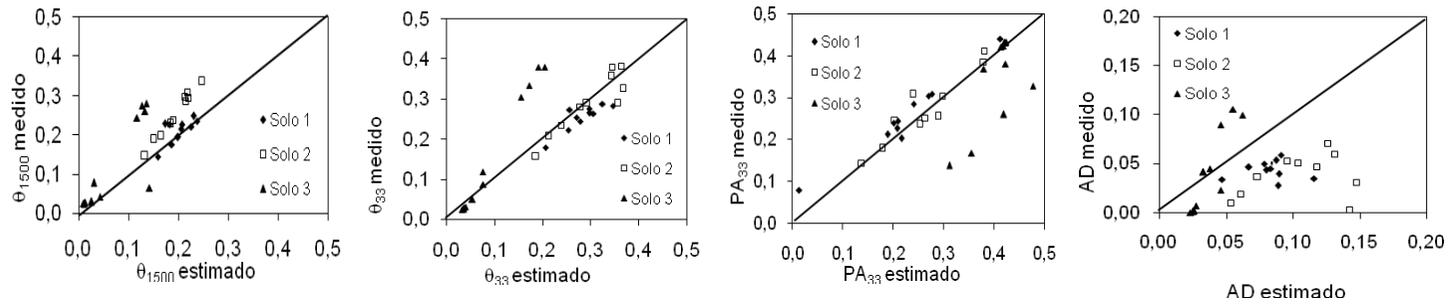
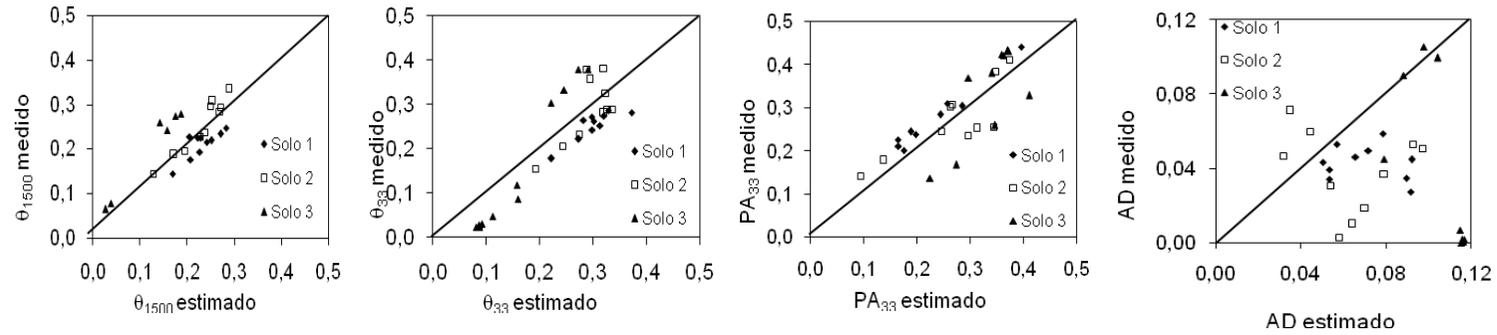


Figura 2. Gráficos de correlações entre os valores dos atributos do solo observados e os estimados pelas FPTs, para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Oliveira et al. (2002)



Pidgeon (1972)



Saxton e Rawls (2006)

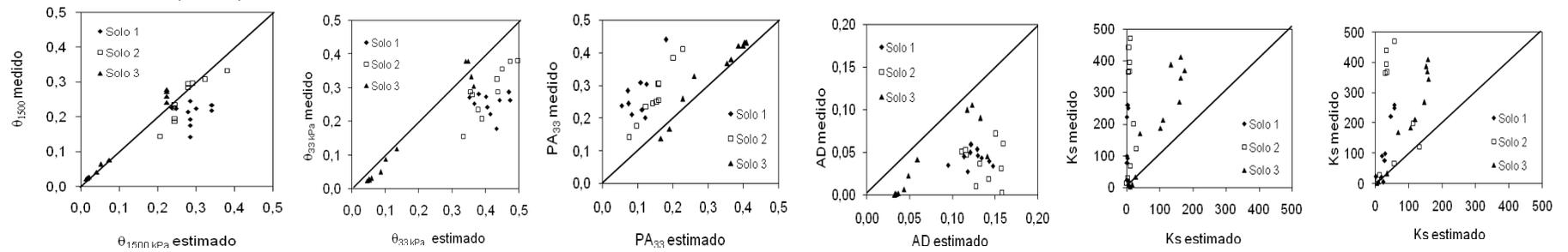
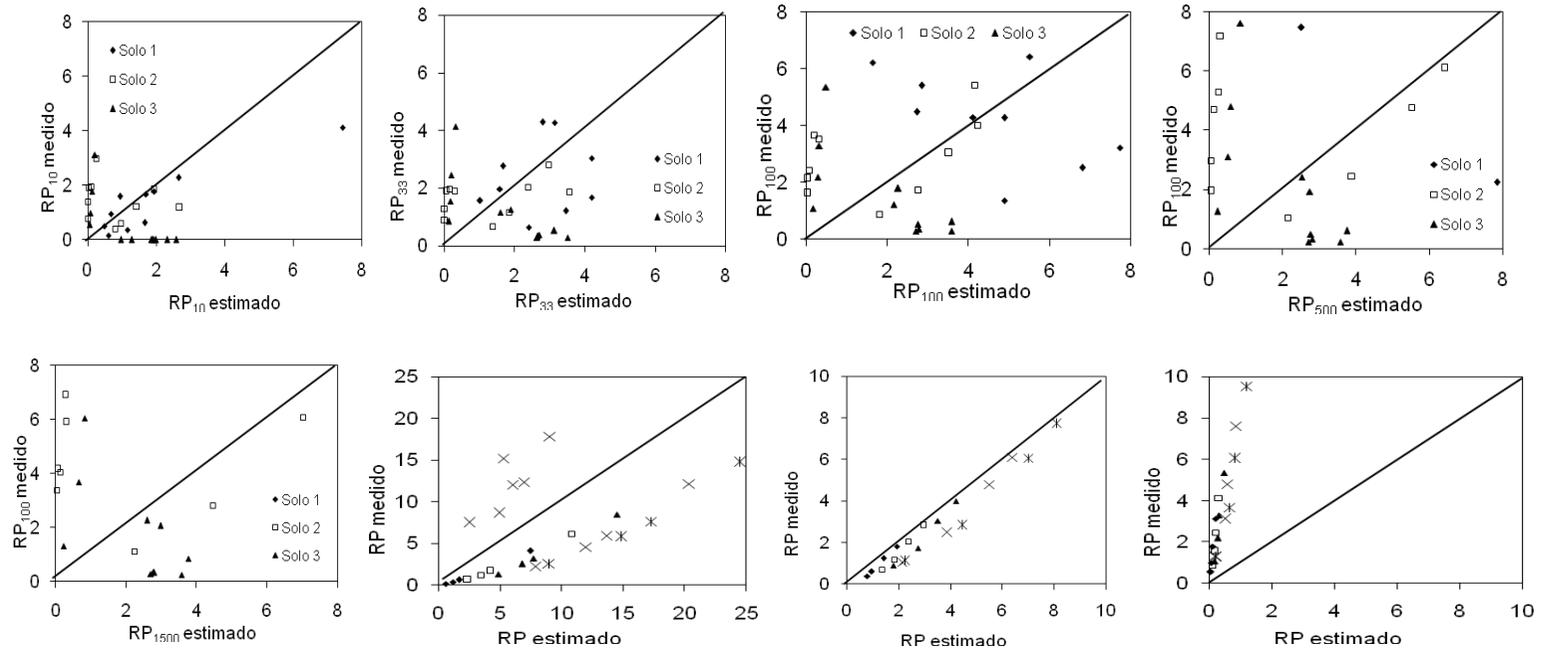


Figura 3. Gráficos de correlações entre os valores dos atributos do solo observados e os estimados pelas FPTs, para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Silva e Kay (1997)



Soil Survey (1975, 1990, 1992)

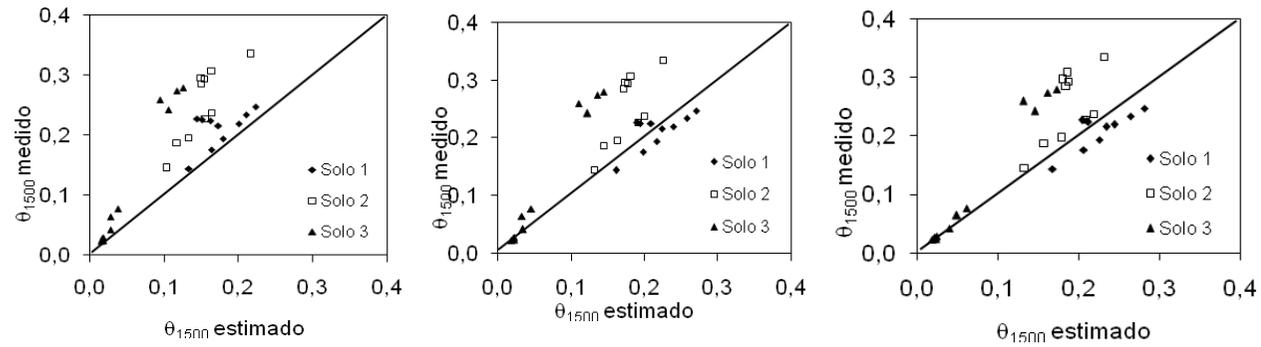
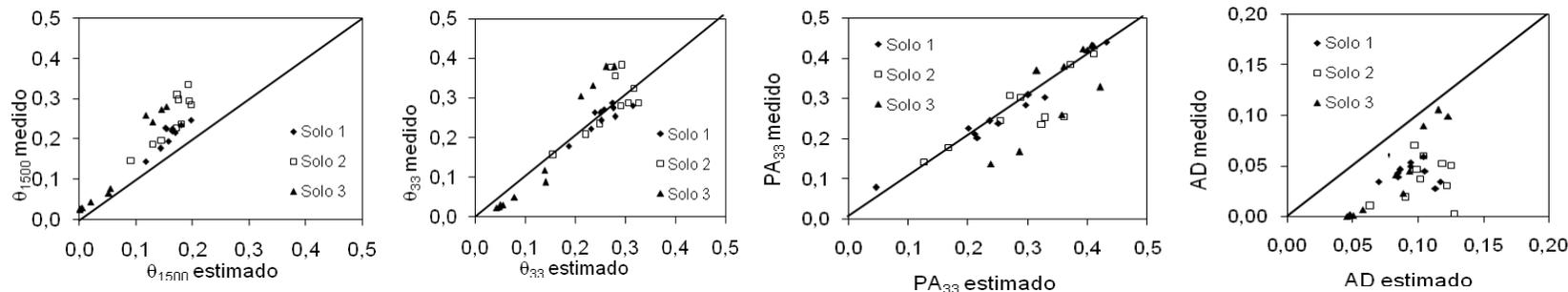
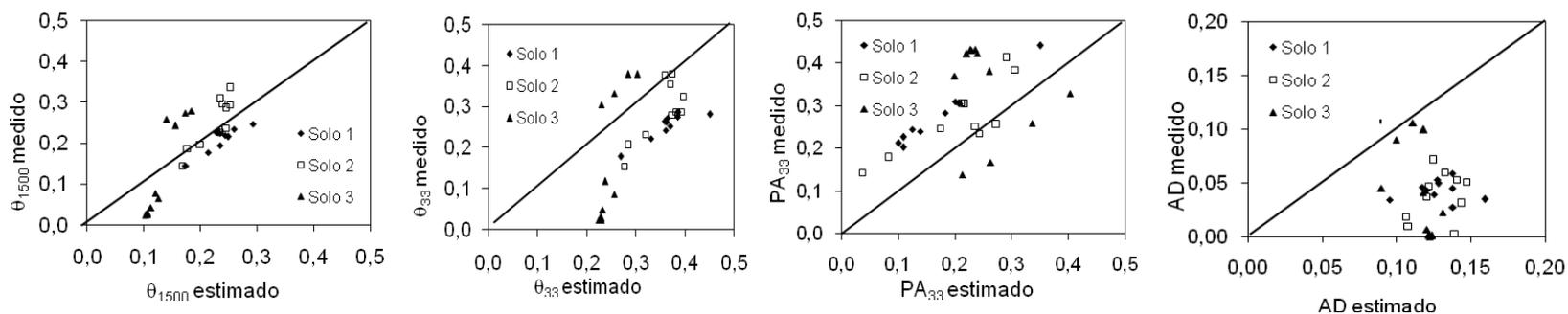


Figura 4. Gráficos de correlações entre os valores dos atributos do solo observados e os estimados pelas FPTs, para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Solano (2003)



Urach (2007)



Campbel e Shiozawa (1994), Cosby et al. (1084), Puckett et al. (1984), Dane e Puckett (1994) e Brakensiek et al. (1984)

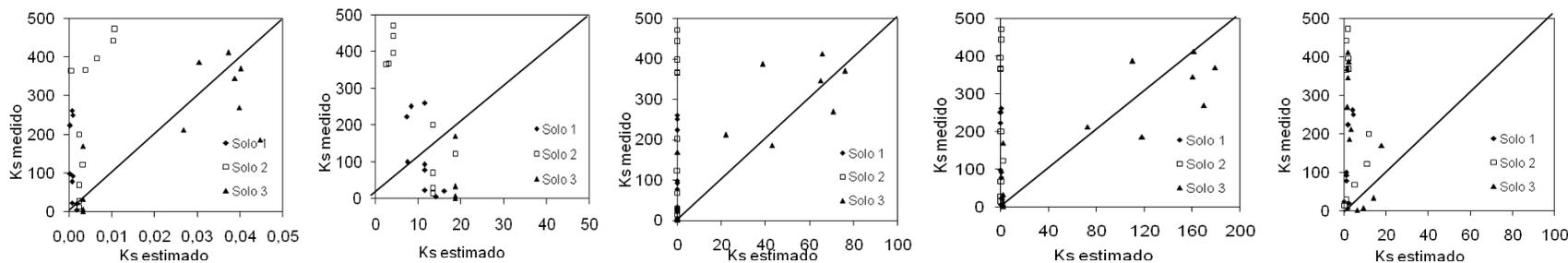


Figura 5. Gráficos de correlações entre os valores dos atributos do solo observados e os estimados pelas FPTs, para o Argissolo (solo 1), o Cambissolo (solo 2) e o Neossolo (solo 3).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)