

JONEZ FIDALSKI

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO
NAS ENTRELINHAS DE CITROS**

**MARINGÁ
PARANÁ – BRASIL
MAIO – 2007**

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

JONEZ FIDALSKI

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO
NAS ENTRELINHAS DE CITROS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Doutor.

Maringá – Paraná – Brasil

Maio – 2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

F449q Fidalski, Jonez
Qualidade física do solo sob sistemas de manejo nas
entrelinhas de citros / Jonez Fidalski. - Maringá, PR
: [s.n.], 2007.
84 f. : il. color.

Orientador : Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Maringá. Programa de Pós-graduação em Agronomia, 2007.

1. Solo - Citrus. 2. Física do solo. 3. Solo -
Indicadores - Qualidade. 4. Densidade do solo. 5. Solo
- Manejo. 6. Solo - Carbono orgânico. 7. Solo - Água.
8. Solo - Gramínea. 9. Solo - Leguminosa. 10.
Fotossíntese. 11. Solo - Compactação. 12. Intervalo
hídrico - Ótimo. 13. Solo - Plantas - Cobertura. I.
Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-
graduação em Agronomia. II. Título.

CDD 21.ed.631.43

JONEZ FIDALSKI

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO NAS
ENTRELINHAS DE CITROS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, na área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de maio de 2007.

Dr. Celso Jamil Marur

Prof. Dr. Décio Sperandio

Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Müller

Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena
(Orientador)

DEDICÁTORIA

Dedico este trabalho a minha família: esposa Maria das Graças Garcia Iglesias Fidalski e filha Ana Carolina Iglesias Fidalski.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), agradeço à oportunidade de realizar o curso.

Ao professor Dr. Cássio Antonio Tormena, agradeço à orientação e contribuições técnicas e científicas para a elaboração de artigos científicos.

À Fundação Araucária, agradeço ao apoio financeiro ao projeto de pesquisa “Manejo do solo e caracterização das relações hídricas em plantas de citros na região do Arenito Caiuá, noroeste do Estado do Paraná”.

Ao citricultor Osmar Inácio Ferrari e família, agradeço à cessão e manutenção da área experimental na Fazenda São Judas Tadeu, Município de Alto Paraná (PR).

BIOGRAFIA

JONEZ FIDALSKI, filho de Armando Fidalski e Lídia Moroso Fidalski, nasceu na cidade de Chapecó, Estado de Santa Catarina, no dia 23 de maio de 1965. Em dezembro de 1997, graduou-se em Agronomia na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Desde julho de 1998, atua profissionalmente como pesquisador da Área de Solos do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), na Estação Experimental de Paranavaí. Em fevereiro de 2004, concluiu o Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Estadual de Maringá (UEM).

ÍNDICE

	RESUMO	vii
	ABSTRACT	viii
1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Características edafoclimáticas exigidas pelos citros	3
2.2	Comportamento fisiológico dos citros	4
2.3	Sistemas de manejo de solo em citros	6
2.4	Posições de amostragem de solo em pomares	8
2.5	Qualidade do solo	11
2.6	Indicadores de qualidade física do solo	12
2.6.1	Densidade, porosidade, resistência do solo à penetração, carbono orgânico e teor de água no solo	12
2.6.2	Intervalo hídrico ótimo	16
2.6.3	Índice S de qualidade física do solo	17
2.6.4	Indicadores da capacidade de aeração total e de armazenamento de água do solo	19
2.6.5	Taxa de estratificação de carbono orgânico do solo	20
2.6.6	Funções de pedotransferência	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	Caracterização do experimento	23
3.2	Caracterização do solo	28
3.3	Amostragem de solo	30
3.4	Indicadores de qualidade física do solo	31
3.5	Intervalo hídrico ótimo	32
3.6	Índice S de qualidade física do solo	34
3.7	Indicadores da capacidade de aeração total e de armazenamento de água do solo	34
3.8	Taxa de estratificação de carbono do orgânico do solo	35
3.9	Avaliações fisiológicas nas folhas das laranjeiras	36

3.10	Análises estatísticas	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total	40
4.2	Indicadores da capacidade de aeração total e de armazenamento de água do solo	42
4.3	Índice S de qualidade física do solo	45
4.4	Taxa de estratificação de carbono orgânico do solo	48
4.5	Curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração	49
4.6	Água disponível e intervalo hídrico ótimo	53
4.7	Teor de água no solo	56
4.8	Variáveis fisiológicas das laranjeiras “Pêra”	59
4.9	Relações solo-planta	62
4.10	Considerações gerais	69
5	CONCLUSÕES	71
6	REFERÊNCIAS	72

RESUMO

FIDALSKI, Jonez, Dr. Universidade Estadual de Maringá, Maio de 2007. **Qualidade física do solo sob sistemas de manejo nas entrelinhas de citros**. Professor orientador: Dr. Cássio Antonio Tormena.

O tráfego de máquinas agrícolas ocorre próximo à copa das laranjeiras e compromete a qualidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico sob plantas permanentes nas entrelinhas de laranjeira “Pêra” enxertada sobre limoeiro “Cravo”, implantados em 1993, no noroeste do Paraná. Os tratamentos gramínea mato-grosso ou batatais *Paspalum notatum* e leguminosa amendoim forrageiro *Arachis pintoii*, foram comparados ao manejo tradicional da vegetação espontânea dessecada com herbicida pós-emergente. Entre 1999 a 2002, avaliou-se o teor de água do solo nas posições de amostragem de solo sob a projeção da copa das laranjeiras e no entrerrodado da entrelinha bem como variáveis fisiológicas nas folhas de laranjeiras: fotossíntese, condutância estomática e potencial da água. Em maio de 2003, coletaram-se 216 amostras de solo na camada de 0-15 cm, nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha, para quantificar os indicadores de qualidade física do solo: densidade, variáveis de porosidade, resistência do solo à penetração, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, intervalo hídrico ótimo, índice S, indicador de armazenamento de água e de aeração total, carbono orgânico e taxa de estratificação de carbono orgânico do solo. As variáveis fisiológicas caracterizaram que as laranjeiras foram dependentes da água do horizonte superficial do solo arenoso sob o manejo da gramínea e do perfil do solo com textura média sob o manejo da leguminosa. A qualidade física do solo foi dependente das plantas de cobertura permanente na posição de amostragem de solo rodado, decrescendo na seguinte ordem: gramínea, leguminosa e vegetação espontânea.

Palavras-chave: Densidade do solo. Água no solo. Carbono orgânico do solo. Gramínea. Leguminosa. Fotossíntese. Intervalo hídrico ótimo. Manejo do solo.

ABSTRACT

FIDALSKI, Jonez, Dr. State University of Maringá, May 2007. **Soil physical quality under groundcover management systems for citrus**. Adviser: Dr. Cássio Antonio Tormena.

The traffic of agricultural machinery occurs near the canopy of orange trees and compromises the soil quality. The aim of this work was to evaluate the soil physical quality in groundcover management systems in "Pêra" orange grafted onto "Rangpur" lime, which were established in 1993 on a Typic Paleudult in northwestern Paraná, Brazil. The treatments Bahiagrass *Paspalum notatum*, Perennial peanut *Arachis pinto* groundcovers were compared with usual management in which spontaneous vegetation are controlled by post-emergence herbicide. From 1999 to 2002 were evaluated water content soil under tree crown projection and between the wheel tracks, as well physiological variables in the orange leaf (photosynthesis, stomatal conductance and water potential). In May 2003, two hundred and sixteen undisturbed soil samples were collected at 0-15 cm depth in soil positions samples under the underneath the wheel tracks and in between the wheel tracks. The following soil physical quality indicators were assessed: soil bulk density, porosity variables, soil resistance to penetration, field capacity, wilting point, available water content, least limiting water range, S index, water and total aeration storage indicators, organic carbon and organic carbon stratification ratio. The physiological variables characterized that orange trees were dependent water soil in the sandy of surface horizon under groundcover Bahiagrass, and in the soil profile of horizons sand clay and sandy clay cloam under groundcover Perennial peanut. The soil physical quality was dependent groundcover management systems underneath the wheel tracks decreased in following order: Bahiagrass, Perennial peanut and spontaneous vegetation.

Key words: Soil bulk density. Soil water. Soil carbon organic. Grass. Legume. Photosynthesis. Least limiting water range. Soil management.

1 INTRODUÇÃO

A implantação da citricultura paranaense foi iniciada na década de 1990, no noroeste do Paraná, em solos de alta susceptibilidade à erosão hídrica, em consonância com as sugestões de manejo de solo nas entrelinhas dos pomares de fruteiras de clima temperado, que indicavam a manutenção de plantas de cobertura permanente na entrelinha em detrimento dos sistemas de manejo de solo que controlavam as plantas por meio da utilização de grade ou herbicida.

O processo de degradação do solo observado na fase de implantação dos pomares de laranjeiras, causado pela redução da cobertura do solo nas entrelinhas dos pomares de laranjeiras, poderia ser contornado com a manutenção da cobertura vegetal nas entrelinhas, preferencialmente com gramíneas, manejadas com roçadas mecânicas. Apesar da conotação conservacionista, os citricultores e a assistência técnica questionaram a validade desse sistema de manejo de solo, por terem observado, empiricamente, a redução do desenvolvimento das laranjeiras. Essas constatações coincidiram com os resultados de pesquisa semelhantes aos da citricultura brasileira, obtidos nas décadas de 1950 a 1980, que mostravam o comprometimento da produção de frutos sob o manejo da roçada da vegetação comparado ao uso de grade nas entrelinhas. Em consequência desses resultados, verificou-se, na década de 1990, a retomada dos estudos de sistemas de manejo da cobertura do solo em pomares de citros.

A manutenção da cobertura do solo nas entrelinhas do pomar poderia reduzir o impacto sob o tráfego dos pneus do trator na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha. Essa posição de amostragem de solo constituiu-se, atualmente, o local de maior restrição física para o desenvolvimento radicular das laranjeiras, localizado entre o limite externo da projeção da copa das laranjeiras, na qual são realizadas as adubações químicas, e o centro da entrelinha.

Paralelamente à implantação da citricultura e à condução de experimentos de manejo da cobertura do solo nas entrelinhas de laranjeiras, houve a evolução do conceito de qualidade do solo, numa visão integrada à capacidade do solo de exercer suas funções, quais sejam: reter e disponibilizar água; ciclar e armazenar nutrientes; filtrar poluentes; e sustentar o desenvolvimento e a produção das plantas. A qualidade do solo não pode ser medida diretamente, mas é possível de ser avaliada por meio dos indicadores de qualidade do solo. Desde 1990, surgiram inúmeros indicadores de qualidade física do solo que ainda não foram utilizados na avaliação de sistemas de manejo de cobertura do solo em pomares de laranjeiras.

Para mitigar os efeitos deletérios do tráfego de tratores de pneus na posição de amostragem de solo rodado das entrelinhas dos pomares de laranjeiras, descartando as práticas mecânicas como a escarificação e subsolagem, realizou-se avaliação da qualidade física do solo por meio de inúmeros indicadores físicos em um experimento de longa duração, comparando os sistemas de manejo de cobertura do solo nas entrelinhas com vegetações permanentes de gramínea, leguminosa e vegetação espontânea, sendo esta manejada com herbicida e caracterizada pela reduzida produção de biomassa. A avaliação da qualidade física do solo foi complementada com avaliações do teor de água no solo e de algumas variáveis fisiológicas nas folhas das laranjeiras.

A hipótese deste trabalho é que a cobertura do solo com gramínea e leguminosa permanente nas entrelinhas das laranjeiras atenua a compactação do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha do pomar e melhora a qualidade física do solo, de modo a não comprometer as relações hídricas e fisiológicas das laranjeiras. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar os indicadores de qualidade física do solo (densidade do solo, variáveis de porosidade do solo, carbono orgânico do solo, resistência do solo à penetração, teor de água no solo, água disponível, intervalo hídrico ótimo, indicador de aeração total do solo, indicador de armazenamento de água do solo, índice S e taxa de estratificação de carbono orgânico do solo) e variáveis fisiológicas nas folhas de laranjeira “Pêra” (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água) em resposta a diferentes plantas de cobertura permanente do solo nas entrelinhas do pomar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A implantação dos pomares de laranjeira no noroeste do Paraná coincidiu com a evolução do conceito de qualidade do solo, que definiu inúmeros indicadores de qualidade do solo para a sua avaliação, a partir da década de 1990. Entretanto, ainda não foi realizada a avaliação da qualidade física dos solos desenvolvidos a partir do arenito da Formação Caiuá, altamente susceptíveis à erosão hídrica e dependentes de práticas de manejo da cobertura permanente da superfície do solo (FIDALSKI, 1997a).

2.1 Características edafoclimáticas exigidas pelos citros

A aptidão do noroeste do Paraná à citricultura se deve às condições climáticas favoráveis proporcionadas pelo clima subtropical (Cfa), que, de acordo com a classificação climática de Köppen, é caracterizado por temperatura média de 23 °C e amplitude entre 18 a 29 °C, com precipitação anual de 1.500 mm e sem estação seca definida (IAPAR, 2000). Essas condições climáticas são mais adequadas para os citros do que as do cerrado e do planalto paulista, que apresentam período de estiagem com severa falta de água no solo durante o inverno (RODRIGUEZ, 1957; PACHECO et al., 1975).

Os solos desenvolvidos a partir do arenito da Formação Caiuá (EMBRAPA, 1984), com predominância de Latossolos e Argissolos Vermelhos distróficos, apresentam perfis com mais de 2 m de profundidade, granulometria pertencente às classes texturais areia (teores de argila inferior a 150 g kg⁻¹) no horizonte superficial e média (teores de argila entre 150-300 g kg⁻¹) nos horizontes subsuperficiais (EMBRAPA, 2006). A presença do horizonte A pertencente à classe areia nos Argissolos reduz a capacidade de armazenamento de água disponível para as plantas, proporcionalmente a sua espessura no perfil (CORÁ et al., 2005).

Há riscos de deficiência hídrica em Latossolo e Argissolo Vermelho distrófico textura média no noroeste do Paraná. As probabilidades de

ocorrência de deficiência hídrica durante 5, 10 e 20 dias são, respectivamente, de 76, 56 e 42 % nos meses de julho e agosto (CALHEIROS et al., 1992). Em Argissolo Vermelho distrófico latossólico cultivado com laranjeira “Folha Murcha” em Paranavaí (PR), Stenzel et al. (2005) não verificaram fluxo de crescimento vegetativo entre março e abril, atribuído à deficiência hídrica. Em solos originários da formação do Basalto paranaense, em Maringá (PR), foi comprovada a eficiência técnica da irrigação aplicada em um pomar de laranjeira “Pêra” (CALZAVARA et al., 2000).

2.2 Comportamento fisiológico dos citros

As laranjeiras [*Citrus sinensis* (L.) Osb.] apresentam metabolismo de plantas do tipo C₃, com trocas de CO₂ e vapor de água predominantemente na superfície adaxial das folhas (SYVERTSEN, 1999). Os citros são tolerantes ao estresse hídrico, mas sob tais condições a sua produção é reduzida (TORRECILLAS et al., 2001). De acordo com Syvertsen (1999), os citros apresentam relativamente baixa taxa de fotossíntese comparada às demais espécies arbóreas, mas requerem grande quantidade de carboidratos para a estrutura de uma planta perene, armazenamento e produção. Sob condições de estresse hídrico, as plantas de laranjeira reduzem a fotossíntese nas horas de maior temperatura (MEDINA et al., 1999).

A laranjeira “Valência” cultivada em vasos e submetida ao dessecamento do substrato, simulando condições de estresse mais severo, reduziu a taxa de fotossíntese e promoveu o fechamento dos estômatos nas folhas (MACHADO et al., 1999). Esses autores verificaram, nos primeiros dias, o decréscimo da condutância estomática antes mesmo da queda do potencial da água na folha, havendo a possibilidade da resposta do estômato estar diretamente relacionada à variação do teor de água no substrato, via comunicação raiz e parte aérea da laranjeira, a qual informaria a respeito da condição hídrica na região das raízes. Já em condições de estresse hídrico, Machado et al. (1999) cogitaram que o aumento da concentração do ácido abscísico nas células-guardas, proveniente das raízes, provocaria a redução na turgescência e o fechamento dos estômatos nas folhas das laranjeiras.

Avaliações do comportamento fisiológico de laranjeiras têm mostrado redução na taxa de assimilação de CO₂ sob condições de deficiência hídrica (CHARTZOULAKIS et al., 1999; MEDINA et al., 1999). Esses autores observaram que a redução no teor de água do solo altera a fisiologia das plantas em função do gradiente de potencial da água no solo e nas folhas, que controla a absorção de água pelas laranjeiras, regulando o fechamento dos estômatos e, por conseguinte, a redução da taxa de fotossíntese. A redução da abertura dos estômatos nas folhas de laranjeiras ocorre a partir do potencial da água nas folhas de -2 MPa, fechando-os abaixo de -3 MPa (MEDINA et al., 1999; MACHADO et al., 1999).

O estresse hídrico pode causar o *strain* elástico e plástico (TAIZ; ZEIGER, 1988). O *strain* elástico consiste na redução da taxa de fotossíntese causada pelo estresse hídrico, que seria prontamente restabelecido após a precipitação ou irrigação. Se esse estresse hídrico ocorrer durante a fase de floração e frutificação, causaria o *strain* plástico, porque mesmo após a eliminação do estresse hídrico, haveria consequências tais como abscisão de flores e frutos verdes (SYVERTSEN, 1999), ausência de desenvolvimento vegetativo (STENZEL et al., 2005) e a redução da produção (TORRECILLAS et al., 2001).

O porta-enxerto limoeiro “Cravo” apresentou maior resistência à seca (STUCHI et al., 2000) e menor taxa de evapotranspiração em solo com restrições físicas e hídricas (CINTRA et al., 2000), confirmando a opção por esse porta-enxerto na citricultura brasileira.

O estresse hídrico nos citros não deve ser encarado somente do ponto de vista negativo (SYVERTSEN, 1999). Segundo esse autor as condições climáticas no Brasil são favoráveis para o manejo positivo do estresse hídrico; no entanto, se houver prolongamento do estresse hídrico, poderá comprometer o crescimento e a produção das plantas.

Considerando-se o comportamento fisiológico para o florescimento dos citros (SYVERTSEN, 1999), a resposta da laranjeira “Pêra” à irrigação no Paraná (CALZAVARA et al., 2000) e a maior tolerância do porta-enxerto limoeiro “Cravo” (STUCHI et al., 2000), a irrigação em pomares de laranjeira não se justificaria tecnicamente, sem antes verificar a influência dos sistemas

de manejo da cobertura do solo nas entrelinhas sobre as relações hídricas e fisiológicas das laranjeiras.

2.3 Sistemas de manejo de solo em citros

No Brasil, o manejo do solo dos pomares de laranjeiras evoluiu desde a década de 1950, com resultados experimentais mostrando que o uso de cobertura morta (*mulching*), grade de discos e a incorporação de adubos verdes sobressaíram-se como os melhores sistemas de manejo nas entrelinhas (RODRIGUEZ, 1957; PASSOS et al., 1973; PACHECO et al., 1975; VASCONCELLOS et al., 1976).

O uso de grade era o manejo mais empregado e aceito pelos citricultores (CAETANO, 1980; CORÁ et al., 2005). Neste manejo são realizadas de três a quatro roçadas nas entrelinhas no período chuvoso (setembro-março) e uma gradagem no período seco (abril a agosto), complementado com o uso de herbicida e capina manual nas linhas das plantas (CAETANO, 1980).

A utilização da cobertura morta (*mulching*) apresenta restrições de natureza econômica e risco de incêndio (CAETANO, 1980; HOGUE; NEILSEN, 1987; COELHO, 1992; LIPECKI; BERBEĆ, 1997). Por outro lado, São José et al. (1988) demonstraram a eficiência do uso de herbicidas no manejo da vegetação das entrelinhas dos pomares de laranjeira, comparada ao uso da grade e cobertura vegetal do solo.

O controle da vegetação nas linhas das plantas sob a projeção da copa das laranjeiras evoluiu do coroamento manual (RODRIGUEZ, 1957; DORNELLES, 1971) para o controle com herbicida. Experimentalmente, Santinoni e Silva (1995) verificaram que houve redução da produção de frutos cítricos com a utilização da capina manual comparada ao uso de herbicida no manejo da vegetação nas linhas das plantas.

As sugestões do manejo da vegetação de pomares evoluíram para utilização de herbicida nas linhas das plantas e a manutenção da vegetação roçada mecanicamente nas entrelinhas (LIPECKI; BERBEĆ, 1997). As recomendações de manejo dos pomares de fruteiras permanentes, a partir da década de 1990, enfatizaram a manutenção das entrelinhas vegetadas com

gramíneas a serem manejadas por meio de roçadas mecânicas, para impedir o comprometimento da sustentabilidade dos solos verificada com o uso da gradagem ou herbicida (BUTLER, 1986; SKROCH; SHRIBBS, 1986; HOGUE; NEILSEN, 1987; SANTINONI; SILVA, 1995; LIPECKI; BERBEĆ, 1997; DENNIS; HULL, 2003).

Entretanto, a manutenção da vegetação nas entrelinhas dos pomares poderia promover a competição por água e nutrientes e comprometer a produção de frutos das plantas perenes. Pacheco et al. (1975) verificaram que o uso de soja perene e vegetação ceifada nas entrelinhas competiram com as laranjeiras pela água do solo, prejudicando o crescimento das laranjeiras e a produção de laranja. Por outro lado, Cintra et al. (1983) constataram maior teor de água no solo na profundidade de 0-25 cm com a ceifa da vegetação nas entrelinhas comparada à dessecação com herbicida.

A manutenção da cobertura permanente nas entrelinhas com gramíneas ou leguminosas, bem como a manutenção da vegetação espontânea, compromete a produção de frutos de laranja (RODRIGUEZ et al., 1964; DORNELLES, 1971; PACHECO et al., 1975). Entre esses estudos, o comprometimento da produção de frutos de laranja devido à competição pela água do solo foi avaliado somente por Pacheco et al. (1975).

Avaliações da dinâmica da água em solo com horizonte superficial arenoso mostraram que houve maior consumo de água em função do volume ativo das raízes na camada de 0-60 cm de profundidade sob a projeção da copa de laranjeira “Valência” (CRUZ et al., 2005). Em solo arenoso da Florida (Estados Unidos da América), Morgan et al. (2006) verificaram maior concentração de raízes na camada de 0-15 cm de profundidade e maior absorção de água da laranjeira “Hamlin”, causada pela depleção de água na entrelinha vegetada com o predomínio da gramínea *Paspalum notatum*.

Relatos de manejo da leguminosa tropical amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) são mencionados por Cruz et al. (1994) nas entrelinhas das culturas perenes de cafeeiros, bananeiras, palmeiras e plantas de macadâmia. Na Austrália, Johns (1994) constatou que a manutenção da leguminosa (*Arachis pintoi*) reduziu a produção de frutos de banana comparado ao solo descoberto nas entrelinhas, fato atribuído, parcialmente, à competição pela água entre a leguminosa nas entrelinhas e as bananeiras irrigadas.

No Brasil, em solo com a camada superficial arenosa, Fidalski e Stenzel (2006) verificaram maiores teores de nitrogênio em laranjeira “Folha Murcha” enxertada sobre o porta-enxero limoeiro “Cravo” quando havia a vegetação com a leguminosa (*Arachis pintoï*) nas entrelinhas, comparada à vegetação com gramínea (*Paspalum notatum*). Em solo argiloso do norte do Paraná, Neves et al. (1998) verificaram que a manutenção da leguminosa *Arachis prostrata*, nas entrelinhas do pomar, causou o aprofundamento das raízes do porta-enxerto limoeiro “Cravo”.

A maioria dos estudos envolvendo as avaliações do teor de água no solo sob diferentes sistemas de manejo tem utilizado abordagens estatísticas univariadas, baseadas em análises de variâncias e testes de comparações de médias (PACHECO et al., 1975; SOUZA et al., 2004). Os estudos de Rocha et al. (2005) e Morgan et al. (2006) são exceções. Rocha et al. (2005) constataram por meio de correlações simples de Pearson a independência dos teores de argila e de areia no armazenamento de água no perfil do solo (110 cm de profundidade) nas linhas das plantas de laranjeiras. Morgan et al. (2006) estabeleceram relações de dependência da atividade das raízes com a dinâmica da água em diferentes camadas de solo na entrelinha e sob a projeção da copa das laranjeiras.

As relações de causa e efeito entre o teor de água no solo e as variáveis fisiológicas nas folhas de laranjeiras com plantas de cobertura permanente na entrelinha dos pomares de laranjeira ainda são desconhecidas. Estas relações poderiam ser descritas pela análise multivariada, utilizando-se o método de análise de trilha (CRUZ et al., 2004). A aplicação da análise de trilha em cacaueteiro revelou que a espessura do horizonte A e a porosidade do solo explicaram melhor a produtividade (SOUZA JÚNIOR et al., 1999). Esses autores verificaram, nos anos mais secos, maior produção em talhões com maiores teores de argila.

2.4 Posições de amostragem de solo em pomares

Progressivamente, vem sendo incluída a posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, local em que ocorre a sobreposição do tráfego de trator de pneu, em torno de 15 passadas anuais (TERSI; ROSA, 1995),

acumulando 300 passadas ao longo da existência do pomar estimada em 15 anos (STOLF, 1987). Este local está localizado entre o limite externo da projeção da copa das plantas, próximo da faixa de adubação, e o centro da entrelinha nos pomares em produção de macieira e laranjeira (DRAGHI et al., 2005; LIMA et al., 2005; FIDALSKI et al., 2007).

A amostragem de solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha tem a finalidade de identificar possíveis restrições físicas e hídricas para o desenvolvimento das laranjeiras (STOLF, 1987; DRAGHI et al., 2005; LIMA et al., 2005; FIDALSKI et al., 2007). As propriedades físicas do solo comumente avaliadas em pomares de laranjeira são: densidade do solo, porosidade, resistência do solo à penetração, teor de água do solo, taxa de infiltração de água e curvas de retenção de água (CINTRA et al., 1983; STOLF, 1987; ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995; SANCHES et al., 1999; SOUZA et al., 2004; LIMA et al., 2005; FIDALSKI et al., 2007).

A compactação do solo em pomares de citros pode ser identificada pelo método do perfil cultural (TAVARES FILHO et al., 1999), pela densidade do solo (SANCHES et al., 1999), pela porosidade do solo (SOARES et al., 2005) e pela resistência do solo à penetração (STOLF, 1987; ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995). O método do perfil cultural revelou a ocorrência da compactação na camada de 0-30 cm de profundidade na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, e na camada de 10-30 cm de profundidade na posição de amostragem de solo sob a projeção da copa das plantas e o centro da entrelinha (enterrrodado) em um Latossolo Roxo cultivado com tangerineira “Poncã” (NEVES et al., 1998; TAVARES FILHO et al., 1999). Nesse estudo, a compactação do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha foi atribuída ao tráfego de máquinas por ocasião das operações de roçada e colheita.

A alteração da estrutura do solo (porosidade e densidade do solo) em subsuperfície foi verificada em pomar de laranjeira submetido ao cultivo convencional e intensivo do solo durante vários anos, caracterizada pela redução da macroporosidade (SOARES et al., 2005) e pela compactação na camada superficial (FIDALSKI et al., 2007). Por sua vez, outros estudos em pomar de laranjeira não identificaram compactação do solo nas camadas superficiais e subsuperficiais (SANCHES et al., 1999), e tampouco entre as

posições de amostragem de solo centro da entrelinha (entrerrodado), rodado da entrelinha e sob a projeção da copa das laranjeiras (BORDIN et al., 2005; LIMA et al., 2005).

O consumo de água pela laranjeira “Valência” ocorre na camada de 0-60 cm de profundidade, avaliado sob a projeção da copa das plantas por Cruz et al. (2005), atribuído ao maior volume de raízes ativas nessa camada, também verificado em porta-enxertos de citros por Neves et al. (2004). Em solos com severas limitações físicas, identificado nos Tabuleiros Costeiros, nos Estados da Bahia e Sergipe, com camadas coesas subsuperficiais, houve aumento de água disponível no solo após a subsolagem a 50 cm de profundidade na entrelinha do pomar, distante 2 m do tronco das laranjeiras na entrelinha (SOUZA et al., 2004).

Os indicadores de qualidade química, física e hídrica do solo apresentaram homogeneidade horizontal entre as posições de amostragem de solo rodado e centro da entrelinha (entrerrodado), para as camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade de um pomar de laranjeira “Valência” (FIDALSKI et al., 2007). Contrariamente, Morgan et al. (2006) constataram descontinuidade horizontal entre as posições de amostragem de solo sob a projeção da copa de laranjeiras “Hamlim” e entrelinha (entrerrodado) com predominância da vegetação com a gramínea *Paspalum notatum*, atribuída à depleção da água do solo na camada de 0-10 cm de profundidade, associadas à maior densidade de raízes do porta-enxerto Trifoliata.

De modo geral, os estudos que caracterizaram a qualidade do solo em pomares de laranjeira utilizam-se de inúmeras variáveis físicas e hídricas, as quais são descritas por meio de análises estatísticas univariadas, possivelmente comprometendo as interpretações e as conclusões por não terem sido exploradas a existência ou não da dependência entre as variáveis analisadas. A análise multivariada por meio de componentes principais foi utilizada para discriminar, vertical e horizontalmente, a qualidade do solo em pomares de laranjeira (FIDALSKI et al., 2007); e para agrupar as alterações químicas do solo nos sistemas de manejo orgânico e convencional de cafeeiro (THEODORO et al., 2003).

Em pomares de citros, a heterogeneidade da compactação do solo vem sendo verificada por meio de avaliações, considerando-se as posições de

amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha (LIMA et al., 2004, FIDALSKI et al., 2007), associadas aos efeitos causados pelo tráfego de trator de pneu. A heterogeneidade estabelecida pela compactação do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha poderia restringir o desenvolvimento das raízes, do limite externo da projeção de copa em direção ao centro das entrelinhas do pomar, e, por conseguinte, aumentar os riscos de estresse hídrico às laranjeiras.

A posição de amostragem de solo rodado da entrelinha dos pomares de laranjeiras seria a mais adequada para avaliar os efeitos dos sistemas de manejo de solo na qualidade física do solo (LIMA et al., 2004; DRAGHI et al., 2005; LIMA et al., 2005; FIDALSKI et al., 2007).

2.5 Qualidade do solo

A visão holística do uso e manejo do solo convergiu para a conceituação de qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 2001; CARTER, 2002) como sendo a capacidade de um solo exercer suas funções dentro dos limites naturais ou de um ecossistema manejado para sustentar a produtividade das plantas e animais, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e de proporcionar suporte à habitação e à saúde humana (KARLEN et al., 1997).

As funções básicas do solo para a produção agrícola são: reter e disponibilizar água; ciclar e armazenar nutrientes; filtrar poluentes; e sustentar o desenvolvimento e a produção das plantas (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 2001). As funções básicas de qualidade do solo foram desdobradas em funções específicas para a erosão, carbono orgânico do solo e física do solo. As funções específicas da erosão do solo consistem em ajustar a entrada de água, facilitar a sua transferência e a absorção; resistir à degradação; e sustentar o desenvolvimento das plantas (KARLEN; STOTT, 1994). As funções do carbono orgânico foram definidas por atuarem nos processos de retenção de água, químicos (disponibilidade de nutrientes), físicos (friabilidade, resistência e estrutura), produtividade, erodibilidade e qualidade da água e do ar (GREGORICH et al., 1994; BREJDA et al., 2000; CARTER, 2002; CONCEIÇÃO et al., 2005; SHUKLA et al., 2006), de acordo

com sua qualidade em sistemas de manejo de solo. Do ponto de vista da física do solo, as funções específicas estão ligadas à infiltração, retenção e disponibilidade de água às plantas; a resposta ao manejo e a resistência à degradação; as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes das plantas; e ao crescimento das raízes (REICHERT et al., 2003).

A qualidade física do solo não pode ser medida diretamente, mas avalia-se pelos indicadores de qualidade física do solo, tais como a densidade, a porosidade e a resistência do solo à penetração (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 1997; KARLEN et al., 2001, 2003), e indicadores mais complexos podem ser obtidos por meio de funções de pedotransferência (BOUMA, 1989; DORAN; PARKIN, 1994).

2.6 Indicadores de qualidade física do solo

Paralelamente à evolução do conceito da qualidade do solo (KARLEN et al., 2003), constatam-se avanços metodológicos que contribuíram na geração de indicadores de qualidade do solo, os quais estabeleceram valores críticos testados especificamente para determinadas funções do solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; FRANZLUEBBERS, 2002; REYNOLDS et al., 2002; DEXTER, 2004), permitindo interpretar se a qualidade do solo estaria se degradando, mantendo-se ou melhorando, indispensáveis para a tomada de decisão do manejo do solo.

2.6.1 Densidade, porosidade, resistência do solo à penetração, carbono orgânico e teor de água no solo

Entre os indicadores de qualidade física do solo, a densidade e as variáveis de porosidade do solo constituem os indicadores mais utilizados para a caracterização e identificação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 2001). A redução da densidade e o aumento da porosidade do solo foram verificados por Haynes (1980) em pomar de macieira mantido sem vegetação por meio de cultivo comparado a vegetação manejada com herbicida ou mantida com gramínea.

Nas entrelinhas de laranjeiras “Baianinha”, Cintra et al. (1983) verificaram que, após 16 anos, o uso contínuo de gradagem resultou na formação de uma camada compactada a 10-20 cm de profundidade, resultante do aumento da densidade e da redução da macroporosidade do solo; o manejo da vegetação com herbicida formou uma crosta na superfície do solo que reduziu a taxa de infiltração de água; e à ceifa (roçada) da vegetação permanente manteve as propriedades físicas do solo, verificado por meio da melhoria da sua estrutura e do incremento de matéria orgânica.

A compactação do solo nas entrelinhas de pomares se deve a pressão de contato do rodado do trator (SANCHES et al., 1999; TAVARES FILHO et al., 1999; GOH et al., 2001; OLIVEIRA; MERWIN, 2001; LIMA et al., 2005), quantificado na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha comparada à posição de amostragem de solo entrerrodado da entrelinha (FIDALSKI et al., 2007). A intervenção mecânica nas entrelinhas dos pomares de laranjeira por meio de escarificação e subsolagem não tem apresentado redução da densidade e aumento da porosidade do solo em solos do sul e sudeste do Brasil (BORDIN et al., 2005; MINATEL et al., 2006).

A alteração da estrutura do solo causada pelo aumento da densidade e redução da porosidade total altera a distribuição do espaço poroso, afetando os macroporos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha de laranjeira “Pêra” (LIMA et al., 2005).

A porosidade do solo é constituída por poros de diferentes tamanhos, formas e continuidade que influenciam na infiltração, no armazenamento e na drenagem da água; no movimento e na distribuição dos gases; e no crescimento das raízes (KAY; VANDENBYGAART, 2002). Registros de limitações da porosidade do solo em citros, que comprometeram o desenvolvimento radicular, têm sido diagnosticados em horizontes coesos de solos dos Tabuleiros Costeiros (SOUZA et al., 2004; SANTANA et al., 2006).

Paralelamente à caracterização da compactação do solo em citros, a resistência do solo à penetração é amplamente avaliada (CINTRA et al., 1983; LIMA et al., 2004; SANTANA et al., 2006), com o valor crítico de 2,2 MPa para a produção de frutos de laranja (ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995), semelhante ao valor obtido na cultura de algodão por Taylor et al. (1966). Independentemente do valor absoluto, a resistência do solo à penetração é

inversamente proporcional ao teor de água, e proporcional à coesão e redução da porosidade do solo (WEAICH et al., 1992; SANTANA et al., 2006).

A porosidade do solo é importante para assegurar a taxa de difusão de oxigênio, necessária para a oxigenação das raízes das plantas. Haynes (1980) verificou a redução da taxa de difusão de oxigênio na camada de 0-5 cm de profundidade do solo vegetado com gramínea nas entrelinhas de macieira, comparada à vegetação controlada com herbicida e cultivo. Alternativamente, a taxa de difusão de oxigênio do solo vem sendo inferida pela porosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocupada com ar (GRABLE; SIEMER, 1968), utilizada por Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998).

A avaliação da resistência do solo à penetração em sistemas de manejo do solo nas entrelinhas de pomar de macieira na Nova Zelândia mostrou alterações na camada de 0-20 cm de profundidade, em ordem decrescente do solo sob o manejo da vegetação com herbicida, gramínea e cultivo (HAYNES, 1980).

Em pomar de macieira, na Argentina, Draghi et al. (2005) verificaram também a influência do sistema de manejo na resistência do solo à penetração do solo a 0-20 cm de profundidade, com menores valores quantificados no solo mantido vegetado com gramínea (2 MPa) comparado ao solo mantido descoberto (4 MPa), valor este considerado limitante para o desenvolvimento normal do sistema radicular das plantas. Esses autores constataram que a redução anual de 27 para 11 e nenhuma passada do conjunto trator e pulverizador realizadas no manejo convencional da macieira não alterou os valores da resistência do solo à penetração em solo descoberto. Neste trabalho, a manutenção da gramínea nas entrelinhas do pomar de macieira foi mais importante do que a redução do tráfego, para reduzir a resistência do solo à penetração.

O carbono orgânico do solo é considerado um indicador de qualidade física do solo por participar de diferentes funções do solo (CHRISTENSEN; JOHNSTON, 1997) e seus indicadores de qualidade do solo têm sido utilizado em inúmeros estudos de qualidade do solo (GREGORICH et al., 1994; BREJDA et al., 2000; GLOVER et al., 2000; CARTER, 2002; TORMENA et al., 2004; CONCEIÇÃO et al., 2005; FIDALSKI et al., 2006b; SHUKLA et al., 2006). Em pomares de laranjeiras implantados por meio do preparo convencional do

solo, em áreas predominantemente ocupadas com pastagens, no noroeste do Paraná, Fidalski e Auler (1997) verificaram o restabelecimento dos teores de carbono orgânico do solo para $5,6 \text{ g kg}^{-1}$ (1 % de matéria orgânica) na camada de 0-20 cm de profundidade, os quais correspondem aos valores médios de carbono em diferentes sistemas de uso desses solos (FIDALSKI, 1997b).

Pomares de laranjeiras e macieiras que mantiveram as vegetações nas entrelinhas por meio do manejo de roçada apresentaram maiores teores de carbono orgânico do solo (CINTRA et al., 1983; HAYNES, 1980) e melhor condição estrutural do solo.

O teor de água no solo (gravimétrica ou volumétrica) utilizado na avaliação da qualidade física do solo pode ser medido diretamente nos potenciais mátricos entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, o qual corresponde à água disponível do solo (KIEHL, 1979; DORAN; PARKIN, 1994) ou indiretamente, utilizando-se funções de pedotransferência das curvas de retenção de água do solo quando disponíveis (GREGORICH, 2006).

Em sistemas de manejo de solo em pomares de fruteiras, tem sido avaliado o teor de água gravimétrica (PACHECO et al., 1975; CINTRA et al., 1983), volumétrica (HAYNES, 1980), em diferentes potenciais mátricos (OLIVEIRA; MERWIN, 2001), ou por meio de sonda de nêutrons (GLENN; WELKER, 1989). Desses estudos, apenas Pacheco et al. (1975) e Glenn e Welker (1989) realizaram mais de uma avaliação do teor de água no solo, que possibilitaram interpretações do efeito dos sistemas de manejo de solo nos pomares.

Os sistemas de manejo com a leguminosa soja perene [*Neonotonia wightii* (sin. *Glycine wightii* Verdc)] e a vegetação natural ceifada estabeleceram a competição pela água do solo e comprometeram o crescimento e a produção das laranjeiras “Baianinha” (PACHECO et al., 1975). Glenn e Welker (1989) verificaram variação entre as safras agrícolas quanto ao maior conteúdo água disponível no solo em pessegueiro, na primeira safra em solo mantido vegetado com gramínea e roçado e na segunda e na terceira safras agrícolas em solo com a vegetação manejada com herbicida, a qual incrementou a produção de frutos comparada a gramínea manejada com roçada.

A importância da avaliação do teor de água no solo se deve ao estudo de manejo de solo em citros que verificou que a gramínea mantida com roçada nas entrelinhas competia com a água do solo (PACHECO et al., 1975), apesar das constatações das melhorias na qualidade física do solo em diferentes fruteiras (HAYNES, 1980; CINTRA et al., 1983; DRAGHI et al., 2005).

2.6.2 Intervalo hídrico ótimo

Paralelamente à evolução do conceito de qualidade do solo, Letey (1985) propôs o *Non-Limiting Water Range* (NLWR), que integrou as relações entre aeração, resistência do solo à penetração, potencial de água e densidade do solo, como método para a caracterização das propriedades físicas do solo para a produção das culturas. Este conceito foi aprimorado por Silva et al. (1994) como indicador da qualidade estrutural do solo, denominando-o *Least Limiting Water Range* (LLWR), e por Tormena et al. (1998), traduzindo-o para a língua portuguesa como intervalo hídrico ótimo (IHO).

O intervalo hídrico ótimo integra em função da densidade do solo os teores de água retidos nos potenciais mátricos da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, os quais correspondem à água disponível do solo, com as restrições dos teores de água limitados pelos valores críticos pré-estabelecidos de aeração e de resistência do solo à penetração para o desenvolvimento das raízes das plantas. Assim, quanto maiores forem as restrições impostas pela aeração e pela resistência do solo à penetração com o aumento da densidade do solo, o valor do intervalo hídrico ótimo tenderá ao valor nulo, correspondendo a densidade do solo crítica (IMHOFF et al., 2001). Como esses fatores mudam com a estrutura do solo, há variação do intervalo hídrico ótimo para cada classe e sistemas de manejo de solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; ZOU et al., 2000; SIEGEL-ISEEM et al., 2005; CAVALIERI et al., 2006; LEÃO et al., 2006).

A avaliação conjunta do intervalo hídrico ótimo e do teor de água do solo foi considerada por Bengough et al. (2006) como metodologia ideal para determinar o estresse físico do solo durante o desenvolvimento das plantas e por Reichert et al. (2003) como um grande avanço na biofísica do solo.

Respostas fisiológicas das plantas ao intervalo hídrico ótimo foram obtidas por Silva e Kay (1996), que verificaram maior crescimento de folhas de milho quando o solo apresentava teores de água dentro do intervalo hídrico ótimo e Siegel-Issem et al. (2005), que observaram dependência da produção de matéria seca das raízes de realizaram mais de uma avaliação do teor de água no solo de mudas de espécies de eucalipto com o intervalo hídrico ótimo em três dos quatro solos avaliados.

Uma das desvantagens do intervalo hídrico ótimo é atribuída à dificuldade da obtenção simultânea das curvas de retenção de água do solo e da resistência do solo à penetração (REYNOLDS et al., 2002). Por essa razão, é imprescindível o desenvolvimento de funções de pedotransfênci (BOUMA, 1989) para a obtenção do potencial mátrico da água retida no solo e da resistência do solo à penetração a partir das determinações do teor de água e da densidade do solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998, 1999).

2.6.3 Índice S de qualidade física do solo

O indicador de qualidade física do solo denominado como índice S foi proposto por Dexter (2004). O índice S é determinado a partir da curva de retenção de água no solo utilizando a equação de van Genuchten (1980), $\theta = \theta_r + \{(\theta_s - \theta_r)/[1+(\alpha\Psi)^n]^m\}$, correspondendo à inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água, conforme a figura 1 (DEXTER, 2004; DEXTER; CZYŻ, 2007). O ajuste dos dados à função de van Genuchten deve ser obtida entre o logaritmo natural do potencial mátrico da água no solo em módulo (Ψ_i , hPa) e o conteúdo de água a base de massa (θ_i , kg kg⁻¹), mostrado na figura 1. No ponto de inflexão da curva de retenção de água do solo [$\ln(\Psi_i)$ e θ_i], o índice S é obtido pela derivada [$\text{Índice S} = \tan \hat{\omega} = \theta_i/\ln\Psi_i$], ou pela equação $|S| = -n(\theta_s - \theta_r)[(2n - 1)/(n - 1)]^{[(1/n)-2]}$, em que $|S|$ é o módulo do índice S; n é um coeficiente empírico da equação; θ_s é o teor de água do solo saturado (kg¹ kg⁻¹); e θ_r é o teor de água residual do solo (kg¹ kg⁻¹).

Por conveniência, para visualizar graficamente o ponto de inflexão e a reta tangente, Dexter (2004) propôs que a curva de retenção de água do solo deve ser representada graficamente pelo conteúdo de água a base de massa

(θ_i , kg kg^{-1}) e o logaritmo na base 10 do potencial mátrico da água no solo em módulo (Ψ_i , hPa). Nessa representação gráfica, quanto maior a inclinação da reta tangente à curva de retenção de água do solo no ponto de inflexão, menor será o índice S, o qual ocorre em uma faixa estreita de variação do tamanho de poros (DEXTER, 2004).

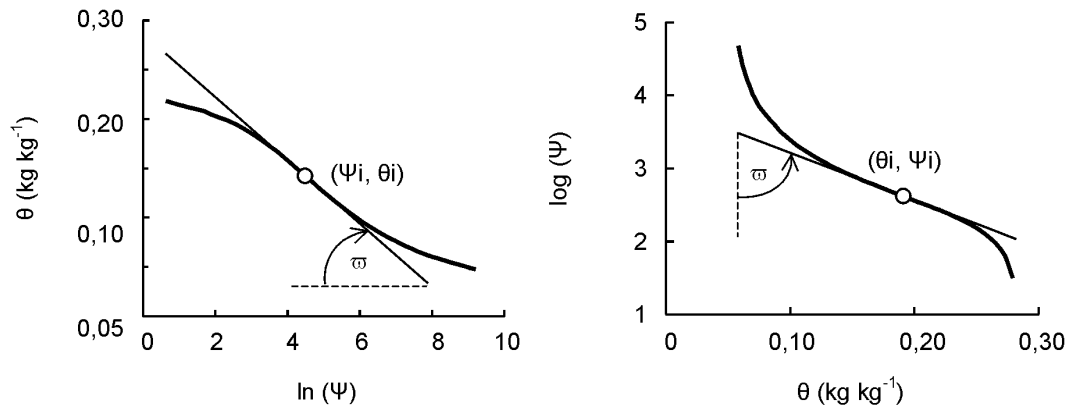


Figura 1 – Índice S que corresponde a inclinação da reta tangente (ângulo ω) à curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão [θ_i e $\ln(\Psi_i)$], obtido pelo logaritmo na base natural e, por conveniência, para sua visualização, representado pelo logaritmo na base 10.

O valor do índice S na maioria dos casos é devido à microestrutura do solo que governa as principais propriedades físicas do solo (DEXTER, 2004). Esse autor indicou o valor referencial do índice S de 0,035 (adimensional) que separa solos de boa (Índice $S > 0,035$) e pobre (Índice $S < 0,035$) qualidade estrutural do solo, enquanto valores do índice S inferiores a 0,020 apresentam baixíssima condição física do solo ou solo severamente degradado em termos da sua qualidade física.

Os valores do índice S apresentaram correlação positiva com o desenvolvimento radicular de milho e matéria orgânica e correlação negativa com a densidade do solo (OSUNA-CEJA et al., 2006), confirmando os resultados de Dexter (2004). O sistema conservacionista de cultivo de milho apresentou maior índice S, indicando maior capacidade de retenção de água no solo comparado ao sistema tradicional (OSUNA-CEJA et al., 2006). Esses

autores sugerem a utilização do índice S para a avaliação do impacto das práticas agrícolas na avaliação da qualidade do solo.

A utilização do índice S poderia contribuir na identificação e caracterização das posições de amostragem de solo (TORMENA; SILVA, 2004). Estes autores verificaram melhor condição física para o desenvolvimento de culturas anuais na linha do sistema plantio direto e na entrelinha do sistema convencional.

2.6.4 Indicadores da capacidade de aeração total e de armazenamento de água do solo

Do ponto de vista biológico, um solo com boa qualidade física requer um balanço entre aeração e retenção de água, além de resistência do solo à penetração não impeditiva para o desenvolvimento das funções fisiológicas das raízes (LETEY, 1985). De acordo com Reynolds et al. (2002), o solo deveria apresentar valor de 0,34 (adimensional) para a capacidade de aeração do solo, determinada pela relação entre a quantidade de poros drenados a partir do teor de água na saturação e a porosidade total do solo; e valor de 0,66 (adimensional) para a capacidade de armazenamento de água do solo, determinada pela relação entre o teor de água retido no potencial mátrico correspondente à capacidade de campo e a porosidade total.

Outros indicadores de qualidade física do solo foram explorados por Reynolds et al. (2002), tais como a porosidade no domínio dos macroporos e a porosidade da matriz do solo, equivalentes aos diâmetros de poros superiores e inferiores a 300 μm , respectivamente. Os autores justificam o desdobramento destas duas classes de poros, porque elas distinguem as funções de armazenamento e transmissão de água e ar. Paralelamente, Reynolds et al. (2002) sugeriram os indicadores de qualidade do solo denominados capacidade de aeração da matriz do solo e capacidade de aeração total do solo, utilizando como referência o solo saturado e os poros equivalentes a diâmetros inferiores a 300 μm ou drenados no potencial mátrico de -10 hPa, respectivamente, em relação ao potencial mátrico correspondente à capacidade de campo.

A influência do carbono orgânico do solo na porosidade do solo foi constatada por Kay e VandenBygaart (2002) e Emerson e McGarry (2003), por meio de relações entre o teor de carbono orgânico do solo e o teor de água retida no potencial mátrico de -100 hPa. Por sua vez, Hollis et al. (1977) mostraram a dependência do teor de água retido no potencial mátrico de -50 hPa aos teores de carbono orgânico do horizonte superficial do solo.

2.6.5 Taxa de estratificação de carbono orgânico do solo

Em adição ao valor absoluto do teor de carbono orgânico do solo, Franzluebbers (2002) utilizou a taxa de estratificação de carbono orgânico do solo como indicador de qualidade do solo, que consiste no quociente dos valores de carbono orgânico da camada de 0-5 cm com aqueles da camada de 15-20 cm de profundidade. Este procedimento permite a normalização dos dados e a comparação entre diferentes solos e sistemas de manejo, tendo como referência o valor igual ou superior a duas unidades, visto que não é comum a ocorrência destes valores em solos degradados. As vantagens do uso da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo como indicador de qualidade do solo são a praticidade e o baixo custo de sua quantificação.

A utilização da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo por Mrabet (2002), entre as camadas de 0-5 cm e 10-15 cm de profundidade, confirmou a melhor qualidade do solo sob o sistema plantio direto em relação ao preparo convencional do solo, respectivamente, com taxas de estratificação de carbono orgânico do solo superior e inferior a duas unidades. Contudo, esta estratégia ainda é muito pouco utilizada na avaliação de sistemas de manejo em solos brasileiros, à exceção de Tormena et al. (2004) e Fidalski et al. (2006b), os quais constataram maior taxa de estratificação de carbono orgânico do solo entre as camadas de 0-5 cm e 10-20 cm de profundidade em plantio direto comparado ao plantio direto com escarificação. Moreno et al. (2006) verificaram taxas de estratificações de carbono orgânico entre as camadas de 0-5 cm e 25-40 cm de profundidade, superiores a duas unidades sob o sistema plantio direto e inferiores a duas unidades sob o sistema de manejo convencional do solo.

As profundidades das camadas de solo para a estratificação do carbono orgânico do solo variaram a partir do trabalho original de Franzluebbers (2002), mas manteve-se o critério de estratificar a camada superficial de 0-5 cm de profundidade com camadas subsuperficiais inferiores a profundidade de 10 cm (MRABET, 2002; TORMENA et al., 2004; FIDALSKI et al., 2006b; MORENO et al., 2006).

2.6.6 Funções de pedotransferência

O termo função de pedotransferência foi introduzido por Bouma (1989). Além dos indicadores de qualidade do solo, os estudos de funções de pedotransferência estão contribuindo para a obtenção de propriedades hidráulicas (curva de retenção de água no solo) e mecânicas (curva de resistência do solo à penetração), justificada por Gregorich (2006) quando não há dados disponíveis para a avaliação da qualidade do solo. De acordo com Bouma (1989), as funções de pedotransferência são relações funcionais (modelos de regressão) que convertem propriedades conhecidas do solo em propriedades do solo desconhecidas, com vantagens de menor custo e facilidades de utilizá-las.

Funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica saturada e curva de retenção de água no solo foram desenvolvidas especialmente para solos de regiões de clima temperado (WÖSTEN et al., 1999, 2001), que apresentam diferenças importantes em relação aos solos tropicais (HODNETT; TOMASELLA, 2002).

A primeira tentativa do uso de equações de regressão para estimar a água disponível com base na textura do solo, no Brasil, foi desenvolvida por Arruda et al. (1987). Posteriormente, Berg et al. (1997), Tomasella e Hodnett (1998), e Tomasella et al. (2000) desenvolveram funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água do solo, utilizando a equação proposta por van Genuchten (1980). Bernoux et al. (1998) verificaram que a densidade do solo poderia ser prevista com bom nível de precisão a partir do teor de argila do solo. Imhoff et al. (2000) ajustaram a resistência do solo à penetração em função da densidade do solo e do teor de água no solo sob pastagem, mostrando a importância da resistência do solo à penetração na avaliação da

qualidade física do solo. Já Giarola et al. (2002) obtiveram regressões múltiplas para estimar os teores de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível em função dos teores de argila, silte e óxidos de ferro e alumínio.

Outras propriedades do solo podem ser estimadas a partir das funções de pedotransferência (McBRATNEY et al., 2002). A resistência do solo à penetração, que é uma propriedade física do solo diretamente associada ao desenvolvimento de plantas (LETEY, 1985; PASSIOURA, 2002; BENGOUGH et al., 2006), corresponde ao impedimento mecânico que o solo oferece às raízes, sendo um dos fatores físicos que afeta o crescimento das raízes, quando correlacionada com a resistência do solo à penetração medida com penetrômetro (BENGOUGH; MULLINS, 1990).

O teor de água e a densidade do solo afetam a resistência do solo à penetração (CAMP; LUND, 1968; PABIN et al., 1998; BUSSCHER, 1990). Da relação funcional entre a resistência do solo à penetração, o teor de água e a densidade do solo, estabelece-se a curva de resistência do solo à penetração, que é fortemente influenciada pela textura e pelo carbono orgânico do solo (PACHEPSKY et al., 1998; SMITH et al., 1997; WHALLEY et al., 2005). Silva e Kay (1997) desenvolveram uma função de pedotransferência para estimar a curva de resistência do solo à penetração em solos canadenses com ampla variação do teor de argila e matéria orgânica do solo e Grunwald et al. (2001) sugerem que as funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração deveriam incorporar informações relacionadas à estrutura do solo e à matéria orgânica do solo.

As poucas funções de pedotransferência desenvolvidas no Brasil ajustaram (incorporaram) inúmeros solos com ampla diversidade pedogenética e mineralogia (TOMASELLA et al., 2000). Por outro lado, há carência de estudos tratando do desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimar simultaneamente as curvas de retenção de água no solo e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo de solo, inexistentes para plantas de cobertura permanente nas entrelinhas de citros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no período de 1999 a 2003, em um experimento de sistemas de manejo de plantas de cobertura nas entrelinhas de um pomar de laranjeiras “Pêra” [*Citrus sinensis* (L.) Osb.] enxertadas sobre limoeiros “Cravo” [*Citrus limonia* (Osb.)]. Esse experimento foi implantado em agosto de 1993 pelo Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), na Fazenda São Judas Tadeu, Município de Alto Paraná, noroeste do Paraná (23° 5' S, 52° 26' W e 480 m de altitude). O clima é classificado como subtropical (Cfa) de acordo com Köppen, apresentando precipitação anual média de 1.500 mm e estação das chuvas entre outubro a março, sem a ocorrência de estação seca definida (IAPAR, 2000).

As precipitações mensais do período de 1999 a 2002 (Figura 2) foram obtidas da Estação Meteorológica do IAPAR, localizada na Estação Experimental de Paranaíba, distante 25 km da área experimental.

3.1 Caracterização do experimento

Antes de 1993, o solo era mantido vegetado com pastagem [*Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick]. Em agosto de 1993, distribuiu-se 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 100 %) sobre essa vegetação, seguido do preparo convencional (aração e gradagem) do solo na camada 0-20 cm de profundidade. As covas para plantio das laranjeiras foram adubadas com P, K, Zn e B (IAPAR, 1992).

Após o plantio das laranjeiras, implantaram-se os tratamentos nas entrelinhas do pomar, consistindo do plantio de mudas espaçadas em 50 cm da gramínea grama mato-grosso ou batatais (*Paspalum notatum* Flüggé); semeadura da leguminosa amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* Krap. & W.C. Greg.) sem a utilização de inoculante, em linhas espaçadas de 50 cm com 20 sementes por metro linear; e plantio das mudas de abacaxi realizado em outubro de 1993, consistindo de duas fileiras duplas (0,9 x 0,4 x 0,4 m) de abacaxi ‘Smooth cayenne’ *Ananas comosus*, distante cerca de 1,5 m dos

troncos das laranjeiras, utilizando-se 4 g de P_2O_5 , 12 g de N e 24 g de K_2O por planta de abacaxi (FIDALSKI et al., 1999).

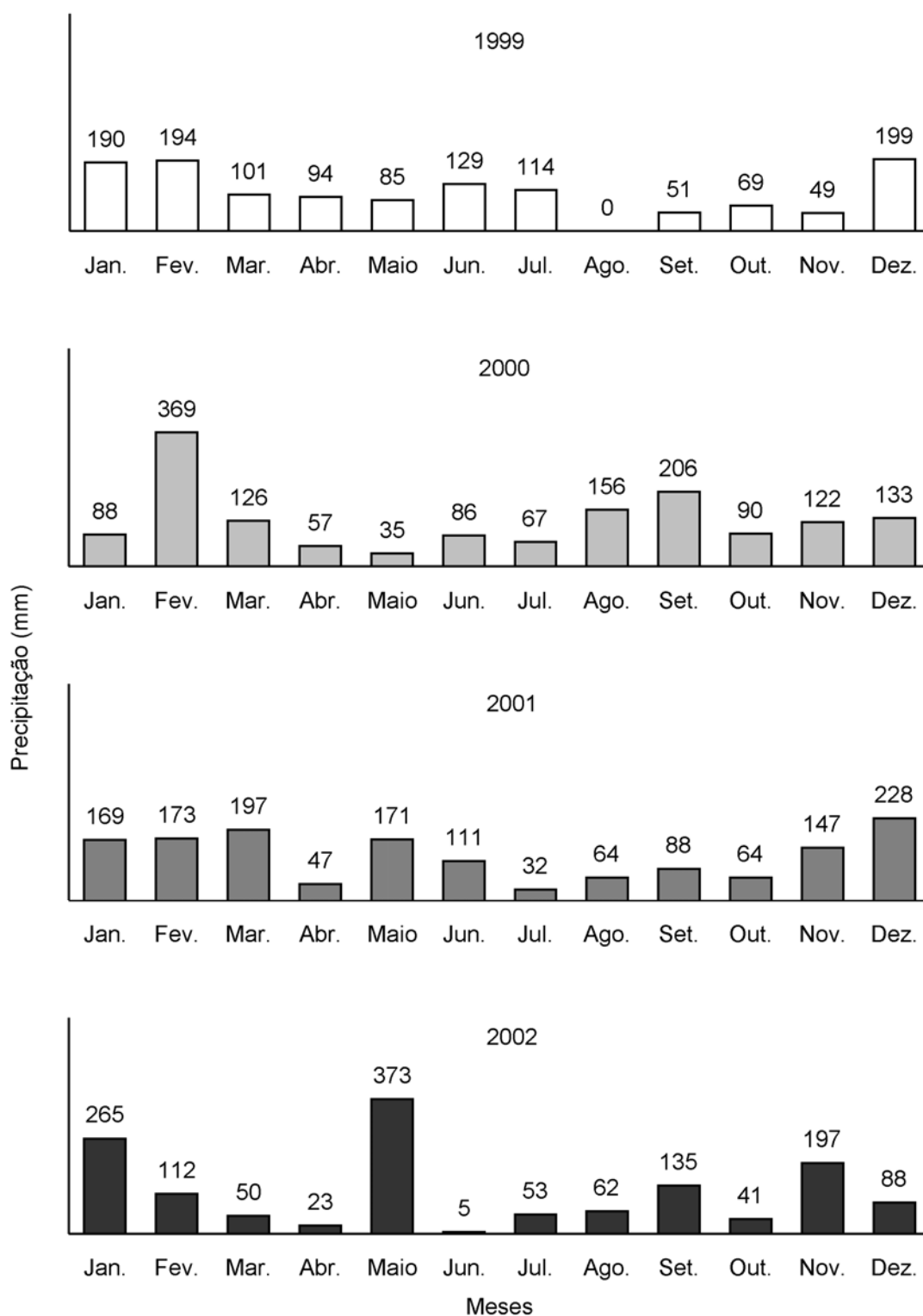


Figura 2 – Precipitações mensais durante o período experimental de 1999 a 2002 (Estação Agrometeorológica de Paranaíba – IAPAR).

A partir de 1996, com o desenvolvimento da copa das laranjeiras, a cultura do abacaxi foi substituída pela manutenção da cobertura do solo nas entrelinhas com vegetação espontânea manejada com herbicida pós-emergente (Glyphosate). A vegetação espontânea nas entrelinhas do pomar foi controlada com o propósito de se manter baixa cobertura do solo, tendo sido utilizada em 1998, 1999 e 2000, respectivamente, três, duas e uma aplicação de herbicida pós-emergente (Glyphosate). A redução progressiva do número de aplicações de herbicida se deve à manutenção do solo parcialmente descoberto até 2001 e ao aumento da infestação pelo agriãozinho [*Synedrellopsis grisebachii* (Hieron. & Kuntze)], espécie de hábito de crescimento rasteiro, associada às outras plantas que apresentaram baixa produção de biomassa.

No período de 1999 a 2003, as copas das laranjeiras apresentavam diâmetro médio de 4 m e os tratamentos ocupavam uma faixa de 2 m de largura nas entrelinhas, distante 50 cm do limite externo das copas das laranjeiras. As espécies de gramínea e da leguminosa implantadas neste experimento caracterizam-se por terem hábito de crescimento estolonífero e diferenças na taxa de cobertura do solo (Figura 3). O manejo da gramínea proporcionou excelente cobertura do solo na entrelinha com predominância dessa espécie, exigindo roçadas mecânicas, quando atingia altura em torno de 30 cm. A manutenção da leguminosa nas entrelinhas caracterizou-se pela sazonalidade da cobertura vegetal observada pela redução da produção de biomassa após estiagem ou geada, implicou na infestação de outras espécies, principalmente a guanxuma [*Sida rhombifolia* (L.)], e em menor proporção o capim amargoso [*Digitaria insularis* (L.) Fedde]. Este tratamento foi mantido vegetado sem a necessidade de roçada mecânica.

As adubações de cobertura foram realizadas anualmente com doses máximas de 165 kg ha⁻¹ de N, 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente, sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio, e as adubações foliares foram realizadas principalmente para os nutrientes B e Zn, com base nos resultados anuais das análises de solo e de tecido foliar. No período de 1996 a 1999, distribuíram-se, anualmente, nas faixas de adubação 5,4 e 8,0 t ha⁻¹ e nas entrelinhas 4,4 e 4,2 t ha⁻¹, respectivamente, calcário

dolomítico e calcítico (PRNT = 100 %), para elevar a saturação por bases a 70 %, sem incorporação mecânica.



Gramínea grama mato-grosso ou batatais (*Paspalum notatum*)



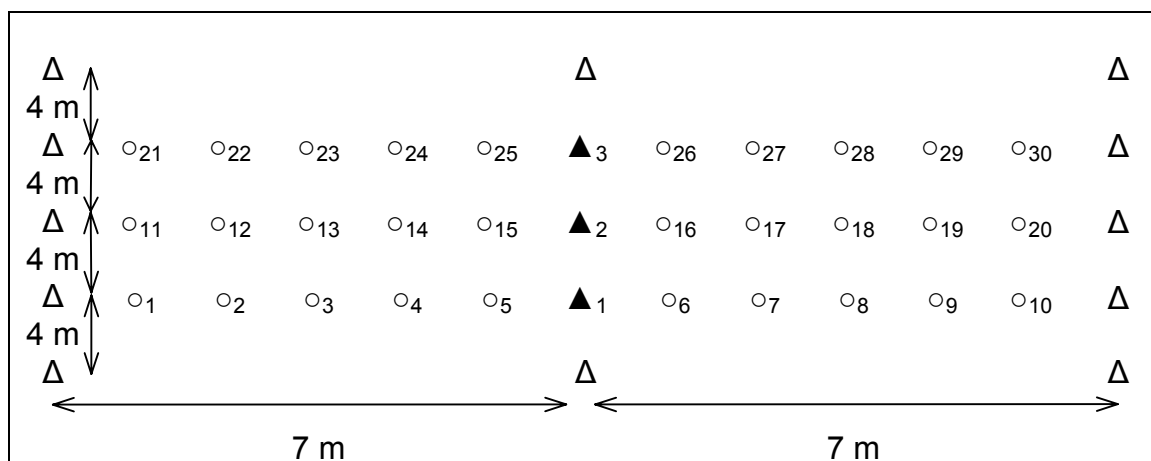
Leguminosa amendoim forrageiro (*Arachis pinto*)



Vegetação espontânea

Figura 3 – Tratamentos de sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente na entrelinha de laranjeira “Pêra”: gramínea, leguminosa e vegetação espontânea, no momento da amostragem de solo, em maio de 2003.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, dispostos perpendicularmente ao declive do terreno, com três repetições. As parcelas experimentais apresentavam três linhas de laranjeiras no espaçamento de 7 m e cinco laranjeiras por linha espaçadas em 4 m, com 15 laranjeiras (Figura 4). Duas entrelinhas paralelas à linha central com 20 m de comprimento foram mantidas vegetadas com os três tratamentos: gramínea, leguminosa e vegetação espontânea.



Posições de amostragem de solo										
R	ER	ER	R	PCL		PCL	R	ER	ER	R
Distância do tronco da laranjeira (m)										
-4,2	-3,5	-3,2	-2,5	-2,0		2,0	2,5	3,2	3,5	4,2

Figura 4 – Parcela experimental contendo três laranjeiras úteis (\blacktriangle_n), 12 laranjeiras de bordadura (Δ) e 30 pontos de amostragem de solo (\circ_n), coletados nas posições de amostragem sob o limite externo da projeção da copa das laranjeiras (PCL), rodado da entrelinha (R) e enterrrodado da entrelinha (ER), com a indicação das respectivas distâncias (m) do tronco das laranjeiras úteis.

Para a realização dos tratamentos fitossanitários, adubação, calagem, controle vegetativo dos tratamentos e colheita de frutos, foram utilizadas roçadora mecânica, pulverizador com capacidade de 2.000 L e trator de pneu, respectivamente com massas aproximadas de 500, 1.000 e 4.000 kg.

3.2 Caracterização do solo

Para a caracterização física e hídrica do solo, foi feita abertura de uma trincheira de 2 m de profundidade, em 30 de novembro de 2003, na qual foi realizada a identificação morfológica dos horizontes A, AB, B_t e B_w. Amostras deformadas do solo foram utilizadas para análise granulométrica pelo método do hidrômetro (GEE; OR, 2002). No quadro 1, são apresentados os resultados das análises granulométricas e químicas para os respectivos horizontes do solo, que corresponde a um Argissolo Vermelho distrófico latossólico textura areia/franco-arenosa/franco-argilo-arenosa, A moderado, relevo suave-ondulado (EMBRAPA, 2006).

Quadro 1 – Granulometria, saturação por bases (V) e teores de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) nos horizontes do Argissolo Vermelho distrófico latossólico

Horizonte	Profundidade cm	Argila	Silte	Areia			V %	CC ⁽¹⁾ — m ³ m ⁻³ —	PMP ⁽²⁾ — m ³ m ⁻³ —
				Total g kg ⁻¹	Fina	Grossa			
A ⁽³⁾	0-6	90	30	880	650	230	60	0,23	0,04
AB ⁽³⁾	7-25	70	20	910	640	270	25	0,23	0,04
Bt ⁽⁴⁾	26-55	180	20	800	570	230	30	0,22	0,07
Bw ⁽⁵⁾	56-200	210	20	770	560	210	17	0,22	0,08

⁽¹⁾ e ⁽²⁾ Valores obtidos das curvas de retenção de água do solo, respectivamente, nos potenciais mátricos de -80 hPa (REICHARDT, 1988) e -15.000 hPa (Figura 5). ⁽³⁾ ⁽⁴⁾ e ⁽⁵⁾ Classes texturais, areia, franco-arenosa e franco-argilo-arenosa, respectivamente (SANTOS et al., 2005).

No perfil do solo, foram coletadas amostras de solo indeformadas em 17 anéis metálicos (1, 2, 3, 11, respectivamente, nos horizontes A, AB, B_t e B_w) com 5 cm de altura e diâmetro (100 cm³). Em seguida, as amostras foram saturadas em bandejas, mantendo-se uma lâmina de água até dois terços da altura dos anéis. As amostras saturadas foram submetidas aos potenciais mátricos de -10, -20, -40, -60, -80 hPa em uma mesa de tensão (ROMANO et al., 2002) e aos potenciais de -100, -300, -500, -700, -1.000, -4.000 e -15.000

hPa em câmaras de pressão (DANE; HOPMANS et al.; 2002). Depois de atingir equilíbrio hídrico, as amostras foram secadas em estufa a ± 105 °C por 24 h e pesadas para a determinação do teor de água e da densidade do solo (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

A curva de retenção de água no solo foi ajustada pela equação proposta por van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \{(\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \Psi)^n]^m\} \quad (1),$$

em que Ψ é o potencial mátrico (hPa); θ é o teor de água (kg kg^{-1}); θ_r é o teor de água residual do solo (kg kg^{-1}); θ_s é o teor de água do solo saturado (kg kg^{-1}); e α (hPa^{-1}), n e m são coeficientes empíricos do modelo obtidos no ajuste dos dados. Adotou-se a restrição de Mualem [$m = 1 - (1/n)$], conforme van Genuchten (1980). Os coeficientes de regressão do modelo matemático na linear foram estimados por meio do método de Gauss-Newton, utilizando-se o procedimento PROC NLIN (SAS INSTITUTE, 2001).

O valor da porosidade total (P_t) ou θ_s (kg kg^{-1}) foi estimado pela equação:

$$P_t \text{ ou } \theta_s = 1 - (D_s / D_p) \quad (2),$$

em que D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e D_p é a densidade de partículas do solo ($2,62 \text{ Mg m}^{-3}$).

As curvas de retenção de água do solo se diferenciaram entre os três horizontes do solo a partir do potencial mátrico de -300 hPa, aumentando a retenção de água nos horizontes Bt e Bw (Figura 5; Quadro 1), devido aos maiores teores de argila (RAWLS et al., 2003).

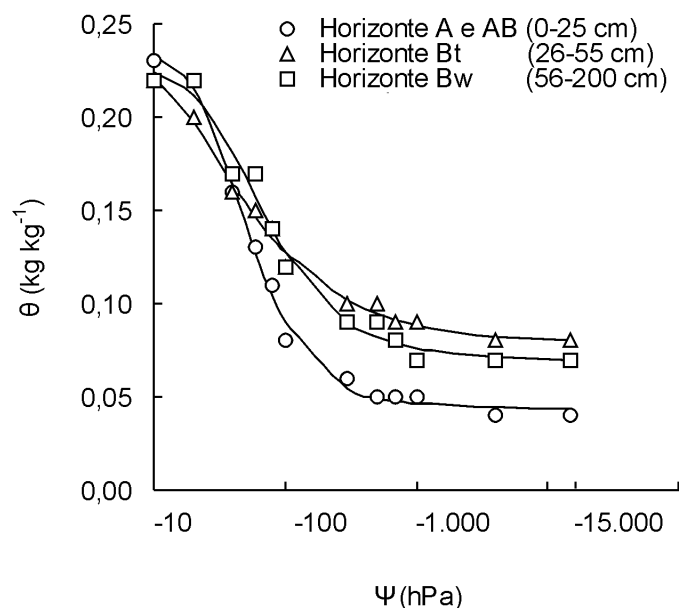


Figura 5 – Curvas de retenção de água do solo, teor de água (θ) em função do potencial mátrico (Ψ), para os horizontes diagnosticados do Argissolo Vermelho distrófico latossólico.

3.3 Amostragem de solo

As amostragens de solo, para diferentes finalidades, foram realizadas considerando-se posições, profundidades e períodos. A localização dos pontos de coleta de solo, em cada parcela experimental, está representada na figura 4. Do tronco até 50 cm do limite externo das projeções das copas das laranjeiras havia uniformidade quanto à inexistência de plantas de cobertura vegetal em todos os tratamentos, resultante do controle da vegetação com herbicida pós-emergente (Glyphosate), ao passo que nas entrelinhas havia diferenças na cobertura vegetal do solo promovida pelos tratamentos.

As amostragens para a determinação do teor de água no solo foram realizadas em dois períodos. No primeiro período, foram realizadas quatro avaliações (20/08/1999, 01/09/1999, 24/11/1999 e 05/04/2000), e, no segundo período, cinco avaliações (18/04/2002, 23/05/2002, 18/07/2002, 23/08/2002 e 11/10/2002). As amostras de solo foram coletadas com trado tipo sonda calador (2 cm de diâmetro) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm de profundidade, nas posições de amostragem entre rodado da entrelinha correspondente a laranjeira útil central (pontos de amostragem: 13 e

18) (Figura 4), nas avaliações realizadas no primeiro período, e nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm de profundidade, na posição de amostragem de solo enterrado da entrelinha (pontos de amostragem: 13 e 18) e sob o limite externo da projeção da copa das laranjeiras (pontos de amostragem: 15 e 16), nas avaliações realizadas no segundo período (Figura 4).

As amostras de solo deformadas, coletadas em 1999, 2000 e 2002, foram secadas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ por 24 h (GROSSMAN; REINSCH, 2002), para obter o teor de água no solo (kg kg^{-1}).

Para os indicadores de qualidade física do solo, foi realizada amostragem do solo em 12 pontos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha e 12 pontos na posição enterrado da entrelinha, em cada uma das parcelas experimentais (Figura 4), totalizando 216 amostras indeformadas, coletadas no centro da camada de 0-15 cm de profundidade (5-10 cm de profundidade), utilizando-se 216 anéis metálicos com dimensões de 5 cm de diâmetro e altura.

A amostragem de solo para estudo da taxa de estratificação do carbono orgânico do solo foi realizada em maio de 2003, utilizando-se cilindros de 10 cm e 8 cm de diâmetro, respectivamente, nas camadas de 0-5 cm e 10-15 cm de profundidade. As amostras de solo, compostas de três amostras simples, foram coletadas nas posições rodado e enterrado da entrelinha, correspondentes aos pontos de amostragem 1, 2, 11, 12 e 21 e 22 (Figura 4).

3.4 Indicadores de qualidade física do solo

As 216 amostras indeformadas de solo coletadas na camada de 5-10 cm de profundidade nas posições rodado e enterrado da entrelinha (Figura 4) foram agrupadas por tratamento (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea), posição de amostragem de solo (rodado e enterrado da entrelinha) e repetição (3 blocos), saturadas em água e submetidas aos mesmos potenciais mátricos utilizados nas amostras de caracterização do solo.

A resistência do solo à penetração foi realizada no centro das amostras, utilizando-se um penetrômetro estático similar ao descrito por Tormena et al. (1998), apresentando uma agulha e um cone na extremidade com semi-ângulo de 30° e área da base de $0,1256\text{ cm}^2$. A velocidade de

penetração utilizada foi de 10 mm min^{-1} , obtendo-se valores de resistência do solo à penetração a cada 0,6767 segundos, utilizando-se somente os valores obtidos entre 1,00 e 4,69 cm do deslocamento do cone dentro dos 5 cm das amostras, resultando em 250 medidas. A resistência do solo à penetração foi representada pelo valor médio dessas medidas.

Após as determinações de resistência do solo à penetração, as amostras foram secadas em estufa a $\pm 105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h e pesadas para calcular a densidade do solo, conforme Grossman e Reinsch (2002). Posteriormente, o solo contido nos anéis foi retirado, destorroado e tamisado em peneira de 2 mm de diâmetro de malha. Esse material de solo foi utilizado para a determinação do teor de carbono orgânico pelo método Walkley & Black e da densidade de partículas do solo conforme metodologias descritas pela Embrapa (1997).

A microporosidade e a macroporosidade foram calculadas para as 216 amostras de solo submetidas ao potencial mátrico de -60 hPa e secadas a $\pm 105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h para obter a porosidade total (KIEHL, 1979).

Os teores de água retido na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente foram utilizados para a obtenção da água disponível (KIEHL, 1979), apresentada na equação 3, utilizando-se 36 amostras de solo (3 tratamentos, 3 repetições, 2 posições de amostragem e 2 potenciais mátricos).

$$\text{Água disponível} = \theta_{cc} - \theta_{pmp} \quad (3),$$

em que θ_{cc} é o potencial mátrico na capacidade de campo (-80 hPa) e θ_{pmp} é o potencial mátrico no ponto de murcha permanente (-15.000 hPa).

3.5 Intervalo hídrico ótimo

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo, foram necessárias as obtenções das curvas de retenção de água e da curva de resistência do solo à penetração (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

A curva de retenção de água do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi ajustada pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) apresentada na equação 1. Os efeitos das variáveis quantitativas (densidade e carbono orgânico do solo) e das variáveis qualitativas (tratamento e posição de amostragem de solo) foram

avaliados conforme Silva e Kay (1997) e Tormena e Silva (2002). Foi utilizada a variável indicadora (qualitativa) para o fator tratamento, com os níveis para a gramínea (-1), vegetação espontânea (0) e leguminosa (1); e a variável indicadora binária, ou *Dummy*, para o fator posição de amostragem de solo, com os níveis para o entrerrodado da entrelinha (0) e rodado da entrelinha (1), conforme Neter et al. (1996).

A relação funcional entre a resistência do solo à penetração (RP), o teor de água (θ) retido em diferentes potenciais mátricos e a densidade do solo (D_s) foi ajustada utilizando a função proposta por Busscher (1990), a partir dos procedimentos descritos por Silva et al. (1994):

$$RP = c \theta^d D_s^e \quad (4),$$

cuja solução pode ser assim escrita:

$$\ln RP = \ln c + d \ln \theta + e \ln D_s \quad (5),$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é o teor volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$), D_s é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$), e, c , d , e e são os coeficientes de ajuste dos dados ao modelo matemático. Os ajustes das variáveis (tratamento, posição de amostragem de solo e carbono orgânico do solo) no modelo de regressão e a determinação dos coeficientes de regressão seguiram o mesmo procedimento apresentado para a curva de retenção de água do solo (NETER et al., 1996).

A qualidade do ajuste das equações 1 e 3 foi obtida pelo programa estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 2001), mediante a confirmação da distribuição normal dos resíduos do ajuste dos teores de carbono orgânico do solo e do tratamento em função da densidade do solo, descrito por Tormena e Silva (2002).

O intervalo hídrico ótimo foi calculado para cada valor de densidade do solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998):

$$[\theta_{cc} \text{ ou } \theta_{pa}, \text{ menor valor}] - [\theta_{pmp} \text{ ou } \theta_{rp}, \text{ maior valor}] \quad (6),$$

em que θ_{cc} é o teor de água retido na capacidade de campo (potencial mátrico de -0,008 MPa; REICHARDT, 1988); θ_{pa} corresponde à porosidade de aeração mínima de 10 % ou $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968); θ_{pmp} é o teor de água retido no ponto de murcha permanente (potencial mátrico de -15.000 hPa; KIEHL, 1979); e θ_{rp} é o teor de água em que a resistência do solo à penetração atingiu 2,2 MPa (TAYLOR et al., 1966; ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995).

O θ_{pa} foi estimado pela equação:

$$\theta_{pa} = \theta_s - 0,1 \quad (7);$$

3.6 Índice S de qualidade física do solo

O cálculo do índice S foi realizado conforme Dexter (2004), a partir das curvas de retenção de água do solo ajustadas pela equação 1, proposta por van Genuchten (1980), com θ_r e θ_s obtidos na unidade de massa (kg kg^{-1}), utilizando-se 12 potenciais mátricos com 3 repetições, totalizando 36 anéis para cada tratamento (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea) e posição de amostragem de solo (rodado e entrerrodado da entrelinha).

O índice S (adimensional) foi determinado a partir dos coeficientes das curvas de retenção de água do solo, utilizando-se a equação proposta por Dexter (2004):

$$|S| = -n(\theta_s - \theta_r)[(2n - 1)/(n - 1)]^{[(1/n) - 2]} \quad (8).$$

em que n é o coeficiente empírico da equação; θ_s é o teor de água do solo saturado (kg kg^{-1}) e θ_r é o teor de água residual do solo (kg kg^{-1}). Todos esses coeficientes foram obtidos por meio da equação 1 (van GENUCHTEN, 1980).

3.7 Indicadores da capacidade de aeração total e de armazenamento de água do solo

O indicador capacidade de aeração total do solo (adimensional), descrito na equação 9, foi calculado pelo quociente entre a porosidade drenada

entre a saturação e o potencial mátrico de -80 hPa (CA_t) com a porosidade total do solo (P_t) apresentada na equação 2 (REYNOLDS et al., 2002).

$$\text{Capacidade de aeração total do solo} = \text{CA}_t / \text{P}_t \quad (9).$$

O indicador de capacidade de armazenamento de água do solo (adimensional), descrito na equação 10, foi calculado por meio das relações entre o teor de água do solo retido no potencial equivalente à capacidade de campo (CC), determinada no potencial mátrico de -80 hPa, com a porosidade total do solo (P_t), apresentada na equação 2 (REYNOLDS et al., 2002).

$$\text{Capacidade de armazenamento total do solo} = \text{CC} / \text{P}_t \quad (10).$$

Também foram calculados os seguintes indicadores propostos por Reynolds et al. (2002): porosidade no domínio dos macroporos, definida como o volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -10 hPa, equivalente aos poros com diâmetro superiores a 300 µm; porosidade no domínio da matriz do solo definida pelo volume de poros com água no potencial mátrico de -80 hPa, equivalente aos poros com diâmetro inferiores a 300 µm; e a capacidade de aeração da matriz do solo definida como o volume de poros drenados entre o potencial mátrico de -10 e -80 hPa.

3.8 Taxa de estratificação de carbono orgânico do solo

A taxa de estratificação do carbono orgânico do solo foi calculada pelo quociente dos teores de carbono orgânico do solo da camada de 0-5 cm e 10-15 cm de profundidade, apresentada na equação 11, conforme Franzluebbbers (2002) e Mrabet (2002):

$$\text{Carbono orgânico}_{(0-5\text{cm})} / \text{Carbono orgânico}_{(10-15\text{cm})} \quad (11).$$

3.9 Avaliações fisiológicas nas folhas das laranjeiras

As avaliações fisiológicas foram realizadas nas folhas das laranjeiras (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água) nos mesmos dias das amostragens de solo destinadas à determinação do teor de água no solo, no primeiro período (20/08/1999, 01/09/1999, 24/11/1999 e 05/04/2000) e no segundo período (18/04/2002, 23/05/2002, 18/07/2002, 23/08/2002 e 11/10/2002). Esses dois períodos apresentaram, em comum, a fase de pré e pós-florescimento (agosto-outubro), constituindo-se no estágio fenológico e hídrico mais crítico para o cultivo de citros no noroeste do Paraná (CALHEIROS et al., 1992), caracterizados na figura 2.

As medições foram efetuadas na laranjeira central útil (Figura 4), em duas folhas próximas e totalmente desenvolvidas, localizadas na porção mediana da copa das laranjeiras. A fim de se evitar desuniformidade nas leituras, em relação à incidência dos raios solares, foram utilizadas folhas de laranjeiras em que os raios incidiam diretamente sobre elas, mudando-se, portanto, a posição da amostragem nas laranjeiras, no decorrer das avaliações diárias.

Em cada uma das nove avaliações do primeiro (1999-2000) e do segundo período (2002), realizou-se de três a cinco leituras da taxa de fotossíntese e da condutância estomática no intervalo compreendido entre 8 e 17 h. As leituras foram obtidas por meio de aparelho portátil de medida de fotossíntese (LI-6200, LICOR Inc.), utilizando-se uma câmara com volume de 1 L. Os dados registrados na câmara de fotossíntese foram transferidos para uma planilha eletrônica (MARUR; VIEIRA, 1997).

A determinação do potencial da água nas folhas das laranjeiras foi obtida em folhas próximas daquelas utilizadas para a determinação da taxa de fotossíntese e condutância estomática, utilizando-se uma câmara de pressão (PMS-1000 *SoilMoisture*) do tipo Scholander (SCHOLANDER et al., 1965).

Em virtude de problemas de configuração do equipamento, as leituras não foram realizadas em 18/04/2002 para a taxa de fotossíntese e condutância estomática e em 23/08/2002 para a condutância estomática nas folhas das laranjeiras.

3.10 Análises estatísticas

Os coeficientes de regressão das equações das curvas de retenção da água e de resistência do solo à penetração foram estimados por meio do método de Gauss-Newton, utilizando-se o procedimento PROC NLIN (SAS INSTITUTE, 2001), utilizando-se 215 amostras indeformada de solo, por ter sido desconsiderada uma amostra que apresentou valor discrepante (*outlier*) de densidade do solo na posição de amostragem de solo enterrrodado da entrelinha, pertencente ao tratamento gramínea ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$), conforme Libardi et al. (1996). Houve distribuição dos resíduos do ajuste dos teores de carbono orgânico do solo e do tratamento, separadamente, em função da densidade do solo (TORMENA; SILVA, 2002), obtidos pelo programa estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 2001).

Os dados originais dos indicadores de qualidade do solo (densidade do solo, variáveis de porosidade, teor de água na capacidade de campo, teor de água no ponto de murcha permanente, água disponível, indicador da capacidade de aeração do solo, indicador da capacidade de armazenamento de água do solo, taxa de estratificação de carbono orgânico do solo e intervalo hídrico ótimo), na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (médias aritméticas dos pontos de amostragem: 14 e 17) e na posição de amostragem de solo enterrrodado da entrelinha (médias aritméticas dos pontos de amostragem: 13 e 18), além do teor de água no solo e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo (Figura 4), foram submetidos às análises de variâncias por meio do modelo matemático de blocos ao acaso (BANZATTO; KRONKA, 1989) e aos testes de comparação de médias Tukey entre os tratamentos (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea), para cada uma das posições de amostragem de solo (rodado e enterrrodado da entrelinha), utilizando-se grau de confiança de 15 %. Os mesmos procedimentos estatísticos foram utilizados para as variáveis fisiológicas (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas das laranjeiras). As análises de variância e os testes de comparação de média foram realizados por meio do programa estatístico SAS Institute (2001). Foram obtidas as probabilidades superiores ao teste F tabelado por meio do programa estatístico SAS Institute (2001).

Para comparar a dispersão das variáveis fisiológicas (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas das laranjeiras), foram calculados os desvios padrões para cada horário de leitura.

Os dados originais das variáveis fisiológicas (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água), obtidos nas folhas das laranjeiras úteis central de cada parcela experimental (Figura 4), no primeiro período (20/08/1999, 01/09/1999, 24/11/1999 e 05/04/2000) e no segundo período (23/05/2002, 18/07/2002 e 11/10/2002), foram reduzidos a médias aritméticas, formando pares de dados com os teores de água no solo em diferentes camadas do solo. Excluíram-se as avaliações de 18/04/2002 e 23/08/2002 pela falta de dados da taxa de fotossíntese e/ou da condutância estomática. Os dados foram submetidos à análise de trilha (CRUZ et al., 2004), baseando-se no diagrama causal: variável dependente (taxa de fotossíntese, condutância estomática ou potencial da água nas folhas das laranjeiras “Pêra”) e variável independente ou explicativa (teor de água nas camadas de solo), independentemente para o primeiro e segundo período de avaliação (Figura 6).

Os coeficientes de correlação de Pearson, os coeficientes de correlação da análise de trilha (efeitos diretos) e os coeficientes de determinação (r^2) do modelo causal foram estimados pelo programa estatístico GENES (CRUZ, 2001). Previamente, foi testada a multicolinearidade das variáveis do modelo causal e quando o valor do indicador de inflação da variância (VIF) apresentava-se superior a 10 adicionou-se um valor K na diagonal da matriz (CRUZ et al., 2004), utilizando-se o procedimento “Análise de trilha com colinearidade” (CRUZ, 2001; CRUZ; CARNEIRO, 2003).

A comparação dos valores do índice S entre os tratamentos e posição de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha foi realizada utilizando os intervalos de confiança da média (95 %), com grau de confiança de 5 % de probabilidade, para os coeficientes da equação 1 (θ_s , n , α e θ_r), obtidos por meio do procedimento PROC NLIN (SAS INSTITUTE, 2001).

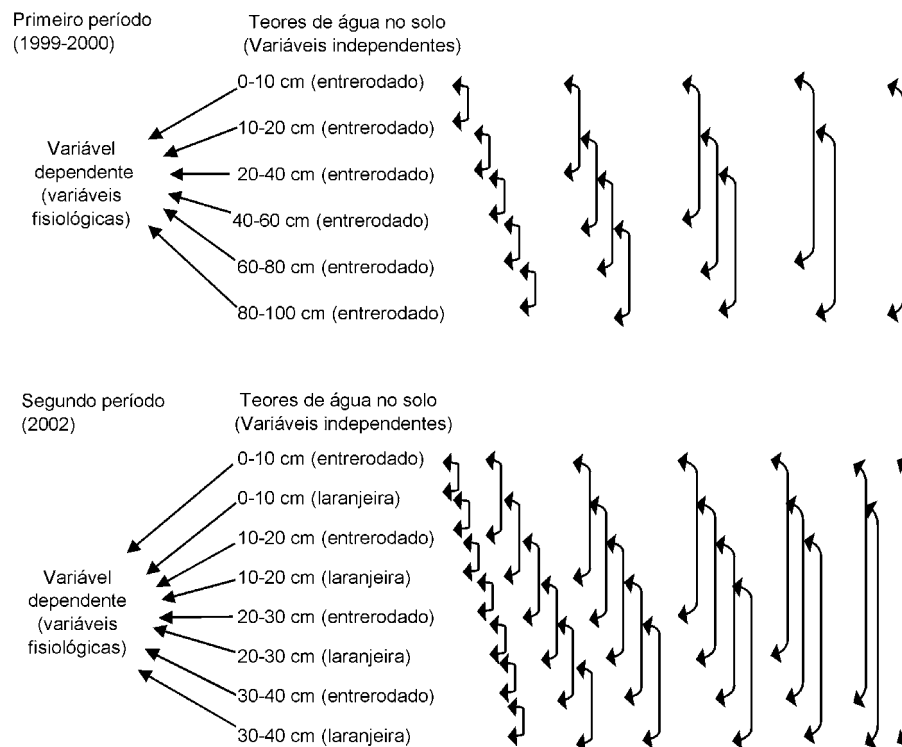


Figura 6 – Esquema causal da análise de trilha para o primeiro e segundo período de avaliação entre a variável dependente (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas das laranjeiras) e a variável independente (teor de água no solo para as respectivas camadas de solo) nas posições de amostragem de solo enterrado da entrelinha e sob o limite exterior da copa da laranjeira.

A apresentação dos resultados das análises de trilhas foi desdobrada em coeficientes de correlação simples de Pearson e a significância da variável dependente (taxa de fotossíntese, condutância estomática ou potencial da água nas folhas das laranjeiras “Pêra”) com as correlações do efeito direto do teor de água do solo de cada uma das camadas de solo. Concomitantemente, foram obtidos os coeficientes de correlação do efeito direto do teor de água de cada camada de solo na taxa de fotossíntese, na condutância estomática e no potencial da água nas folhas das laranjeiras “Pêra” a partir das análises de trilhas. Quando o teor de água apresentou alta correlação com a variável dependente (coeficiente de correlação simples de Pearson) e houve elevado efeito direto do teor de água sobre a variável dependente (coeficiente da análise de trilha), confirmou-se a relação de causa e efeito entre as duas variáveis (CRUZ et al., 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados originais das variáveis submetidas às análises de variância atenderam os pressupostos básicos de normalidade dos resíduos pelo teste Shapiro-Wilk e de homocedasticidade das variâncias pelo teste de Levene (VIEIRA, 1999), obtidos pelo programa estatístico SAS Institute (2001), com grau de confiança mínimo de 1 % de probabilidade.

4.1 Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

A densidade e a porosidade total do solo diferenciaram-se ($p < 0,15$) entre os tratamentos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, fato não verificado na posição de amostragem de solo enterrodado da entrelinha (Quadro 2). Estes resultados mostram que não houve comprometimento da qualidade física do solo na posição de amostragem de solo enterrodado da entrelinha. Na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, é possível controlar a degradação estrutural do solo por meio do manejo das plantas de cobertura permanente do solo, priorizando-se a manutenção da gramínea, seguida da manutenção da leguminosa (Quadro 2). Esses resultados assemelham-se aos observados por Haynes (1980), que também verificou a redução da densidade e o aumento da macroporosidade do solo em pomares de macieira sob os sistemas de manejo de solo com gramínea e vegetação espontânea com herbicida.

Considerando-se os valores referenciais de densidade de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ deste solo em condição de mata nativa (EMBRAPA, 1984), constata-se que a compactação do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha foi decrescente para os tratamentos de sistema de manejo das plantas de cobertura permanente (vegetação espontânea, leguminosa e gramínea) (Quadro 2). Esses resultados indicam os efeitos deletérios da ação do tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas também verificados em pomares de macieiras (GOH et al., 2001; OLIVEIRA; MERWIN, 2001) e confirmado em

pomares de laranjeiras (LIMA et al., 2004; MINATEL et al., 2006; FIDALSKI et al., 2007).

Quadro 2 – Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, na camada de 5-10 cm de profundidade para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), nas posições de amostragem de solo rodado e enterrodado da entrelinha

Trat.	Densidade (Mg m ⁻³)	Macroporosidade	Microporosidade (m ³ m ⁻³)	Porosidade total
Posição de amostragem de solo rodado da entrelinha				
G	1,64 c ⁽¹⁾	0,07 a	0,30 a	0,37 a
L	1,69 b	0,07 a	0,28 b	0,36 b
VE	1,72 a	0,06 a	0,28 b	0,34 c
CV ⁽²⁾	0,97	18,43	2,72	1,88
dms ⁽³⁾	0,03	0,02	0,02	0,01
p>F ⁽⁴⁾	0,01	0,65	0,07	0,01
Posição de amostragem de solo enterrodado da entrelinha				
G	1,62 a	0,08 a	0,30 a	0,38 a
L	1,64 a	0,08 a	0,30 a	0,37 a
VE	1,67 a	0,06 a	0,30 a	0,37 a
CV ⁽²⁾	2,85	33,86	4,63	5,19
dms ⁽³⁾	0,09	0,05	0,03	0,04
p>F ⁽⁴⁾	0,53	0,71	0,81	0,61

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade entre os tratamentos nas posições de amostragem de solo rodado e enterrodado da entrelinha. ⁽²⁾ Coeficiente de variação (%). ⁽³⁾ Diferença mínima significativa. ⁽⁴⁾ Probabilidade superior ao teste F.

A macroporosidade do solo não foi sensível para caracterizar o efeito dos sistemas de manejo das plantas de cobertura permanente ($p < 0,15$) na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadro 2), inerente à predominância de macroporos estabelecidos pelo contato das partículas de areia (Quadro 1), conforme Kiehl (1979).

A microporosidade foi inferior ($p < 0,15$) nos tratamentos leguminosa e vegetação espontânea em relação ao tratamento gramínea. A alteração da microporosidade do solo se deve à maior quantidade de poros capilares, responsáveis pelo armazenamento de água no solo (KIEHL, 1979), ou de poros texturais dependentes da granulometria do solo (DEXTER, 2004). A redução

dos poros capilares é atribuída às menores taxas de cobertura do solo verificadas nos tratamentos leguminosa e vegetação espontânea (Figura 3). Esses tratamentos são, comparativamente, menos eficientes no controle da perda de solo em relação ao tratamento gramínea (DECHEN et al., 1981). Além disso, a exploração agrícola dos solos desenvolvidos a partir do arenito da Formação Caiuá diminuiu o grau de flocculação de argila (CARDOSO et al., 1992), na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, verificado em pomar de laranjeira “Valência” por Fidalski et al. (2007).

4.2 Indicadores da capacidade de aeração total e de armazenamento de água do solo

Os indicadores de capacidade de aeração do solo e de capacidade de armazenamento de água no solo não se diferenciaram ($p < 0,15$) entre os tratamentos e posições de amostragem de solo (Quadro 3), aproximaram-se dos valores referenciais de 0,34 e 0,66, respectivamente, indicando boa qualidade física do solo (REYNOLDS et al., 2002). Esses autores não verificaram o efeito dos sistemas de manejo para estes indicadores em solo pertencente à classe textural arenosa. No presente trabalho, houve a inversão da magnitude dos valores dos indicadores de capacidade de aeração do solo e de capacidade de armazenamento de água no solo (Quadro 3) comparados aos índices obtidos por Reynolds et al. (2002) em solo arenoso. Atribui-se esta resposta diferenciada ao maior teor de areia fina proporcionalmente a areia grossa (Quadro 1), além da ausência do revolvimento do solo desde a implantação deste experimento no período de 10 anos (1993-2004).

A capacidade de aeração total do solo foi superior ($p < 0,15$) nos tratamentos gramínea e leguminosa em comparação ao tratamento vegetação espontânea (Quadro 3). A porosidade no domínio dos macroporos, proposta por Reynolds et al. (2002), não se diferenciou ($p < 0,15$) entre os tratamentos, independentemente das posições de amostragem de solo (Quadro 4), indicando que os sistemas de manejo de solo não alteraram os poros com diâmetro superior a 300 μm em solo pertencente à classe textural areia (Quadro 1). Por outro lado, a porosidade no domínio da matriz distinguiu os tratamentos na

posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, semelhante à porosidade total (Quadros 3 e 4).

Quadro 3 – Capacidade de aeração total, teor de água retido na capacidade de campo, porosidade total e indicadores de capacidade de aeração e capacidade de armazenamento de água, na camada de 5-10 cm de profundidade para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), nas posições de amostragem de solo rodado e enterrodado da entrelinha

Trat.	Capacidade de aeração total (A)	Teor de água retido no potencial mátrico de -80 hPa (B)	Porosidade total (C)	Indicador da capacidade de aeração (A)/(B)	Indicador da capacidade de armazenamento de água (B)/(C)
	(m ³ m ⁻³)			(adimensional)	
Posição de amostragem de solo rodado da entrelinha					
G	0,10 a ⁽¹⁾	0,27 a	0,37 a	0,26 a	0,74 a
L	0,10 a	0,26 a	0,36 b	0,28 a	0,72 a
VE	0,08 b	0,27 a	0,34 c	0,22 a	0,78 a
CV ⁽²⁾	13,03	3,97	1,88	12,90	4,40
dms ⁽³⁾	0,02	0,02	0,01	0,06	0,07
p>F ⁽⁴⁾	0,12	0,26	0,01	0,23	0,23
Posição de amostragem de solo enterrodado da entrelinha					
G	0,12 a	0,27 a	0,38 a	0,30 a	0,70 a
L	0,11 a	0,27 a	0,37 a	0,28 a	0,72 a
VE	0,09 a	0,27 a	0,37 a	0,26 a	0,74 a
CV ⁽²⁾	18,00	2,48	5,19	13,63	5,27
dms ⁽³⁾	0,04	0,01	0,04	0,07	0,07
p>F ⁽⁴⁾	0,41	0,79	0,61	0,49	0,49

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade entre os tratamentos nas posições de amostragem de solo rodado e enterrodado da entrelinha. ⁽²⁾ Coeficiente de variação (%). ⁽³⁾ Diferença mínima significativa. ⁽⁴⁾ Probabilidade superior ao teste F.

O indicador da capacidade de aeração total do solo foi mais sensível do que a macroporosidade (Quadros 2 e 3), os quais se diferenciam metodologicamente pela drenagem do solo entre os potenciais mátricos de -80 e -60 hPa, respectivamente. O valor do indicador da capacidade de aeração total do solo confirmou que os tratamentos gramínea e leguminosa

proporcionaram valores mínimos de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, indispensáveis para a difusão de gases e a manutenção das atividades fisiológicas das raízes das plantas (GRABLE; SIEMER, 1968), o qual seria subestimado se fosse utilizada como critério a macroporosidade do solo (Quadros 2 e 3).

Quadro 4 – Porosidade no domínio dos macroporos, porosidade no domínio da matriz e capacidade de aeração da matriz, na camada de 5-10 cm de profundidade para os tratamentos gramínea, leguminosa e vegetação espontânea, nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha

Trat.	Porosidade no domínio dos macroporos ($\Phi \geq 300 \mu\text{m}$)	Porosidade no domínio da matriz ($\Phi \leq 300 \mu\text{m}$)	Capacidade de aeração da matriz
	$(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$		
Posição de amostragem de solo rodado da entrelinha			
G	0,02 a ⁽¹⁾	0,35 a	0,07 a
L	0,02 a	0,33 b	0,07 a
VE	0,02 a	0,31 c	0,05 a
CV ⁽²⁾	8,17	2,01	18,33
dms ⁽³⁾	0,01	0,01	0,03
p>F ⁽⁴⁾	0,12	0,01	0,12
Posição de amostragem de solo entrerrodado da entrelinha			
G	0,02 a	0,36 a	0,09 a
L	0,02 a	0,35 a	0,08 a
VE	0,02 a	0,34 a	0,07 a
CV ⁽²⁾	19,46	4,36	20,87
dms ⁽³⁾	0,01	0,03	0,03
p>F ⁽⁴⁾	0,46	0,60	0,54

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade, entre os tratamentos nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha. ⁽²⁾ Coeficiente de variação (%). ⁽³⁾ Diferença mínima significativa. ⁽⁴⁾ Probabilidade superior ao teste F.

O manejo do tratamento vegetação espontânea com herbicida, devido à menor produção de biomassa e taxa de cobertura do solo (Figura 3), apresentou maior deformação da estrutura do solo, caracterizada pela menor porosidade total e maior densidade do solo (Quadro 2).

4.3 Índice S de qualidade física do solo

Os valores do índice S, obtidos a partir dos coeficientes inferior e superior do intervalo de confiança da média ($p=0,05$) dos dados de Ψ e θ ao ajuste do modelo de van Genuchten (1980), apresentaram-se entre 0,058-0,288 (Quadro 5), superando o valor do índice de 0,035 sugerido por Dexter (2004) e aqueles obtidos por Tormena e Silva (2004) e Osuna-Ceja et al. (2006). A superestimativa dos índices S neste solo é atribuída à textura pertencente à classe areia (Quadro 1), que confere maior inclinação à reta tangente ao ponto de inflexão na curva de retenção de água do solo (Figura 7).

Ao comparar os valores do índice S obtidos por meio dos intervalos de confiança da média ($p=0,05$) dos coeficientes da equação de van Genuchten (1980), observa-se, no quadro 5, que os índices S e os pontos de inflexão (θ_i e Ψ_i) apresentaram valores dentro do intervalo de confiança entre os três tratamentos (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea) e as duas posições de amostragem de solo (rodado e enterrado da entrelinha).

Os pontos de inflexões dos tratamentos ocorreram para valores de θ (0,1084 a 0,1389 kg kg^{-1}) e Ψ (51 a 120 hPa), com inclinações semelhantes ($p=0,05$) entre as retas tangentes aos pontos de inflexão das curvas de retenção de água do solo para os três tratamentos, independentemente das posições rodado e enterrado da entrelinha (Quadro 5; Figura 7). Tais resultados corroboram as afirmações de Dexter (2004), quanto a não aplicação do índice S para solos arenosos, a exemplo deste solo com baixo teor de argila na profundidade avaliada de 5-10 cm (Quadro 1).

A semelhança dos valores do índice S (Quadro 5; Figura 7) para os tratamentos estudados nos quais as alterações da estrutura do solo estão consolidadas pelo longo tempo de manejo (1996-2003) é confirmada pela macroporosidade, pelo indicador da capacidade de aeração, pela porosidade de aeração e pela porosidade no domínio dos macroporos (Quadros 2, 3 e 4).

Os indicadores capacidade de aeração do solo, capacidade de armazenamento de água do solo e o índice S (Quadros 3 e 5) são dependentes da estrutura e da porosidade do solo e não se aplicam à camada de 0-15 cm de profundidade, pertencente à classe areia (Quadros 1, 3 e 5), em concordância com os estudos de Reynolds et al. (2002) e Dexter (2004).

Alternativamente, a diferenciação da qualidade física do solo entre os tratamentos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha pode ser caracterizada em solo arenoso por meio dos indicadores microporosidade, porosidade total, capacidade de aeração da matriz e total do solo (Quadros 2, 3 e 4).

Quadro 5 – Coeficientes das curvas de retenção de água do solo para o modelo van Genuchten (1980) (θ_s , n , α , e θ_r), coeficiente de determinação (r^2), teor de água e potencial mátrico no ponto de inflexão da curva de retenção de água do solo (θ_i e h_i) e índice S, na camada de 5-10 cm de profundidade para os tratamentos: gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), obtidos individualmente nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha

Trat.	IC ⁽¹⁾	θ_s (kg kg ⁻¹)	n ⁽²⁾	α (hPa ⁻¹)	θ_r (kg kg ⁻¹)	r^2 ⁽³⁾ ⁽²⁾	θ_i (kg kg ⁻¹)	Ψ_i (hPa)	Índice S ⁽²⁾
Posição de amostragem de solo rodado da entrelinha									
G	Inf.	0,1806	3,0426	0,0117	0,0450	0,95	0,1185	97	0,090
G	Méd.	0,1913	5,0552	0,0132	0,0520	0,95	0,1248	79	0,164
G	Sup.	0,2020	7,0677	0,0146	0,0590	0,95	0,1327	70	0,241
L	Inf.	0,1751	3,7376	0,0112	0,0324	0,96	0,1084	97	0,120
L	Méd.	0,1844	6,0518	0,0121	0,0388	0,96	0,1142	85	0,208
L	Sup.	0,1936	8,3661	0,0130	0,0452	0,96	0,1213	78	0,288
VE	Inf.	0,1754	2,0646	0,0115	0,0271	0,95	0,1122	120	0,060
VE	Méd.	0,1878	3,2556	0,0140	0,0349	0,95	0,1172	80	0,110
VE	Sup.	0,2002	4,4466	0,0165	0,0427	0,95	0,1256	64	0,161
Posição de amostragem de solo entrerrodado da entrelinha									
G	Inf.	0,1904	2,4672	0,0118	0,0407	0,96	0,1240	105	0,077
G	Méd.	0,2031	3,9119	0,0137	0,0480	0,96	0,1303	79	0,137
G	Sup.	0,2158	5,3566	0,0157	0,0553	0,96	0,1389	66	0,201
L	Inf.	0,1845	1,9718	0,0134	0,0313	0,95	0,1200	107	0,058
L	Méd.	0,1983	2,8498	0,0173	0,0393	0,95	0,1261	67	0,097
L	Sup.	0,2121	3,7278	0,0212	0,0473	0,95	0,1350	51	0,138
VE	Inf.	0,1895	3,0658	0,0125	0,0309	0,96	0,1168	91	0,106
VE	Méd.	0,2008	4,5634	0,0140	0,0379	0,96	0,1235	75	0,171
VE	Sup.	0,2120	6,0609	0,0154	0,0449	0,96	0,1315	67	0,239

⁽¹⁾ Intervalo de confiança - inferior, média e superior (p=0,05). ⁽²⁾ adimensional (Ψ_i em módulo). ⁽³⁾ $r^2 = 1 - (SQ_{residuo}/SQ_{total})$ em que SQ é a soma dos quadrados.

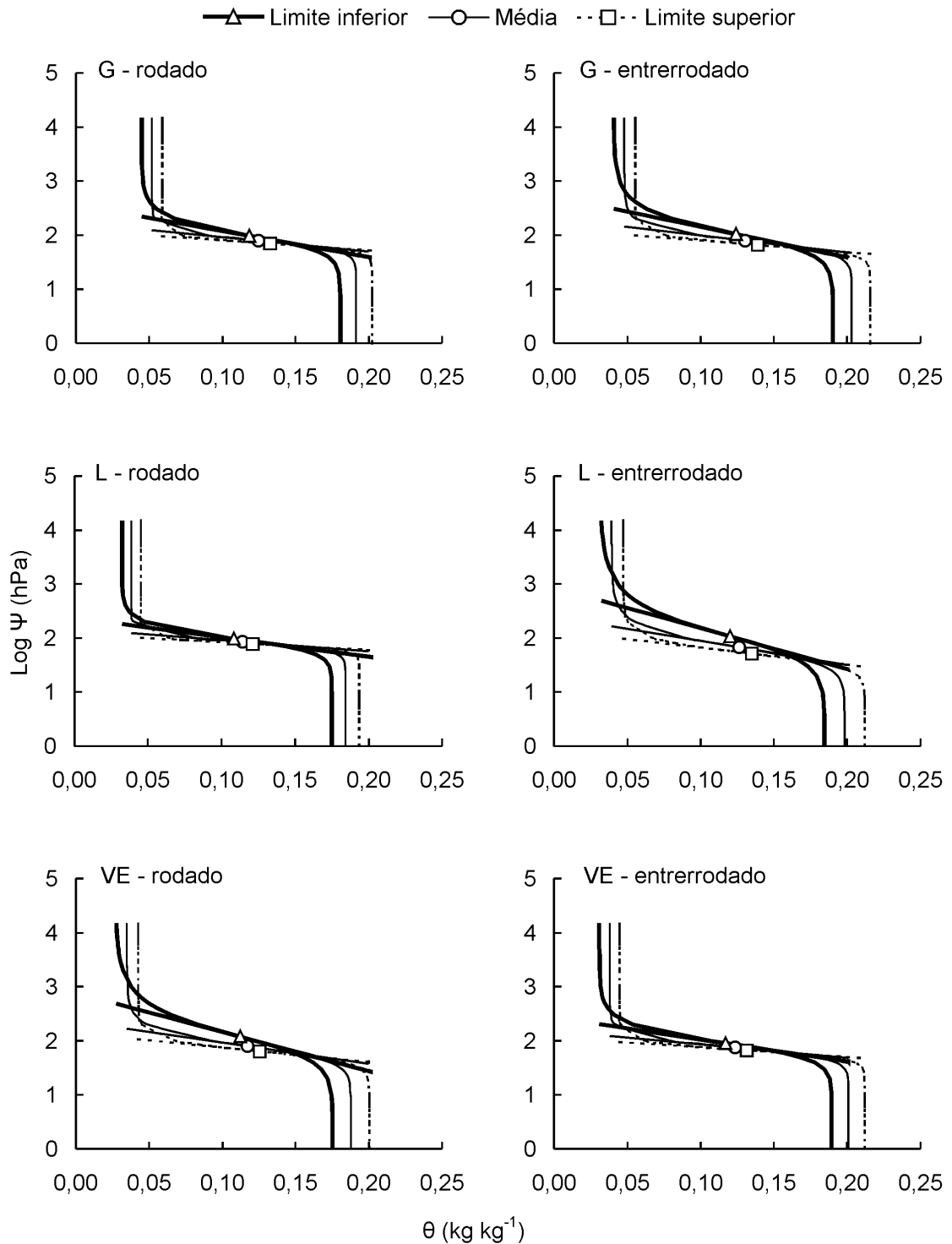


Figura 7 – Pontos de inflexão (θ_i , Ψ_i) das retas tangentes às curvas de retenção de água do solo descritas pelos coeficientes da função van Genuchten (θ_s , α , n e θ_r) correspondentes aos valores do limite inferior, média e limite superior do intervalo de confiança inferior ($p=0,05$), na camada de 5-10 cm de profundidade, para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha.

4.4 Taxa de estratificação de carbono orgânico do solo

A manutenção dos tratamentos durante dez anos (1993-2003) não diferenciou ($p < 0,15$) os teores de carbono orgânico do solo na camada de 5-10 cm de profundidade, para as duas posições de amostragem de solo (Quadro 6). Contrariamente, as amostras coletadas na camada superficial, de 0-5 cm de profundidade, mostraram diferenças dos teores de carbono orgânico do solo ($p < 0,15$), para os tratamentos gramínea e leguminosa em comparação à vegetação espontânea nas duas posições de amostragem de solo na entrelinha. Diversos trabalhos confirmam o efeito positivo da utilização de plantas de cobertura permanente do solo (gramínea e da leguminosa) na manutenção de maiores teores de carbono orgânico do solo em pomares de fruteiras (HAYNES, 1980; CINTRA et al., 1983; FIDALSKI; STENZEL, 2006).

Considerando-se o limite crítico da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo igual ou superior a duas unidades, por não ser comum encontrar esse valor em solos degradados (FRANZLUEBBERS, 2002), o manejo do tratamento vegetação espontânea com herbicida estaria comprometendo a qualidade do solo, enquanto que os tratamentos gramínea e leguminosa estariam contribuindo com a manutenção da qualidade física do solo nas posições de amostragem de solo rodado e enterrado da entrelinha (Quadro 6). A taxa de estratificação de carbono orgânico do solo e a capacidade de aeração total do solo indicaram melhor qualidade física do solo para os tratamentos gramínea e leguminosa em comparação ao tratamento vegetação espontânea na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadros 3 e 6).

A praticidade de identificar os efeitos do manejo do solo entre os tratamentos por meio da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo (Quadro 6), preconizado por Franzluebbers (2002), corrobora os trabalhos realizados por Mrabet (2002), Tormena et al. (2004), Fidalski et al. (2006b) e Moreno et al. (2006). Considerando-se somente a taxa de estratificação de carbono orgânico do solo, o tratamento vegetação espontânea estaria comprometendo a qualidade física do solo comparado aos tratamentos gramínea e leguminosa (Quadro 6).

Quadro 6 – Teores de carbono orgânico do solo e taxa de estratificação de carbono orgânico do solo para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha

Trat.	Carbono orgânico do solo			Taxa de estratificação de carbono orgânico do solo (A)/(B) (adimensional)
	5-10 cm ⁽¹⁾	0-5 cm (A)	10-15 cm (B)	
	————— (g kg ⁻¹) —————			
	Posição de amostragem de solo rodado da entrelinha			
G	5,59 a ⁽²⁾	10,15 a	4,27 a	2,39 a
L	5,24 a	8,09 b	3,54 a	2,30 a
VE	4,10 a	6,52 b	4,09 a	1,59 b
CV ⁽³⁾	23,01	11,01	11,86	11,59
dms ⁽⁴⁾	2,25	1,78	0,92	0,48
p>F ⁽⁵⁾	0,35	0,02	0,26	0,03
	Posição de amostragem entrerrodado da entrelinha			
G	4,62 a	9,46 a	4,39 a	2,17 a
L	5,06 a	8,54 a	3,75 a	2,31 a
VE	4,55 a	6,22 b	3,83 a	1,64 b
CV ⁽³⁾	8,99	11,04	9,83	9,76
Dms ⁽⁴⁾	0,84	1,575	0,77	0,349
p>F ⁽⁵⁾	0,38	0,03	0,21	0,03

⁽¹⁾ Amostras de solo indeformadas coletadas para quantificar os indicadores de qualidade física do solo. ^(A) e ^(B) Amostras de solo deformadas coletadas especificamente para quantificar a taxa de estratificação do carbono orgânico do solo.

⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade, entre os tratamentos nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha. ⁽³⁾ Coeficiente de variação (%). ⁽⁴⁾ Diferença mínima significativa. ⁽⁵⁾ Probabilidade superior ao teste F.

4.5 Curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração

Os coeficientes da curva de retenção de água do solo da função de van Genuchten (1980), ajustada aos dados dos teores de água no solo (θ) em função dos potenciais mátricos (Ψ), explicaram 94 % da variabilidade do θ (Quadro 7). Houve efeito do tratamento no coeficiente θ_r (teor de água residual no solo) e da densidade do solo no coeficiente n , indicando que o manejo da cobertura do solo influencia θ com o secamento do solo e que com o aumento da compactação reduz a curvatura da curva de retenção de água no solo, reduzindo a amplitude de água retida pelo solo em diferentes Ψ . Esses

coeficientes foram estatisticamente significativos por terem apresentado intervalos de confiança sem valor nulo (Quadro 7).

Não foi constatado efeito significativo das posições de amostragem de solo para os coeficientes das curvas de retenção de água do solo, fato relatado também por Tormena et al. (1998), em solo argiloso cultivado com milho. A independência entre as curvas de retenção de água do solo para as posições de amostragem de solo se deve à elevada frequência relativa de amostras de solo que apresentaram amplitudes semelhantes dos valores de densidade do solo nas posições rodado e entrerrodado da entrelinha, 85, 75 e 83 %, respectivamente, para os tratamentos gramínea, leguminosa e vegetação espontânea. Provavelmente, neste caso, a densidade do solo incorporou os efeitos das posições de amostragem de solo, justificando a independência da retenção de água em relação às posições de amostragem de solo.

Os sinais dos coeficientes (a_1 e a_2) da curva de retenção de água do solo indicaram, simultaneamente, efeitos positivo e negativo, respectivamente, para os teores de carbono orgânico do solo e o tratamento no valor de θ_r (Quadro 7). De acordo com Rawls et al. (2003) e Olness e Archer (2005), para solo com baixo teor de argila, um pequeno aumento de carbono orgânico do solo resulta no aumento de θ_r .

O ajuste dos dados da resistência do solo à penetração em função de θ e da densidade do solo explicou 87 % da variabilidade da resistência do solo à penetração (Quadro 7). Os coeficientes de regressão da curva de resistência do solo à penetração indicam que esta varia negativamente com θ (coeficiente d) e positivamente com a densidade do solo (coeficiente e). O efeito positivo dos teores de carbono orgânico do solo no intercepto do modelo da curva de resistência do solo à penetração é atribuído à maior estabilidade das ligações entre as partículas primárias do solo (SILVA; KAY, 1997).

O fato de terem sido incorporados os efeitos (tratamento, densidade e carbono orgânico do solo) às equações das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração (Quadro 7) pode ser atribuído à manutenção dos tratamentos nas entrelinhas durante dez anos de manejo (1993-2003).

Quadro 7 – Coeficientes, valores estimados, intervalos de confiança e probabilidades das funções de pedotransferência para as curvas de retenção da água do solo ajustada pelo modelo van Genuchten (1980) e da curva de resistência do solo à penetração, com as variáveis independentes (teor de carbono orgânico do solo, densidade do solo e tratamento), na camada de 5-10 cm de profundidade

Coeficientes	Valor	Intervalo de confiança	Probabilidade
Curva de retenção de água do solo ($r^2 = 0,94$; $p < 0,0001$): $\theta = \theta_r + \{(\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\Psi)^n]^{(1 - 1/n)}\}$			
α	0,0192	0,0178 a 0,0205	
θ_r	[$a_0 + (a_1 \times \text{carbono orgânico do solo}) + (a_2 \times \text{tratamento})$]		
a_0	0,0531	0,0290 a 0,0772	
a_1	0,0062	0,0021 a 0,0103	
a_2	-0,0090	-0,0147 a -0,0032	
n	[$n_0 + (n_1 \times \text{densidade do solo})$]		
n_0	10,4807	6,0376 a 14,9238	
n_1	-4,7405	-7,3357 a -2,1453	
Curva de resistência do solo à penetração ($r^2 = 0,87$; $p < 0,0001$) $\ln(\text{resistência do solo à penetração}) = c + d(\ln\theta) + e(\ln \text{densidade do solo})$			
c	[$c_0 + (c_1 \times \text{tratamento}) + (c_2 \times \text{carbono orgânico do solo})$]		
c_0	-5,0032		<0,0001
c_1	-1,0664		0,0200
c_2	0,0632		0,0009
d	-1,1211		<0,0001
e	[$e_0 + (e_1 \times \text{tratamento})$]		
e_0	5,8062		0,0039
e_1	1,9031		0,0345

θ (teor de água do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r (teor de água residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s (teor de água do solo saturado, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ψ (potencial mátrico, hPa); \ln (logaritmo natural na base $e = 2,7183$); e tratamento (variável indicadora): gramínea (-1), vegetação espontânea (0) e leguminosa (1).

Alternativamente, a partir das equações apresentadas no quadro 7, foram obtidas funções de pedotransferência simplificadas para as curvas de retenção de água do solo e de resistência do solo à penetração, dependentes apenas da determinação da densidade do solo e de θ (Figura 8).

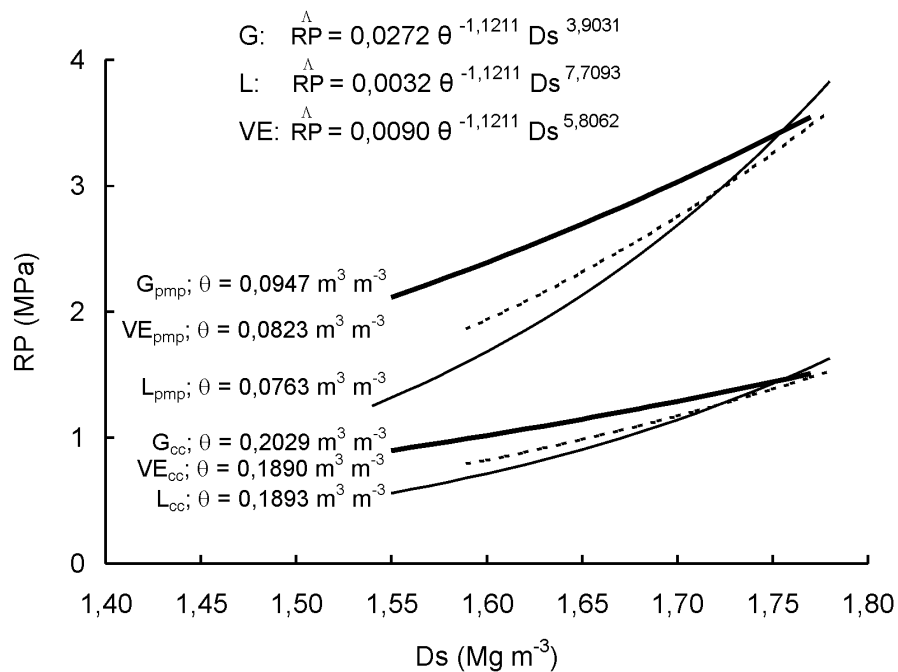
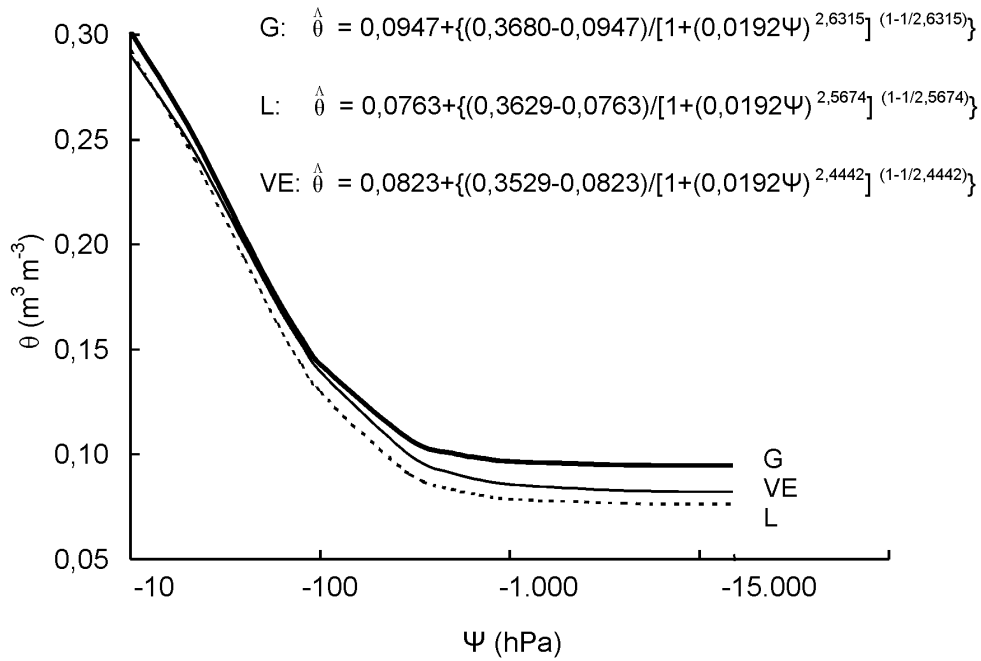


Figura 8 – Funções de pedotransferência simplificadas para as curvas de retenção de água do solo ajustadas pelo modelo van Genuchten (a); e de resistência do solo à penetração - RP (b), para os teores de água no solo nos potenciais mátricos capacidade de campo (cc = -80 hPa) e ponto de murcha permanente (pmp = -15.000 hPa), em função da densidade do solo (Ds), para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE).

Os coeficientes e (equação 4) da densidade do solo diferem entre os tratamentos para as curvas de resistência do solo à penetração (Figura 8). Para o potencial mátrico de -80 e -15.000 hPa, os tratamentos leguminosa e vegetação espontânea aumentaram a resistência do solo à penetração em relação ao tratamento gramínea, em consequência dos maiores valores de densidade do solo (Quadro 2). A identificação da capacidade do tratamento gramínea em mitigar as restrições físicas e hídricas deste solo, na camada de 0-15 cm de profundidade nas entrelinhas do pomar de laranjeiras, não justificaria a intervenção mecânica com aração profunda ou subsolagem, em acordo com Bordin et al. (2005) e Minatel et al. (2006). Essa constatação é reiterada pela eficiência do manejo do solo com gramínea em um pomar de macieira ter reduzido a resistência do solo à penetração na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (DRAGHI et al., 2005).

4.6 Água disponível e intervalo hídrico ótimo

Apesar das mudanças na estrutura do solo observadas na camada de 5-10 cm de profundidade (Quadros 2, 3, e 4), o teor de água correspondente à capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível não se diferenciaram ($p < 0,15$) entre os tratamentos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadro 8).

Os valores médios do intervalo hídrico ótimo diferenciaram-se ($p < 0,15$) entre os tratamentos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, decrescentes para os tratamentos gramínea, leguminosa e vegetação espontânea (Quadro 8). Em diferentes solos, os efeitos dos sistemas de manejo no intervalo hídrico ótimo foram verificados por inúmeros autores (SILVA et al., 1994, TORMENA et al., 1998; ZOU et al., 2000; SIEGEL-ISEEM et al., 2005; CAVALIERI et al., 2006; LEÃO et al., 2006), bem como entre as posições de amostragem de solo (BETZ et al., 1998).

O intervalo hídrico ótimo diferenciou ($p < 0,15$) os tratamentos na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadro 8). Tormena et al. (1998) também verificaram a melhor capacidade do intervalo hídrico em diferenciar sistemas de manejo de solo em comparação à água disponível.

Quadro 8 – Teor de água na capacidade de campo (potencial mátrico de -80 hPa), ponto de murcha permanente (potencial mátrico de -15.000 hPa), água disponível e intervalo hídrico ótimo, na camada de 5-10 cm de profundidade para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha

Trat.	Capacidade de campo	Ponto de murcha permanente	Água disponível	Intervalo hídrico ótimo
	(m ³ m ⁻³)			
Posição de amostragem de solo rodado da entrelinha				
G	0,24 a ⁽¹⁾	0,07 a	0,17 a	0,11 a
L	0,25 a	0,06 a	0,19 a	0,09 b
VE	0,24 a	0,05 a	0,19 a	0,07 c
CV ⁽²⁾	7,18	21,52	7,88	9,92
dms ⁽³⁾	0,03	0,03	0,03	0,02
p>F ⁽⁴⁾	0,66	0,35	0,33	0,01
Posição de amostragem de solo entrerrodado da entrelinha				
G	0,23 a	0,07 a	0,16 a	0,11 a
L	0,21 a	0,05 b	0,16 a	0,11 a
VE	0,24 a	0,06 ab	0,18 a	0,10 a
CV ⁽²⁾	12,18	11,32	14,03	19,14
dms ⁽³⁾	0,05	0,01	0,04	0,05
p>F ⁽⁴⁾	0,84	0,15	0,49	0,74

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade entre os tratamentos nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha. ⁽²⁾ Coeficiente de variação (%). ⁽³⁾ Diferença mínima significativa. ⁽⁴⁾ Probabilidade superior ao teste F.

A água disponível no solo pode ser observada na figura 9, correspondente ao conteúdo de água entre θ_{cc} e θ_{pmp} , para cada valor de densidade do solo. A redução do intervalo hídrico ótimo ocorreu devido à restrição imposta pela resistência do solo à penetração diferenciada entre os tratamentos (Figuras 8 e 9). A diferença entre a água disponível e o intervalo hídrico ótimo ocorreram a partir dos valores de densidade do solo de 1,59, 1,61 e 1,62 Mg m⁻³, respectivamente, para os tratamentos gramínea, vegetação espontânea e leguminosa (Figura 9), quando o θ_{rp} necessário para manter a resistência do solo à penetração em 2,2 MPa foi superior ao θ_{pmp} .

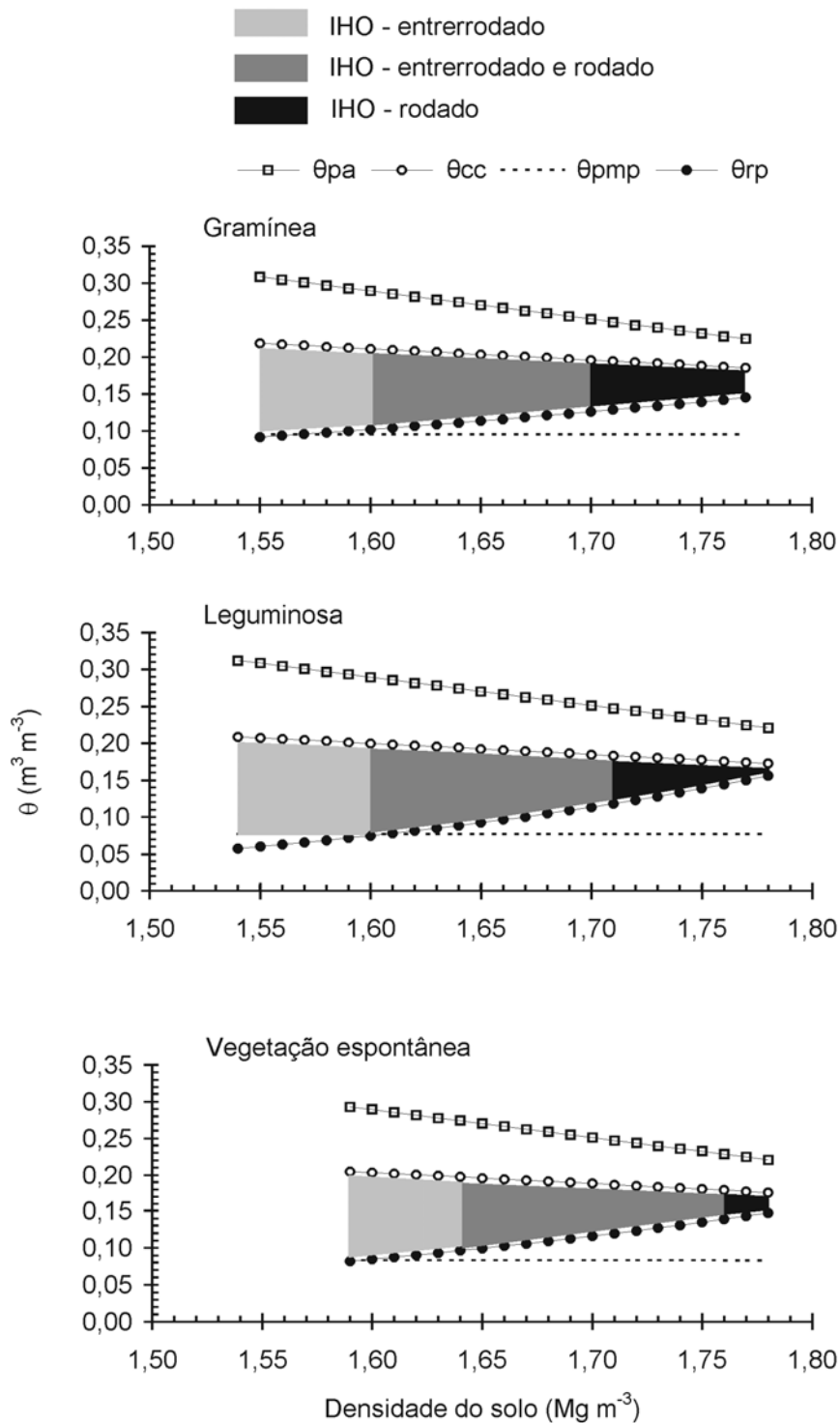


Figura 9 – Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos níveis críticos de capacidade de campo (θ_{cc} ou $\Psi = -80$ hPa), ponto de murcha permanente (θ_{pmp} ou $\Psi = -15.000$ hPa), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{pa}) e resistência do solo à penetração de $2,2 \text{ MPa}$ (θ_{rp}), na camada de 5-10 cm de profundidade para os tratamentos (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea) e posições de amostragem de solo (rodado e enterrado da entrelinha). As áreas hachuradas correspondem ao intervalo hídrico ótimo (IHO).

O maior teor de água no solo e a menor resistência do solo à penetração para a mesma densidade do solo (Figuras 8 e 9) convergiram para o maior ($p < 0,15$) intervalo hídrico ótimo médio no tratamento gramínea na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadro 8).

Considerando-se individualmente os valores de densidade do solo, não houve comprometimento da porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ necessária para as raízes das plantas (GRABLE; SIEMER, 1968), independentemente dos tratamentos e posições de amostragem de solo (Figura 9). Restrições da porosidade de aeração foram verificadas por Araujo et al. (2004) e Cavalieri et al. (2006) nesses solos quando submetidos ao cultivo, apresentando maiores teores de argila, respectivamente, de 230 e 310 g kg^{-1} .

O intervalo hídrico ótimo, ao diferenciar os efeitos dos sistemas de manejo de plantas de cobertura permanente nas entrelinhas de pomar de laranjeira “Pêra”, revela a importância da integração dos indicadores de qualidade física do solo, como a densidade do solo, a resistência do solo à penetração, o teor de água retido no potencial mátrico na capacidade de campo e do ponto de murcha permanente (Quadro 8; Figura 8), em concordância com Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998). Por esta razão, o intervalo hídrico ótimo tem-se tornado um dos indicadores mais utilizados nas avaliações de sistemas de manejo de solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; ZOU et al., 2000; SIEGEL-ISEEM et al., 2005; CAVALIERI et al., 2006; LEÃO et al., 2006).

4.7 Teor de água no solo

Os tratamentos influenciaram temporalmente os teores de água no perfil do solo, observando-se decréscimo deles entre agosto a novembro de 1999, caracterizando a estiagem (Figuras 2, 10 e 11), diferentemente de Pacheco et al. (1975) em sistemas de manejo sob um Latossolo Vermelho Amarelo, fase de Cerrado, em laranjeira “Baianinha”.

No primeiro período de avaliação (1999-2000), o solo mantido vegetado com o tratamento gramínea manteve maiores teores de água no solo ($p < 0,15$) nas entrelinhas (Figura 10).

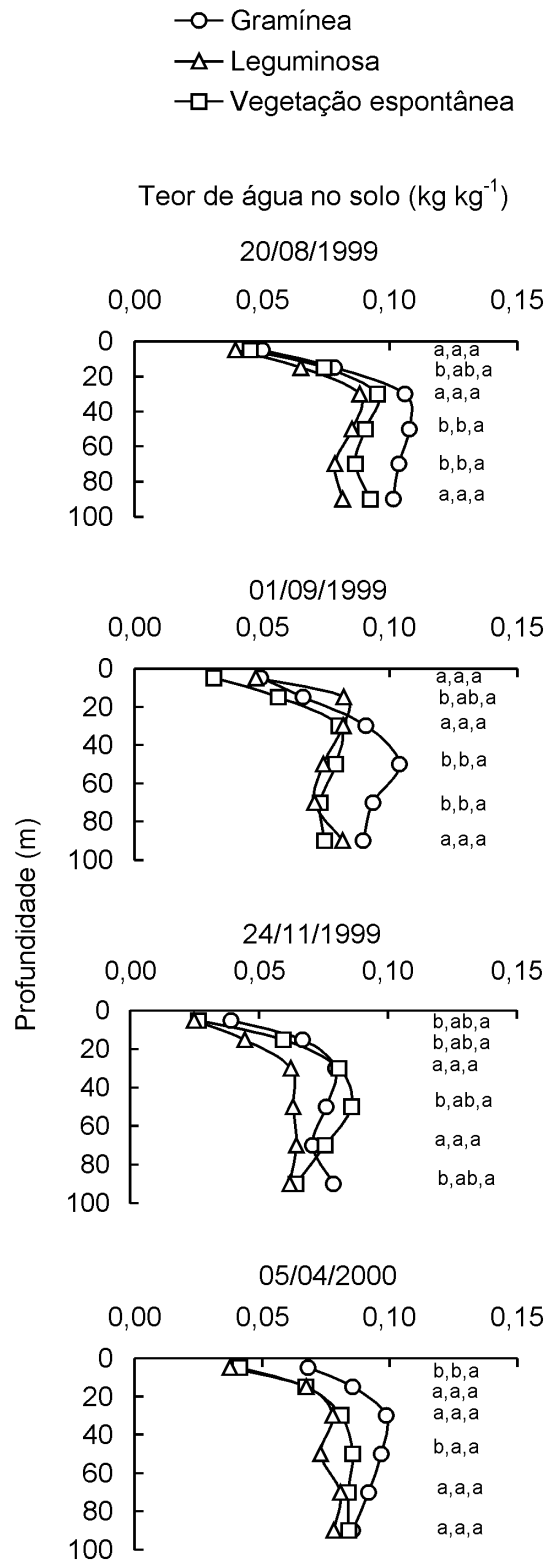


Figura 10 – Teor de água no solo na posição de amostragem de solo enterrorrodado da entrelinha de laranjeira “Pêra” em 1999-2000, para os tratamentos gramínea, leguminosa e vegetação espontânea. Médias seguidas da mesma letra, dentro da mesma camada de solo e para uma mesma data, não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade.

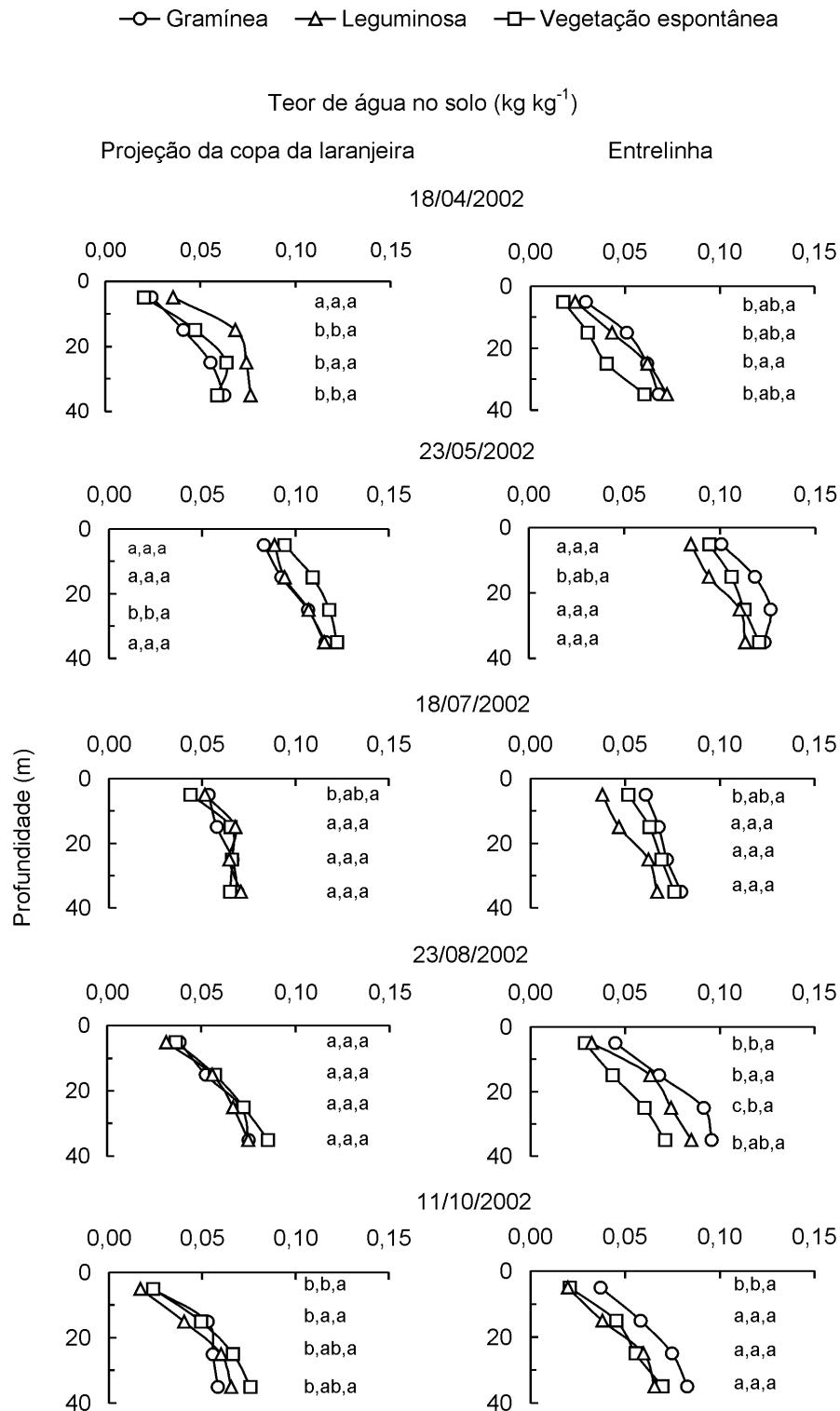


Figura 11 – Teor de água no solo na posição de amostragem de solo sob o limite externo da projeção da copa das laranjeiras e na entrelinha do pomar de laranjeira “Pêra” em 2002, para os tratamentos gramínea, leguminosa e vegetação espontânea. Médias seguidas da mesma letra, dentro da mesma camada de solo e para uma mesma data, não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade.

Em todas as datas avaliadas, os tratamentos leguminosa e vegetação espontânea apresentaram menores teores de água no solo em comparação ao tratamento gramínea, corroborando aos resultados de Perin et al. (2000) e Haynes (1980).

No segundo período de avaliação (2002), os teores de água no solo seguiram tendência similar do primeiro período de avaliação (1999-2000), decrescendo entre maio e outubro, constatando-se maiores teores no solo ($p < 0,15$) mantido com o tratamento gramínea nas entrelinhas (Figuras 10 e 11).

Contrariamente, na posição de amostragem de solo sob o limite externo das projeções das copas das laranjeiras, foi constatada alternância dos teores de água no solo sob os tratamentos leguminosa, vegetação espontânea e gramínea nas entrelinhas (Figura 11). Os distintos teores de água no solo sob o limite externo das projeções das copas das laranjeiras entre os tratamentos denotam possível competição pela água do solo por parte das laranjeiras, também quantificada por Pacheco et al. (1975) e cogitadas empiricamente por Wright et al. (2003) em limoeiro e laranjeira.

4.8 Variáveis fisiológicas das laranjeiras “Pêra”

A taxa de fotossíntese, a condutância estomática e o potencial da água nas folhas das laranjeiras decresceram de abril a novembro, nos dois períodos de avaliação, 1999-2000 e 2002 (Figura 12). Os valores médios da taxa de fotossíntese e da condutância estomática foram maiores durante o estágio fenológico de repouso das laranjeiras (abril e maio), comparado aos de pré e pós-florescimento (julho a novembro). À exceção do potencial da água nas folhas, a amplitude da taxa de fotossíntese e da condutância estomática contempla os valores mínimos e máximos obtidos por Medina et al. (1999) e Machado et al. (1999, 2002).

As menores precipitações, ocorridas em agosto e setembro de 1999, implicaram na estiagem que se prolongou até novembro de 1999 (Figura 2), caracterizando uma condição atípica aos dados climáticos do noroeste do Paraná (IAPAR, 2000), associadas a menor qualidade física do solo no tratamento leguminosa (Quadros 2, 3 e 4; Figura 8).

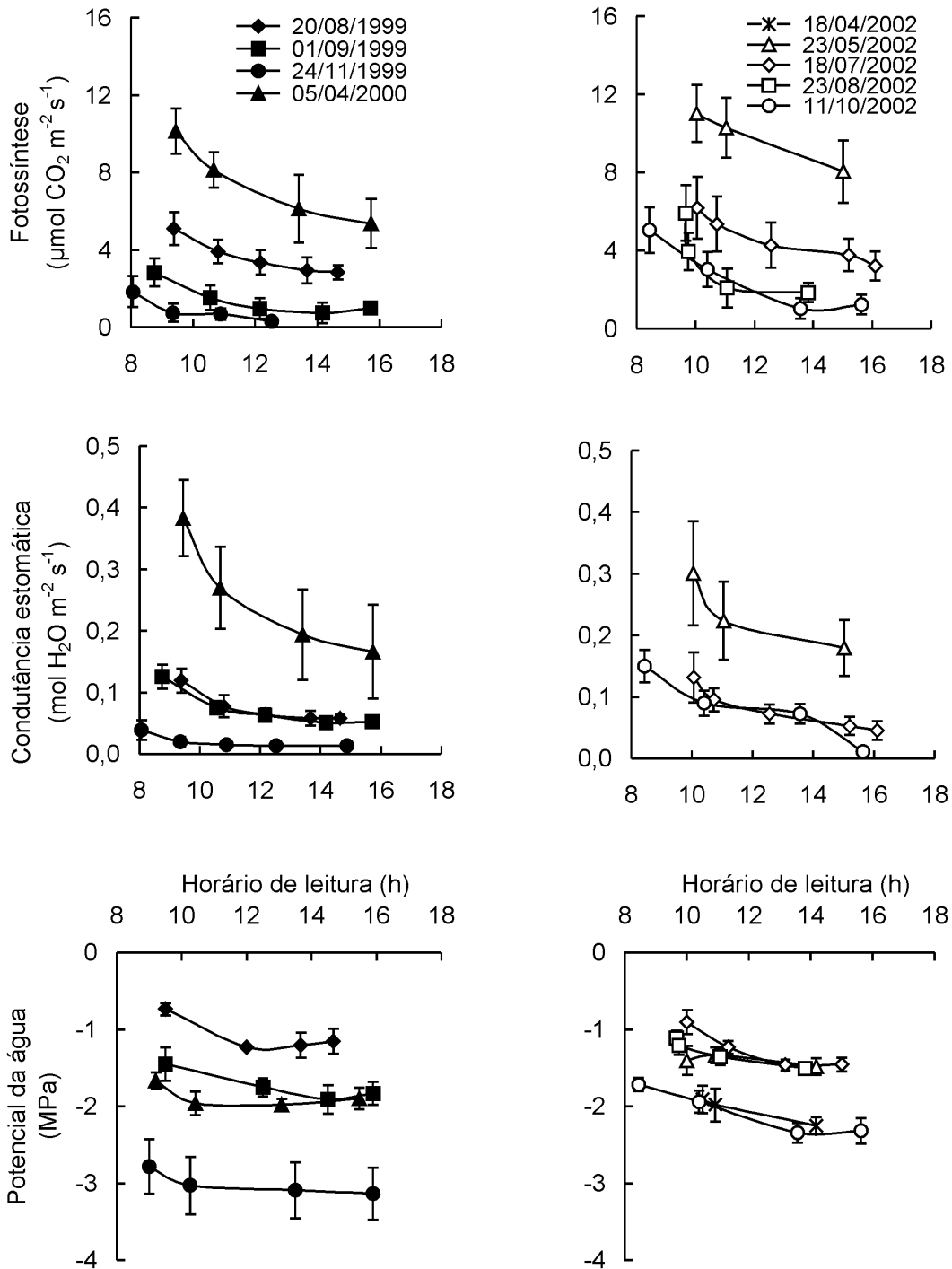


Figura 12 – Taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas das laranjeiras “Pêra” em nove avaliações (data e horário), durante os dois períodos de avaliação (1999-2000 e 2002). As barras verticais indicam o desvio padrão dos três tratamentos (gramínea, leguminosa e vegetação espontânea).

A redução dos teores de água no solo em 24/11/1999 (Figura 10) corresponde ao ponto de murcha permanente em todas as camadas do solo (Quadro 1; Figura 8), que está associado à redução do potencial da água nas folhas das laranjeiras ($p < 0,15$), com reflexos negativos na condutância estomática e taxa de fotossíntese (Quadro 9).

Quadro 9 – Taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas das laranjeiras “Pêra”, para os tratamentos gramínea (G), leguminosa (L) e vegetação espontânea (VE), determinados em diferentes horários em 24/11/1999

Trat.	8	10	12	14
	(h)			
Taxa de fotossíntese nas folhas das laranjeiras ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
G	1,80 a ⁽¹⁾	0,64 ab	0,84 a	0,31 a
L	1,42 a	0,35 b	0,36 b	0,38 a
VE	2,28 a	1,26 a	0,85 a	0,24 a
CV ⁽²⁾	33,27	43,66	16,11	62,79
dms ⁽³⁾	1,40	0,75	0,25	0,45
p>F ⁽⁴⁾	0,33	0,06	0,01	0,69
Condutância estomática nas folhas das laranjeiras ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
G	0,0487 a	0,0217 a	0,0144 b	0,0169 a
L	0,0334 a	0,0170 a	0,0122 b	0,0101 a
VE	0,0498 a	0,0273 a	0,0218 a	0,0174 a
CV ⁽²⁾	24,37	30,41	19,01	27,47
dms ⁽³⁾	0,0246	0,0154	0,0071	0,0094
p>F ⁽⁴⁾	0,23	0,28	0,04	0,16
Potencial de água nas folhas das laranjeiras (MPa)				
G	-2,70 a	-2,89 a	-2,86 a	-3,01 a
L	-3,18 b	-3,48 b	-3,55 b	-3,55 b
VE	-2,47 a	-2,72 a	-2,87 a	-2,86 a
CV ⁽²⁾	6,51	5,90	4,59	5,01
dms ⁽³⁾	0,3142	0,341	0,33	0,36
p>F ⁽⁴⁾	0,02	0,01	0,01	0,01

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 15 % de probabilidade, entre os tratamentos. ⁽²⁾ Coeficiente de variação (%). ⁽³⁾ Diferença mínima significativa. ⁽⁴⁾ Probabilidade superior ao teste F.

O pré e pós-florescimento (agosto-outubro) correspondem aos estádios fenológicos e hídrico mais crítico para os citros no noroeste do Paraná, em consonância com Calheiros et al. (1992). Nesses estádios, constatou-se, nas entrelinhas, maior teor de água no solo sob o tratamento gramínea em comparação aos tratamentos leguminosa e vegetação espontânea (Figuras 10 e 11). As curvas de retenção de água indicam que o teor de água no solo no tratamento gramínea encontra-se dentro do intervalo de água disponível, entre o potencial mátrico de -80 e -15.000 hPa (Figuras 5 e 11; Quadro 1).

Os resultados deste trabalho contrariam as informações de que a manutenção da vegetação gramínea nas entrelinhas competiria pela água do solo com as laranjeiras (PACHECO et al., 1975; WRIGHT et al., 2003). A constatação das melhores relações hídricas do solo no tratamento gramínea das laranjeiras “Pêra” corroboraram a melhor qualidade física e hídrica do solo e fisiologia das laranjeiras “Pêra” (Quadros 2, 7, 8 e 9; Figuras 8, 9, 10 e 11).

4.9 Relações solo-planta

No primeiro período de avaliação (1999-2000), a taxa de fotossíntese e a condutância estomática nas folhas das laranjeiras apresentaram baixos coeficientes de determinação ($0,45 > r^2 < 0,58$) ao ajuste do modelo de trilha para os três tratamentos de plantas de cobertura permanente na entrelinha (Quadros 10, 11 e 12). Foram verificados maiores coeficientes de determinação para o potencial da água nas folhas das laranjeiras (0,67-0,92) para os três tratamentos no primeiro período de avaliação (Quadros 10, 11 e 12).

A condutância estomática nas folhas de laranjeira e o teor de água nas camadas de 0-10 e 60-80 cm de profundidade, respectivamente, para os tratamentos vegetação espontânea e a leguminosa, comprovaram a relação de causa e efeito entre teor de água e o comportamento fisiológico das laranjeiras (Quadros 11 e 12).

O potencial da água nas folhas das laranjeiras foi a variável fisiológica que apresentou maior dependência do teor de água do solo no primeiro período de avaliação, considerando-se os efeitos diretos decorrentes do tratamento gramínea nas camadas de 0-10 e 20-40 cm de profundidade (Quadro 10).

Quadro 10 – Coeficientes de correlações simples (Pearson) entre as variáveis dependentes (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas de laranjeira “Pêra”) e a variável independente teor de água no solo ^(a) e os coeficientes de correlações do efeito direto do teor de água no solo sobre as variáveis dependentes da análise de trilha ^(b), em camadas de solo nas posições de amostragem de solo centro da entrelinha (PCE) e sob limite externo da projeção da copa das laranjeiras (PLP), no tratamento gramínea, para o primeiro (1999-2000) e segundo (2002) período de avaliação

Camada e posição de amostragem de solo	Taxa de fotossíntese		Condutância estomática		Potencial da água	
	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$
Primeiro período de avaliação (1999-2000)						
0-10 cm (PCE)	0,60 **	0,26	0,61 **	0,16	0,27 ns	0,57
10-20 cm (PCE)	0,50 *	0,08	0,52 *	0,16	-0,03 ns	-1,03
20-40 cm (PCE)	0,55 *	0,28	0,57 *	0,31	0,44 ns	0,59
40-60 cm (PCE)	0,21 ns	-0,21	0,20 ns	-0,34	0,64 **	0,50
60-80 cm (PCE)	0,39 ns	0,51	0,40 ns	0,72	0,69 **	-0,01
80-100 cm (PCE)	0,14 ns	-0,37	0,12 ns	-0,49	0,48 ns	-0,17
r^2 ⁽¹⁾		0,45		0,52		0,67
Valor de K ⁽²⁾		0,05		0,02		0,04
Segundo período de avaliação (2002)						
0-10 cm (PCE)	0,82 ***	-0,05	0,77 **	-0,26	0,62 *	0,61
0-10 cm (PLP)	0,92 ***	0,46	0,84 ***	0,19	0,74 **	0,90
10-20 cm (PCE)	0,72 **	-0,20	0,72 **	-0,17	0,41 ns	-0,22
10-20 cm (PLP)	0,75 **	-0,09	0,81 ***	0,17	0,38 ns	-0,51
20-30 cm (PCE)	0,79 **	-0,06	0,82 ***	0,11	0,29 ns	-0,54
20-30 cm (PLP)	0,92 ***	0,29	0,93 ***	0,42	0,52 ns	0,09
30-40 cm (PCE)	0,87 ***	0,23	0,88 ***	0,18	0,28 ns	-0,30
30-40 cm (PLP)	0,95 ***	0,35	0,92 ***	0,32	0,50 ns	0,42
r^2 ⁽¹⁾		0,93		0,91		0,78
Valor de K ⁽²⁾		0,08		0,07		0,07

⁽¹⁾ coeficiente de determinação do modelo causal de trilha. ⁽²⁾ Valor adicionado na diagonal da matriz para reduzir a variância e atender o pressuposto de baixa multicolinearidade com fator de inflação de variância (VIF<10). ns (p>0,10), * (p<0,10), ** (p<0,05) e *** (p<0,01).

Quadro 11 – Coeficientes de correlações simples (Pearson) entre as variáveis dependentes (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas de laranjeira “Pêra”) e a variável independente teor de água no solo ^(a) e os coeficientes de correlações do efeito direto do teor de água no solo sobre as variáveis dependentes da análise de trilha ^(b), em camadas de solo nas posições de amostragem de solo centro da entrelinha (PCE) e sob o limite externo da projeção da copa das laranjeiras (PLP), no tratamento leguminosa, para o primeiro (1999-2000) e segundo (2002) período de avaliação

Camada e posição de amostragem de solo	Taxa de fotossíntese		Condutância estomática		Potencial da água	
	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$
Primeiro período de avaliação (1999-2000)						
0-10 cm (PCE)	0,15 ns	0,07	0,12 ns	0,11	0,88 ***	0,55
10-20 cm (PCE)	0,16 ns	0,01	0,10 ns	-0,08	0,88 ***	0,36
20-40 cm (PCE)	0,25 ns	0,50	0,21 ns	0,46	0,71 **	0,31
40-60 cm (PCE)	0,27 ns	-0,05	0,24 ns	-0,04	0,63 **	-0,21
60-80 cm (PCE)	0,64 **	1,00	0,66 **	1,00	0,39 ns	0,41
80-100 cm (PCE)	0,29 ns	-0,66	0,27 ns	-0,63	0,72 ***	-0,18
r^2 ⁽¹⁾		0,57		0,58		0,92
Valor de K ⁽²⁾		0,09		0,10		—
Segundo período de avaliação (2002)						
0-10 cm (PCE)	0,86 ***	-0,08	0,75 **	-0,24	0,77 **	0,54
0-10 cm (PLP)	0,91 ***	0,16	0,79 **	-0,02	0,76 **	0,42
10-20 cm (PCE)	0,89 ***	0,04	0,80 **	-0,11	0,73 **	0,34
10-20 cm (PLP)	0,93 ***	0,32	0,83 ***	0,28	0,71 **	0,31
20-30 cm (PCE)	0,82 ***	0,00	0,80 ***	-0,05	0,51 ns	0,05
20-30 cm (PLP)	0,95 ***	0,34	0,95 ***	0,51	0,43 ns	-0,42
30-40 cm (PCE)	0,82 ***	-0,15	0,80 ***	-0,02	0,54 ns	-0,03
30-40 cm (PLP)	0,96 ***	-0,33	0,95 ***	0,54	0,43 ns	-0,54
r^2 ⁽¹⁾		0,93		0,90		0,79
Valor de K ⁽²⁾		0,10		0,08		0,10

⁽¹⁾ coeficiente de determinação do modelo causal de trilha. ⁽²⁾ Valor adicionado na diagonal da matriz para reduzir a variância e atender o pressuposto de baixa multicolinearidade com fator de inflação de variância (VIF<10). ns (p>0,10), * (p<0,10), ** (p<0,05) e *** (p<0,01).

Quadro 12 – Coeficientes de correlações simples (Pearson) entre as variáveis dependentes (taxa de fotossíntese, condutância estomática e potencial da água nas folhas de laranjeira “Pêra”) e a variável independente teor de água no solo ^(a) e os coeficientes de correlações do efeito direto do teor de água no solo sobre as variáveis dependentes da análise de trilha ^(b), em camadas de solo nas posições de amostragem de solo centro da entrelinha (PCE) e sob o limite externo da projeção da copa das laranjeiras (PLP), no tratamento vegetação espontânea, para o primeiro (1999-2000) e segundo (2002) período de avaliação

Camada e posição de amostragem de solo	Taxa de fotossíntese		Condutância estomática		Potencial da água	
	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$	$r^{(a)}$	$r^{(b)}$
Primeiro período de avaliação (1999-2000)						
0-10 cm (PCE)	0,48 ns	0,49	0,51 *	0,55	0,08 ns	0,47
10-20 cm (PCE)	0,35 ns	0,39	0,35 ns	0,36	-0,11 ns	-0,15
20-40 cm (PCE)	0,03 ns	-0,42	0,06 ns	-0,35	-0,04 ns	0,43
40-60 cm (PCE)	0,10 ns	-0,55	0,12 ns	-0,61	-0,41 ns	-0,79
60-80 cm (PCE)	0,39 ns	0,43	0,40 ns	0,47	-0,23 ns	-0,31
80-100 cm (PCE)	0,48 ns	0,14	0,47 ns	0,08	0,20 ns	0,37
r^2 ⁽¹⁾		0,54		0,53		0,51
Valor de K ⁽²⁾		0,05		0,05		0,05
Segundo período de avaliação (2002)						
0-10 cm (PCE)	0,95 ***	0,15	0,90 ***	0,01	0,55 ns	0,47
0-10 cm (PLP)	0,97 ***	0,28	0,89 ***	0,02	0,58 ns	0,52
10-20 cm (PCE)	0,91 ***	-0,01	0,93 ***	0,06	0,37 ns	-0,28
10-20 cm (PLP)	0,96 ***	0,35	0,89 ***	0,18	0,55 ns	0,40
20-30 cm (PCE)	0,93 ***	0,12	0,94 ***	0,13	0,44 ns	0,28
20-30 cm (PLP)	0,91 ***	0,11	0,96 ***	0,24	0,33 ns	0,16
30-40 cm (PCE)	0,85 ***	0,11	0,92 ***	0,19	0,27 ns	-0,21
30-40 cm (PLP)	0,80 ***	-0,15	0,91 ***	0,14	0,18 ns	-0,62
r^2 ⁽¹⁾		0,92		0,90		0,58
Valor de K ⁽²⁾		0,09		0,09		0,09

⁽¹⁾ coeficiente de determinação do modelo causal de trilha. ⁽²⁾ Valor adicionado na diagonal da matriz para reduzir a variância e atender o pressuposto de baixa multicolinearidade com fator de inflação de variância (VIF<10). ns (p>0,10), * (p<0,10), ** (p<0,05) e *** (p<0,01).

No segundo período de avaliação (2002), verificaram-se os maiores valores dos coeficientes de determinação para o modelo definido pela análise de trilha ($0,78 > r^2 < 0,93$), à exceção do potencial da água nas folhas das laranjeiras no tratamento vegetação espontânea (Quadros 10, 11 e 12).

A condutância estomática nas folhas de laranjeiras sob o tratamento leguminosa apresentou relação de causa e efeito com o teor de água nas camadas de 20-30 e 30-40 cm de profundidade no limite da projeção da copa das laranjeiras (Quadro 11). A resposta fisiológica das laranjeiras aos teores de água na subsuperfície do solo se deve possivelmente ao aprofundamento do sistema radicular das laranjeiras com a leguminosa *Arachis prostrata* Bong ex. Benth nas entrelinhas do pomar (NEVES et al., 1998).

A dependência da condutância estomática nas folhas das laranjeiras aos teores de água do solo na camada de 30-80 cm de profundidade, nos dois períodos de avaliação para o tratamento leguminosa (Quadro 11), confirmou que a abertura e fechamento dos estômatos nas folhas das laranjeiras são dependentes da atividade do sistema radicular nos horizontes Bt e Bw com maiores teores de argila (Quadro 1) e maiores teores de água em relação à camada superficial arenosa (Figuras 5, 10 e 11).

O potencial da água nas folhas das laranjeiras apresentou relação de causa e efeito com o teor de água na camada de 0-10 cm de profundidade nos dois períodos de avaliação, na posição de amostragem de solo centro da entrelinha do tratamento leguminosa, centro da entrelinha e limite externo da projeção da copa das laranjeiras no tratamento gramínea (Quadros 10 e 11). No tratamento vegetação espontânea, também houve efeito direto do potencial da água nas folhas das laranjeiras sobre o teor de água do solo na camada de 0-10 cm de profundidade, no limite externo da projeção da copa das laranjeiras (Quadro 12). Confrontando os coeficientes de correlações (a e b; Quadros 10, 11 e 12) do primeiro e do segundo período de avaliação (Quadros 11, 12 e 13), confirma-se a dependência hídrica das laranjeiras à camada superficial com os tratamentos gramínea e leguminosa, associada à maior produção de massa de raízes das laranjeiras (RÊGO, 1997), para a mesma combinação de variedades copa e porta-enxerto e solo similar.

A taxa de fotossíntese nas folhas de laranjeiras foi a variável fisiológica que apresentou a menor relação de causa e efeito com o teor de água no solo,

à exceção da camada de 60-80 cm de profundidade no tratamento leguminosa (Quadro 11), coincidindo com o déficit hídrico ocorrido em 1999 (Figuras 2 e 12; Quadro 8). Por sua vez, no tratamento gramínea sob a projeção da copa das laranjeiras apresentaram correlações simples de Pearson ($p < 0,10$) entre estas variáveis na profundidade de 0-40 cm de profundidade nos dois períodos de avaliação (Quadro 10). O maior teor de água no solo nas entrelinhas no tratamento gramínea em comparação aos tratamentos leguminosa e vegetação espontânea (Figuras 10 e 11) não comprometeu a produção de laranja nesses tratamentos (FIDALSKI et al., 2006a), os quais contestam os trabalhos que mostraram a redução da produção de laranja por causa da manutenção de plantas de cobertura permanente nas entrelinhas de citros (RODRIGUEZ et al., 1964, DORNELLES, 1971; PACHECO et al., 1975; WRIGHT et al., 2003).

As folhas das laranjeiras apresentaram relações de causa e efeito entre o potencial da água nas folhas com o teor de água do solo no tratamento gramínea, nas posições sob o limite da projeção da copa das laranjeiras e centro da entrelinha, em solo pertencente à classe textural areia na camada de 0-10 cm de profundidade (Quadros 1 e 10). A constatação dessa dependência das laranjeiras as posições rodado e entrerrodado se deve às melhorias da qualidade física e hídrica do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadros 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9; Figuras 8, 9, 10 e 11).

A utilização do intervalo hídrico ótimo (Figura 9; Quadro 8) juntamente com o monitoramento da água no solo foi considerada por Bengough et al. (2006) como metodologia ideal para determinar o estresse físico do solo durante o desenvolvimento das plantas. As análises de trilha, os intervalos hídricos ótimos, os teores de água no solo e as avaliações fisiológicas (Figuras 9, 10, 11 e 12; Quadros 8, 9, 10, 11 e 12) corroboram as afirmações de Bengough et al. (2006), quanto à integração do intervalo hídrico ótimo com o monitoramento da água no solo, principalmente durante o período compreendido entre agosto a outubro, no qual os citros estão sujeitos à maior deficiência hídrica no noroeste do Paraná (CALHEIROS et al., 1992), durante os estádios fenológicos de florescimento, fixação e desenvolvimento de frutos de laranja.

A resposta fisiológica das laranjeiras ao solo sob o limite externo da projeção da copa das laranjeiras (Quadros 10, 11 e 12) se deve a maior

distribuição efetiva do sistema radicular dos citros (RÊGO, 1997; NEVES et al., 2004), associadas ao efeito remanescente das propriedades físicas do solo sob o manejo das plantas de cobertura permanente durante a fase de formação do pomar, mediante o desenvolvimento e avanço do limite externo da projeção da copa das laranjeiras em direção ao centro da entrelinha.

O sinergismo entre a compactação do solo e o aumento da fricção entre suas partículas (VEPRASKAS, 1984) acentua a resistência do solo à penetração (WEAICH et al., 1992; SANTANA et al., 2006), influenciando o comportamento fisiológico diferenciado das laranjeiras mantidas com gramínea nas entrelinhas (potencial da água nas folhas das laranjeiras na camada de 0-10 cm de profundidade) e leguminosa (condutância estomática e taxa de fotossíntese com teor de água na camada de 30-80 cm de profundidade), observado nos quadros 9, 10 e 11 e nas figuras 8, 10 e 11. Nesse contexto, somente o intervalo hídrico ótimo possibilitou a compreensão das inter-relações entre os indicadores de qualidade física do solo (densidade do solo, resistência do solo à penetração e teores de água no solo), que associados às avaliações fisiológicas das laranjeiras (Quadros 6, 8, 9, 10 e 11; Figura 9), contribuíram para a avaliação biofísica do solo (BENGOUGH et al., 1997; REICHERT et al., 2003).

As respostas fisiológicas das laranjeiras ao manejo da cobertura permanente nas entrelinhas permitiram distinguir os tratamentos gramínea e leguminosa. A laranjeira “Pêra” foi dependente das alterações físicas e hídricas do solo na camada superficial do solo. Por sua vez, o comprometimento da qualidade física e hídrica do solo, na camada superficial sob o tratamento leguminosa, potencializou a utilização da água armazenada na camada subsuperficial do solo nos horizontes Bt e Bw com maiores teores de argila (Quadro 1; Figuras 5, 10 e 11), motivo pelo qual as laranjeiras sustentaram a produção de 130 kg de laranja por planta em 2003, nos tratamentos gramínea e leguminosa (FIDALSKI et al., 2006a). Os resultados do presente estudo não devem ser extrapolados para outras classes de solos como o Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006), sem gradiente textural, em acordo com o conceito de qualidade do solo (KARLEN et al., 1997).

4.5 Considerações gerais

Caso a avaliação da qualidade do solo tivesse sido realizada somente na posição de amostragem de solo enterrado da entrelinha, procedimento predominante na avaliação de sistemas de manejo de solo em pomares teria identificado o efeito ($p < 0,15$) dos sistemas de manejo de solo das plantas de cobertura permanente somente sobre o ponto de murcha permanente e a taxa de estratificação de carbono orgânico do solo (Quadros 6 e 8).

A amostragem de solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha permitiu caracterizar a degradação da estrutura física do solo em ordem crescente dos tratamentos gramínea, leguminosa e vegetação espontânea, por meio do intervalo hídrico ótimo e do teor de água no solo (Quadro 8; Figuras 9, 10 e 11).

Outros indicadores de qualidade do solo mostraram-se indiferentes entre os sistemas de manejo de plantas permanentes na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, entre os tratamentos gramínea e leguminosa, tais como a capacidade de aeração total e da matriz do solo, índice S e a taxa de estratificação de carbono orgânico (Quadros 3, 4, 5 e 6). Considerando-se todos esses indicadores de qualidade física do solo, os tratamentos gramínea e leguminosa poderiam ser considerados semelhantes, os quais apresentariam qualidade física do solo superior à vegetação espontânea. Porém, a constatação de que o manejo da leguminosa na entrelinha do pomar pode causar estresse hídrico às laranjeiras (Quadro 9), acentuada pela resistência do solo à penetração que reduz o intervalo hídrico ótimo (Figura 9), possibilitou distinguir esses dois tratamentos, classificando-os em ordem decrescente de qualidade física do solo: gramínea, leguminosa e vegetação espontânea.

A manutenção da cobertura permanente do solo proporcionado pelo tratamento gramínea nas entrelinhas das laranjeiras melhorou a qualidade física do solo (Quadros 2, 3, 4, 6, 7 e 8; Figuras 8 e 9). Por esse motivo, não haveria necessidade do revolvimento destes solos para a incorporação do calcário, diante da eficiência da calagem superficial nas entrelinhas manejadas com gramínea, atestada por Fidalski e Tormena (2005). Ao mesmo tempo, é descartado o revolvimento destes solos para reduzir a compactação na posição

de amostragem de solo rodado da entrelinha, recomendado em outros agroecossistemas cítricos (ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995; SOUZA et al., 2004; MINATEL et al., 2006), dispensável para a citricultura no norte (BORDIN et al., 2005) e noroeste do Paraná. Estas conclusões decorrem da constatação da melhoria da qualidade física na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha com cobertura proporcionada pelo tratamento gramínea, que assegurou menor densidade do solo, distribuição de poros mais adequada, maior teor de carbono, maior retenção de água e menor resistência do solo à penetração (Quadros 2, 3, 4, 6, 7 e 8; Figuras 8, 9, 10 e 11).

O efeito mitigador da presença de plantas de cobertura permanente na entrelinha do pomar de laranja “Pêra”, que proporciona melhor qualidade física e hídrica do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha (Quadros 2, 3, 4, 6, 7 e 8; Figuras 8, 9, 10 e 11), é atribuído à maior produção de biomassa de raízes no tratamento gramínea comparado aos tratamentos leguminosa e vegetação espontânea (DOSS et al., 1960; ESPINDOLA et al., 1998; PERIN et al., 2000, 2002), que conferem maior resistência à deformação e a compactação do solo (HAMBLIN; DAVIES, 1977; SOANE, 1990) e pelo fato da gramínea *Paspalum notatum* concentrar 50 % de suas raízes na camada de 0-8 cm de profundidade (DOSS et al., 1960).

Os maiores valores do intervalo hídrico ótimo (Figura 9; Quadro 8) observado no tratamento gramínea na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, distante 65 cm do limite da projeção da copa das laranjeiras (Figura 4), comparados aos tratamentos leguminosa e vegetação espontânea, vêm confirmar que o intervalo hídrico ótimo é um indicador que expressa o ambiente físico do solo em relação aos processos fisiológicos das laranjeiras, contribuindo na área da biofísica do solo (REICHERT et al., 2003).

Os resultados sugerem que o sistema de manejo de cobertura do solo da entrelinha com o tratamento gramínea condiciona maior capacidade de suporte ao tráfego de máquinas, conforme Soane (1990), que permite melhores condições físicas do solo para o crescimento e atividade das raízes das laranjeiras. O presente trabalho confirmou a hipótese de que o tratamento gramínea (*Paspalum notatum*) melhorou a qualidade física do solo e atenuou a compactação do solo na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha sem comprometer as relações hídricas e fisiológicas das laranjeiras.

5 CONCLUSÕES

Os indicadores de qualidade física do solo, água disponível, índice S e capacidade de aeração total e de armazenamento de água no solo não permitiram diferenciar os sistemas de manejo do solo nas posições de amostragem de solo rodado e entrerrodado da entrelinha.

Os indicadores de capacidade de aeração total do solo e taxa de estratificação de carbono orgânico do solo diferenciaram os tratamentos gramínea e leguminosa do tratamento vegetação espontânea, nas posições rodado e entrerrodado da entrelinha.

Os indicadores densidade do solo, porosidade total e intervalo hídrico ótimo diferenciaram os três sistemas de manejo de plantas de cobertura permanente na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha.

O rodado da entrelinha constitui a posição de amostragem de solo da entrelinha mais importante para identificar os efeitos dos sistemas de manejo por meio de indicadores de qualidade física e hídrica do solo em citros.

As variáveis fisiológicas caracterizam que as laranjeiras foram dependentes da água do horizonte A de textura arenosa sob o manejo da gramínea e do perfil do solo textura média dos horizontes Bt e Bw sob leguminosa.

A hipótese deste trabalho foi confirmada: o manejo das entrelinhas com o tratamento gramínea reduziu a compactação do solo e melhorou a sua qualidade física na posição de amostragem de solo rodado da entrelinha, seguido do manejo com a leguminosa, e, por sua vez, a vegetação espontânea.

6 REFERÊNCIAS

- ABERCROMBIE, R. A.; PLESSIS, S. F. du. The effect of alleviating soil compaction on yield and fruit size in an established Navel orange orchard. **J. S. Afr. Soc. Hort. Sci.**, Pietermaritzburg, v. 5, no. 2, p. 85-89, 1995.
- ARAUJO, M. A. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- ARRUDA, F. B. et al. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal, FUNEP, 1989.
- BENGOUGH, A. G. et al. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant Soil**, Netherlands, v. 189, no. 1, p. 155-164, 1997.
- BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **J. Exp. Bot.**, Oxford, v. 57, no. 2, p. 437-447, 2006.
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **J. Soil Sci.**, Oxford, v. 41, no. 3, p. 341-358, 1990.
- BERG, M. van den et al. Pedotransfer functions for the estimation of moisture characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, no. 3/4, p. 161-180, 1997.
- BERNOUX, M. et al. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 62, no. 3, p. 743-749, 1998.
- BETZ, C. L. et al. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 62, no. 5, p. 1384-1393, 1998.
- BORDIN, I. et al. Sistema radicular de plantas cítricas e atributos físicos do solo em um Latossolo argiloso submetido à escarificação. **Ci. Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 820-825, 2005.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Adv. Soil Sci.**, New York: Springer-Verlag, v. 9, p. 177-213, 1989.

- BREJDA, J. J. et al. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 64, no. 6, p. 2115-2124, 2000.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 33, no. 2, p. 519-524, 1990.
- BUTLER, J. D. Grass interplanting in horticulture cropping systems. **HortScience**, Alexandria, v. 21, no. 3, p. 394-397, 1986.
- CAETANO, A. A. Tratos culturais. In: RODRIGUEZ, O.; VIÉGAS, C. P. (Coord.). **Citricultura Brasileira**, São Paulo: Fundação Cargill, 1980. p. 429-444.
- CALHEIROS, R. de O. et al. Viabilidade técnica da irrigação em citros no norte e noroeste do Paraná. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, v. 27, n. 6, p. 963-973, 1992.
- CALZAVARA, S. A. et al. Número de frutos de laranja em função da frequência de irrigação complementar. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 22, n. 4, p. 1125-1128, 2000.
- CAMP Jr., C. R.; LUND, Z. F. Effect of mechanical impedance on cotton root growth. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 11, p. 168-190, 1968.
- CARDOSO, A. et al. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no noroeste do Paraná. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, v. 27, n. 2, p. 349-353, 1992.
- CARTER, M. R. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. **Agron. J.**, Madison, v. 94, no. 1, p. 38-47, 2002.
- CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.
- CHARTZOULAKIS, K. et al. Water use, growth, yield and fruit quality of "Bonanza" oranges under different soil water regimes. **Adv. Hort. Sci.**, Firenze, v. 13, no. 1, p. 6-11, 1999.
- CHRISTENSEN, B. T.; JOHNSTON A. E. Soil organic matter and soil quality: Lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. In: GREGORICH E. G.; CARTER M. R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier, 1997. p.399-430.
- CINTRA, F.L.D. et al. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro, **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 23-28, 2000.

CINTRA, F. L. D. et al. Caracterização física do solo submetido a práticas de manejo em pomar de laranja “Baianinha”. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, v. 18, n. 2, p. 173-179, 1983.

COELHO, Y. da S. **Práticas culturais em pomar de citros**. Cruz das Almas: EMBRAPA-CNPMF, 1992. 25 p. (EMBRAPA-CNPMF. Circular Técnica, 16).

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 777-788. 2005.

CORÁ, J. E. et al. Manejo do solo sob citros. In: MATTOS JÚNIOR, D. de et al. (Org.). **Citros**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas e Fapesp, v. 1, cap. 12, p. 347-368, 2005.

CRUZ, A. C. R. et al. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 1-10, 2005.

CRUZ, C. D. et al. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, MG: Ed. da Universidade Federal de Viçosa, 2004.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: Ed. da Universidade Federal de Viçosa, v. 2, 2003.

CRUZ, C.D. **Programa GENES**: versão windows. Viçosa, MG: Ed. da Universidade Federal de Viçosa, 2001. (Versão 2005.0.0).

CRUZ, R. de la et al. The contribution of *Arachis pinto* as a ground cover in some farming systems of tropical America. In: KERRIDGE, P.C.; HARDY, B. **Biology and agronomy of forage Arachis**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1994. cap. 9, p.102-108. (CIAT publication; 240).

DANE; J. H; HOPMANS, J. W. Pressure plate extractor. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4, p. 688-690.

DECHEN, S. C. F. et al. Gramíneas e leguminosas e seus restos culturais no controle da erosão em Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, SP, v. 5, n. 2, p. 133-137, 1981.

DENNIS, F. G.; HULL Jr., J. Deciduous tree fruit. **HortScience**, Alexandria, v. 38, no. 5, p. 901-910, 2003.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, no. 3/4, p. 201-214, 2004.

- DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A. **Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences**. In: Land Degradation & Development, Wiley InterScience, 2007. 13p.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1994. cap. 1, p. 3-21. (SSSA Special Publication, 35).
- DORNELLES, C. M. M. Manejo de solos em pomares de laranjeiras no Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 91-98, 1971.
- DOSS, B. D. et al. Effect of soil moisture regime on root distribution of warm season forage species. **Agron. J.**, Madison, v. 52, no. 10, p.569-572, 1960.
- DRAGHI, L. et al. Resistência específica do solo de um pomar frutícola relacionada ao manejo entrelinhas e intensidade de tráfego. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 385-394, 2005.
- EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina: Embrapa-SNLCS/Sudesul/Iapar, 1984. v. 1/2. (Embrapa-SNLCS. Boletim de Pesquisa, 27; IAPAR. Boletim Técnico, 16).
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- EMERSON, W. W.; McGARRY, D. Organic carbon and soil porosity. **Aus. J. Soil Res.** Collingwood, v. 41, no. 1, p. 107-118, 2003.
- ESPINDOLA, J. A. A. et al. Influência da adubação verde na colonização micorrízica e na produção da batata-doce. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, v. 33, n. 3, p. 339-347, 1998.
- FIDALSKI, J. Diagnóstico de manejo e conservação do solo e da água na região noroeste do Paraná. **R. Unimar**, Maringá, v. 19, n. 3, p. 845-851, 1997a.
- FIDALSKI, J. Fertilidade do solo sob pastagens, lavouras anuais e permanentes na região noroeste do Paraná. **R. Unimar**, Maringá, v. 19, n. 3, p. 853-861, 1997b.
- FIDALSKI, J. et al. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho cultivado com citros. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 9-19, 2007.

FIDALSKI, J. et al. Produção de frutos de laranja Pêra e teores de nutrientes nas folhas e no solo, em Latossolo Vermelho-Escuro do noroeste do Paraná. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 273-279, 1999.

FIDALSKI, J. et al. Produção de laranja com plantas de cobertura permanente na entrelinha. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, v. 41, n. 6, p. 927-935, 2006a.

FIDALSKI, J. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho distrófico. **Ci. Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1773-1779, 2006b.

FIDALSKI, J.; AULER, P. A. M. Levantamento nutricional de pomares de laranja no noroeste do Paraná. **Arq. Biol. Tecnol.**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 443-451, 1997.

FIDALSKI, J.; STENZEL, N. M. C. Nutrição e produção da laranja "Folha Murcha" em porta-enxertos e plantas de cobertura permanente na entrelinha. **Ci. Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 807-813, 2006.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo Vermelho distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 235-247, 2005.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 66, no. 2, p.95-106, 2002.

GEE, G.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, v. 4, p. 255-293, 2002.

GIAROLA, N. F. B. et al. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 885-893, 2002.

GLENN, D. M.; WELKER, W. V. Orchard soil management systems influence rainfall infiltration. **J. Amer. Soc. Hort. Sci.**, Alexandria, v. 114, no. 1, p.10-14, 1989.

GLOVER, J. D. et al. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washinton State. **Agr. Ecosyst. Environ.**, Amsterdam, v. 80, no. 1, p. 29-45, 2000.

GOH, K. M. et al. Effects of apple orchard production systems on some important soil physical, chemical and biological quality parameters. **Biol. Agric. Hortic.**, Husbrandry, v. 18, no. 3, p. 269-292, 2001.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. **Soil Sci. Soc. Am. J. Proc.**, Madison, v. 32, no. 2, p. 180-186, 1968.

GREGORICH, E. G. et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Can. J. Soil Sci.**, Ottawa, v. 74, no. 4, p. 367-385, 1994.

GREGORICH, E. G. Quality. **Encyclopedia of Soil Science**, Madison. 2006. p.1388-1391.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4, p. 201-228.

GRUNWALD, S. et al. Development of pedotransfer functions for a profile cone penetrometer. **Geoderma**, Amsterdam, v. 100, no. 1/2, p. 25-47, 2001.

HAMBLIN, A. P.; DAVIES, D. B. Influence of organic matter on the physical properties of some east anglian soils of high silt content. **J. Soil Sci.**, Oxford, v. 28, n. 1, p. 11-22, 1977.

HAYNES, R. J. Effects of soil management practices on soil physical properties, earthworm population and tree root distribution in a commercial apple orchard. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 1, n. 3, p. 269-280, 1980.

HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.108, no. 3/4, p.155-180, 2002.

HOGUE, E. J.; NEILSEN, G. H. Orchard floor vegetation management. **Hortic. Rev.**, Westport, v. 9, p. 377-430, 1987.

HOLLIS, J. M. et al. The effects of organic matter and particle size on the water-retention properties of some soils in the west midlands of England. **Geoderma**, Amsterdam, v. 17, p. 225-238, 1977.

IAPAR. **A citricultura no Paraná**. Londrina, 1992. (IAPAR. Circular, 72).

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. 1 CD-ROM.

IMHOFF, S. et al. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 11-18, 2001.

JOHNS, G. G. Effect of *Arachis pinto* groundcover on performance of bananas in northern New South Wales. **Aust. J. Exp. Agric.**, Melbourne, v. 34, no. 8, p. 1197-1204, 1994.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 61, no. 1, p. 4-10, 1997.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: Current concepts and applications. **Adv. Agron.**, San Diego, v. 74, p. 1-40, 2001.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: why and how? **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, no. 3/4, p. 145-156, 2003.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1994. cap. 4, p. 53-71. (SSSA Special Publication, 35).

KAY, B. D.; VANDENBYGAART, A. J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 66, no. 2, p. 107-118, 2002.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

LEÃO, T. P. et al. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, New York, v. 1, no. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. et al. 1996. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 1-12, 1996.

LIMA, C. L. R. et al. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 409-414, 2004.

LIMA, H. V. de et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 677-684, 2005.

LIPECKI, J.; BERBEĆ, S. Soil management in perennial crops: orchards and hop gardens. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 43, no. 1/2, p. 169-184, 1997.

MACHADO, E. C. et al. Teor de água no substrato de crescimento e fotossíntese em laranjeira "Valência". **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 2, p. 217-226, 1999.

MACHADO, E. C. et al. Variação sazonal da fotossíntese, condutância estomática e potencial da água na folha de laranjeira "Valência". **Sci. Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 53-58, 2002.

- MARUR, C. J.; VIEIRA, L. G .E. Spreadsheet macros for handling data collected from the LI-6200™ portable photosynthesis system. **Rev. Brasil. Agromet.**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 133-135, 1997.
- McBRATNEY, A. B. et al. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, no. 1/2, p. 41-73, 2002.
- MEDINA, C. L. et al. Condutância estomática, transpiração e fotossíntese em laranjeira “Valência” sob deficiência hídrica. **Rev. Bras. Fisiol. Veg.**, Brasília, DF, v. 11, n. 1, p. 29-34, 1999.
- MINATEL, A. L. G. et al. Efeitos da subsolagem e da adubação verde nas propriedades físicas do solo em pomar de citros. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 86-95, 2006.
- MORENO, F. et al. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 85, n. 1/2, p. 86-93, 2006.
- MORGAN, K. T. et al. Citrus water uptake dynamics on a sandy Florida Entisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 70, p. 90-97, 2006.
- MRABET, R. Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 66, no. 2, p.119-128, 2002.
- NETER, J. et al. **Applied linear statistical models**. 4nd ed. Chicago: IRWIN. 1996.
- NEVES, C. S. V. J. et al. Efeito do manejo do solo no sistema radicular de tangerineira “Poncã” enxertada sobre limoeiro “Cravo” em Latossolo Roxo. **Rev. Bras. Frutic.**, Cruz das Almas, v. 20, n. 2, p. 246-253, 1998.
- NEVES, C. S. V. J. et al. Root distribution of rootstocks for “Tahiti” lime. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 61, n. 1, p. 94-99, 2004.
- OLIVEIRA, M. T.; MERWIN, I. A. Soil physical conditions in a New York orchard after eight years under different groundcover manangement systems. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 234, no. 2, p. 233-237, 2001.
- OLNESS, A.; ARCHER, D. Effect of organic carbon on available water in soil. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 170, no. 2, p. 90-101, 2005.
- OSUNA-CEJA, E. S. et al. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. **Agrociencia**, Chapingo, v. 40, n. 1, p. 27-38, 2006.
- PABIN, J. et al. Critical soil bulk density and strengh for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 46, no. 3/4, p. 203-208, 1998.

PACHECO, E. B. et al. Efeito do manejo de um Latossol Vermelho Amarelo, fase cerrado, sobre o crescimento e produção da laranjeira (*Citrus sinensis* Osbeck cv. "Baianinha"). **Experimentiae**, Viçosa, MG, v. 19, n. 10, p. 211-238, 1975.

PACHEPSKY, Y. et al. Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 49, n. 1/2, p. 117-126, 1998.

PASSIOURA, J. B. Soil conditions and plant growth. **Plant Cell Environ.**, Osford, v. 25, no. 2, p. 311-318, 2002.

PASSOS, O. S. et al. Manejo do solo em pomar de citros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2., Viçosa, MG, 1973. **Anais...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Fruticultura, v.1, p.249-256, 1973.

PERIN, A. et al. Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um Argissolo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 713-720, 2002.

PERIN, A. et al. **Efeito da morfologia radicular de leguminosas herbáceas perenes na umidade de um argissolo**. EMBRAPA: Seropédica, n. 44, 8 p., dez., 2000. (EMBRAPA Agrobiologia. Comunicado Técnico, 44).

RAWLS, W. J. et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2, p. 61-76, 2003.

RÊGO, I. C. **Calagem e gessagem num Latossolo Vermelho Escuro cultivado com laranjeira Pêra sobre limoeiro Cravo**. 1997. 94 f. Tese (Doutorado)–Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 1997.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.

REICHERT, J. M. et al. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb.**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, no. 1/2, p. 131-146, 2002.

ROCHA, G. C. et al. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citros. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 41-50, 2005.

RODRIGUEZ, O. et al. **Estudo de nove práticas de cultivo do solo em pomar cítrico no planalto paulista**. Cruz das Almas: IPEAS, v. 7, n. 2, p. 257-258, 1964. (Boletim Técnico, 2).

RODRIGUEZ, O. Manejo do solo em pomar cítrico. **O Agrônômico**, Campinas, v. 9, n. 11/12, p. 17-24, 1957.

ROMANO, N. et al. Suction table. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4, p. 692-698.

SANCHES, A. C. et al. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 91-99, 1999.

SANTANA, M. B. et al. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 1-12, 2006.

SANTINONI, L. A.; SILVA, N. R. Crecimiento, producción y maduración del mandarino común bajo diferentes prácticas de manejo de suelo. **Hortic. Argentina**, Mendoza, v. 14, n. 36, p. 5-11, 1995.

SANTOS, R. D. dos et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p.17-21.

SÃO JOSÉ, A. R. et al. Estudo de tratos culturais na formação de pomar cítrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 9., Campinas, 1987, **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Fruticultura, v. 1, p. 383-386, 1988.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT User's guide**. Version 8.2. Cary, NC, 2001.

SCHOLANDER, P. F. et al. Sap pressure in vascular plants. **Science**, Washington, D. C., v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965.

SHUKLA, M. K. et al. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 87, no. 2, p. 194-204, 2006.

SIEGEL-ISSEM, C. M. et al. Seedling root growth as a function of soil density and water content. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 69, no. 1, p. 215-226, 2005.

SILVA, A. P. da et al. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 58, no. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 61, no. 3, p. 877-883, 1997.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, Netherlands, v. 184, no. 2, p. 323-329, 1996.

SKROCH, W. A.; SHRIBBS, J. M. Orchard floor management: an overview. **HortScience**, Alexandria, v. 21, no. 3, p. 390-394, 1986.

SMITH, C. W. et al. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 1/2, p. 93-111, 1997.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 16, n. 1/2, p. 179-201, 1990.

SOARES, J. L. N. et al. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 1005-1014, 2005.

SOUZA JÚNIOR., J. O. et al. Produtividade do cacauzeiro em função de características do solo. II. Características físico-morfológicas e alguns elementos extraídos pelo ataque sulfúrico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 873-880, 1999.

SOUZA, L. D. et al. Disponibilidade de água em pomar de citros submetido a poda e subsolagem em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 69-73, 2004.

STENZEL, N. M. C. et al. Crescimento vegetativo de plantas cítricas no norte e noroeste do Paraná. **Rev. Bras. Frut.**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 412-417, 2005.

STOLF, R. A compactação do solo e perspectivas da subsolagem em citros. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 2, n. 8, p. 283-308, 1987.

STUCHI, E. S. et al. Tolerância à seca da laranjeira “Folha Murcha” em 10 porta-enxertos. **Rev. Bras. Frut.**, Jaboticabal, v. 22, n. 3, p. 454-457, 2000.

SYVERTSEN, J. P. Physiological determinants of citrus tree growth and development. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FRUTICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FAPESP, 1999, p.123-160.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Stress physiology. In: **Plant Physiology**. 2nd. ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 1988. p. 575-600.

TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 393-399, 1999.

TAYLOR, H. M. et al. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, no. 1, p. 18-22, 1966.

TERSI, F. E. A.; ROSA, S. M. A subsolagem no manejo de solo para os pomares de citros. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 16, n. 2, p. 289-298, 1995.

- THEODORO, V. C. A. et al. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 1039-1047, 2003.
- TOMASELLA, J. et al. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 64, no. 1, p. 327-338, 2000.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 163, no. 3, p. 190-202, 1998.
- TORMENA, C. A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.
- TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, 2004.
- TORMENA, C. A. et al. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 52, no. 3/4, p. 223-232, 1999.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 305-314, 2002.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da. Avaliação da qualidade física de um solo utilizando o parâmetro S. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004. **Anais...** Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 4 p. 1 CD-ROM.
- TORRECILLAS, A. et al. Physiological and agronomical aspects of the response of tree crops to deficit irrigation. **Res. Devel. Rec. Plant Biol.**, Trivandrum, v. 1, n. 1, p. 143-154, 2001.
- van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VASCONCELLOS, H. de O. et al. Manejo do solo em pomar de laranja Pera (*Citrus sinensis*). **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, DF, v. 11, p. 43-48, 1976. (Série Agronomica).
- VEPRASKAS, M. J. Cone index of loam sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 48, no. 6, p. 1220-1225, 1984.

VIEIRA, S. Pressuposições básicas. In: VIEIRA, S. **Estatística experimental**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1999. cap. 11, p. 133-147.

WEAICH, K. et al. Use of a penetration resistance characteristic to predict soil strength development during drying. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 25, no. 2/3, p. 149-166, 1992.

WHALLEY, W. R. et al. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 84, no. 1, p. 18-27, 2005.

WÖSTEN, J. H. M. et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 90, no. 3/4, p. 169-185, 1999.

WÖSTEN, J. H. M. et al. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **J. Hidrol.**, Amsterdam, v. 251, no. 3/4, p. 123-150, 2001.

WRIGHT, G. C. et al. Managing orchard floor vegetation in flood-irrigated citrus groves. **HortTechnology**, Alexandria, v. 13, no. 4, p. 668-677, 2003.

ZOU, C. et al. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Aust. J. Soil Res.**, Amsterdam, v. 38, n. 5, p. 947-958, 2000.

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](#)