

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

**DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO EM CULTIVOS DE
MILHO SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO
CONVENCIONAL**

Tese de Doutorado

Genei Antonio Dalmago

Porto Alegre, 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

**DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO EM CULTIVOS DE MILHO SOB PLANTIO
DIRETO E PREPARO CONVENCIONAL**

Genei Antonio Dalmago
Engenheiro Agrônomo, M. Sc. (UFSM)

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia,
área de concentração Agrometeorologia

Porto Alegre, RS, Brasil
Setembro de 2004

AGRADECIMENTOS

Ao professor Homero Bergamaschi, agradeço pela orientação segura e competente, pela amizade e motivação, pelo convívio e apoio recebidos, pelos ensinamentos transmitidos e pelo profissionalismo. Prof Homero, muito obrigado.

Ao professor João Ito Bergonci, pela colaboração e sugestões na elaboração do trabalho, pela amizade e pelos conhecimentos transmitidos, muito obrigado.

Aos professores Moacir A. Berlato e Denise C. Fontana, pela amizade e pela colaboração importante na minha formação durante o curso de Pós-Graduação.

Aos demais professores do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia e da Faculdade de Agronomia, que contribuíram, direta ou indiretamente, durante o curso de Pós-Graduação e realização deste trabalho.

À minha esposa Sabina M. Pasa Dalmago pelo seu amor e companheirismo, pelo apoio e compreensão nos momentos de minha ausência e de dificuldade, muito obrigado.

À minha mãe Aurora M. Andreolla Dalmago, pelo exemplo de vida e pelo apoio nos momentos de dificuldade, muito obrigado.

Ao meu irmão Sadi P. Dalmago pelo apoio e incentivo durante toda essa caminhada, muito obrigado.

À colega e amiga Cleusa A. M. Bianchi, pela determinação demonstrada, pela integração perfeita e por toda ajuda prestada durante o nosso trabalho, mostrando que um trabalho em conjunto é possível de ser feito na prática.

Às bolsistas de Iniciação Científica Flávia Comiran e Bruna M. M. Heckler, pela valiosa colaboração, pela integração, e por permitir que participasse na orientação científica.

À Lucietta Guerreiro Martorano, colega e amiga, por todo o apoio prestado, pelo incentivo, pela amizade e pela oportunidade de compartilhar conhecimento.

Ao colega e amigo Josué F. Beutler pelas sugestões e inúmeras discussões que auxiliaram na execução deste trabalho.

Aos demais colegas e amigos Francisco Mandelli, Julio R. Marques, Carlos Reisser Junior, Bernadete Radin, Ricardo W. de Mello, Luciano Carmona, Solange França, Régis B. Lisboa, Janice Leivas, Tatiana S. Almeida, pelo agradável convívio durante todo esse período.

Aos funcionários da Estação Experimental Agronômica, em especial ao Celso pela ajuda prestada durante a realização do experimento

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, à Faculdade de Agronomia e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela acolhida e possibilidade de realização deste curso de Pós-Graduação.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, especialmente, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao povo brasileiro que mantém a estrutura pública de ensino, em especial, àquelas pessoas lutam por uma Universidade Pública, gratuita e de qualidade.

A todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, participaram da realização deste trabalho.

DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO EM CULTIVOS DE MILHO SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO CONVENCIONAL¹

Autor: Genei Antonio Dalmago
Orientador: Prof. Homero Bergamaschi
Co-orientador: Prof. João Ito Bergonci

RESUMO

A dinâmica da água em sistema de plantio direto (PD) é alterada em relação ao preparo convencional (PC) devido a modificações na estrutura do solo e a presença de palha na superfície. Para avaliar estas diferenças foram conduzidos experimentos de campo, em 2001/02 e 2002/03, em Eldorado do Sul, RS. O objetivo geral foi quantificar alterações físico-hídricas no perfil e na superfície do solo em PD e PC, com ênfase na dinâmica da água e respostas das plantas de milho. Os sistemas de manejo do solo foram implantados na área em 1995. Foram avaliadas propriedades físicas, a movimentação e a armazenagem de água no solo. Mediu-se a infiltração e a capacidade de campo e monitorou-se a dinâmica da água durante o ciclo da cultura, enfocando a secagem do solo e a extração de água em períodos sem precipitação. Nestes períodos também foi determinada a evaporação da água na superfície e avaliadas respostas das plantas. Os efeitos do plantio direto se evidenciaram nas camadas de solo próximas à superfície. A mesoporosidade foi a propriedade física mais afetada, apresentando uma distribuição exponencial de mesoporos no plantio direto, enquanto no preparo convencional a mesma se aproximou de uma curva normal. Em geral, a condutividade hidráulica, a retenção e a disponibilidade de água foram mais elevadas em plantio direto, principalmente, próximo à superfície. O solo em PD também apresentou maior umidade volumétrica com menor energia de retenção, resultando em redução no avanço da frente de secagem do solo e extração de água. A evaporação também foi maior em PD, demonstrando que a maior umidade no solo em plantio direto se deve ao aumento na capacidade de armazenagem de água. O aprofundamento radicular foi sempre maior no preparo convencional. O plantio direto altera propriedades físicas ligadas à dinâmica da água, proporcionando maior disponibilidade hídrica no solo ao longo do tempo.

¹ Tese de doutorado em Fitotecnia, área de concentração Agrometeorologia Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (245 f.), setembro, 2004.

DYNAMICS OF SOIL WATER IN MAIZE CROPS UPON NO-TILLAGE AND CONVENTIONAL TILLAGE ²

Author: Genei Antonio Dalmago

Advisor: Prof. Homero Bergamaschi

Co-advisor: Prof. João Ito Bergonci

ABSTRACT

The dynamics of water in no-tillage soils (NT) is modified in comparison to the conventional tillage (CT) because of alterations in the soil structure and the presence of straw on the surface. Field experiments were conducted in 2001/02 and 2002/03, in Eldorado do Sul, Brazil, in order to evaluate those modifications. The main objective was to quantify physical and hydrological alterations in the soil profile and surface related to the tillage systems, taking emphasis in the water dynamics and maize plants responses. Those tillage systems were implanted in the experimental area in 1995. Soil physical properties, water moving and storage into the soil profile were evaluated. The water infiltration and the field capacity were measured in the experimental area. The water dynamics was monitored along the crop cycle, focusing the soil drying and water uptake by plants during several periods without rain. In these periods, the evaporation at the soil surface was measured, while plant responses were evaluated. Highest effects of no-tillage were detected in the soil layers close to the surface. The mesoporosity was the most affected property, showing an exponential distribution of mesopores in the no-tillage soil, while it tended to a normal distribution in the conventional system. In general, the no-tillage soil had highest values of hydraulic conductivity, water retention and water storage, mainly close to the surface. The no-tillage soil presented also a higher water content in low energy levels, as compared to the conventional system, reducing the deep advance of soil drying and water extraction by plants. The evaporation at the no-tillage soil surface was higher than in CT, showing that its highest water content must be related to increases in the water storage capacity. The root deep growing was higher in the conventional system than in NT. The no-tillage systems leads to alterations of several soil physical properties related to the water dynamics, increasing the water availability to plants, in the course of time.

² Doctoral thesis in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (245 f.), September, 2004.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Sistema de plantio direto e preparo convencional: Conceito.....	4
2.2 Alterações de propriedades físicas do solo, associadas ao sistema de manejo do mesmo.....	5
2.2.1 Densidade e porosidade do solo.....	6
2.2.2 Infiltração de água no solo.....	9
2.2.2 Condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado....	11
2.3 Retenção de água no solo.....	13
2.4 Disponibilidade de água às plantas.....	16
2.5 Extração de água do solo pelas plantas.....	21
2.6 Evaporação da água na superfície do solo.....	26
2.6.1 Princípio físico.....	26
2.6.2 Fatores que afetam a evaporação na superfície do solo.....	29
2.6.3 Evaporação da água do solo sob plantio direto.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1 Caracterização da área experimental.....	34
3.1.1 Local e clima.....	34
3.1.2 Solo.....	34
3.1.3 Antecedentes da área.....	35
3.2 Caracterização dos sistemas plantio direto e preparo convencional..	35

3.2.1	Instalação e manejo da cultura de cobertura de inverno.....	35
3.2.2	Instalação e manejo da cultura de milho.....	36
3.2.2.1	Semeadura do milho.....	36
3.2.2.2	Adubação de base e de cobertura.....	37
3.2.2.3	Controle de pragas e plantas daninhas.....	37
3.2.2.4	Irrigação.....	37
3.3	Determinação de propriedades físico-hídricas do solo.....	38
3.3.1	Densidade do solo.....	39
3.3.2	Porosidade total e distribuição do tamanho de poros.....	40
3.3.3	Curvas características de retenção de água.....	41
3.3.4	Condutividade hidráulica.....	41
3.3.5	Capacidade de campo (CC).....	42
3.3.6	Taxa de infiltração de água.....	43
3.4	Medição do potencial matricial da água no solo.....	44
3.5	Secagem do solo e extração de água pelo milho.....	45
3.6	Variáveis meteorológicas.....	46
3.7	Determinação de variáveis de crescimento e desenvolvimento da cultura.....	46
3.8	Estimativa da profundidade do sistema radicular do milho.....	48
3.9	Avaliação da cobertura do solo no plantio direto.....	48
3.10	Medição da radiação solar fotossinteticamente ativa (<i>RFA</i>) interceptada pela cultura do milho.....	49
3.11	Fluxo de calor para o solo.....	49
3.12	Medição da evaporação da água na superfície do solo (<i>Es</i>).....	50
3.13	Delineamento experimental e análise dos resultados.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	Condições de contorno	54
4.1.1	Condições químicas do solo.....	55
4.1.2	Evolução da cobertura de palha.....	55
4.1.3	Condições meteorológicas.....	56
4.2	Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho.....	59
4.3	Propriedades físicas do solo.....	64
4.3.1	Densidade do solo.....	64
4.3.2	Porosidade total.....	66

4.3.3	Macro, meso e microporosidade.....	69
4.3.4	Distribuição do tamanho de mesoporos.....	73
4.3.5	Correlação entre densidade e porosidade do solo.....	76
4.4	Entrada e movimentação de água no solo.....	79
4.4.1	Infiltração de água.....	79
4.4.2	Condutividade hidráulica do solo saturado.....	82
4.4.3	Condutividade hidráulica do solo não saturado.....	84
4.5	Retenção de água no solo.....	86
4.5.1	Curvas características de retenção de água.....	86
4.5.2	Capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).....	90
4.6	Água disponível às plantas.....	95
4.6.1	Total de água disponível no perfil de solo.....	95
4.6.2	Estado potencial da água no solo disponível às plantas.....	102
4.7	Dinâmica da água no solo: Efeito dos sistemas de manejo.....	105
4.7.1	Evolução do potencial matricial durante ciclos de secagem do solo.....	105
4.7.2	Estudo de casos de secagem do solo.....	110
4.7.3	Estimativa da secagem do solo.....	116
4.7.4	Verificação dos modelos de secagem do solo.....	122
4.7.5	Aspectos gerais relacionados à secagem do solo.....	125
4.8	Dinâmica da água no solo: Extração de água pelas plantas.....	126
4.8.1	Variação do potencial matricial durante o ciclo do milho.....	126
4.8.2	Estudo de casos: Ciclos de extração de água.....	132
4.8.3	Considerações gerais sobre a extração de água do solo pelas plantas.....	139
4.8.4	Estimativa da extração de água pelo milho.....	142
4.8.4.1	Efeito dos ciclos de secagem do solo.....	143
4.8.4.2	Integração do efeito do tempo de secagem do solo e do crescimento das plantas.....	152
4.8.4.3	Integração do efeito do tempo de secagem do solo, crescimento das plantas e profundidade no perfil.....	163
4.8.4.4	Evolução do potencial matricial após o florescimento do milho.....	167
4.8.4.5	Verificação de modelos de extração de água	171
4.9	Avaliação da profundidade do sistema radicular do milho.....	174

4.9.1	Estimativa do aprofundamento do sistema radicular.....	177
4.9.2	Verificação dos modelos de aprofundamento do sistema radicular.....	181
4.10	Evaporação da água na superfície do solo.....	183
4.10.1	Caracterização geral dos períodos de medição.....	183
4.10.2	Efeito dos sistemas de manejo do solo.....	185
4.10.3	Evaporação acumulada.....	190
4.10.4	Efeito da palha sobre o solo na redução da evaporação.....	193
4.10.5	Influência de outros fatores na evaporação da água na superfície do solo.....	195
4.11	Dinâmica físico-hídrica no sistema plantio direto e respostas das plantas.....	196
5.	CONCLUSÕES.....	199
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	202
7.	APÊNDICES.....	219

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Estádios fenológicos da cultura do milho, adaptados de Hanways (1963), em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I4) e não irrigado (I0), com as respectivas datas de amostragem (DA), dias após a emergência (DAE) e graus-dia acumulados (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	63
2. Correlação entre a densidade e a porosidade do solo em plantio direto e preparo convencional e nível de significância dos coeficientes (entre parênteses), para a camada de solo mais afetada pelos sistemas de manejo: 0 a 0,375m de profundidade. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	77
3. Umidade do solo na capacidade de campo (CC), medida a campo com respectivo potencial matricial e umidade na CC e ponto de murcha permanente (PMP), obtidos em laboratório, em diferentes camadas no solo em plantio direto e preparo convencional. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	91
4. Ciclos de secagem do solo, em diferentes períodos, com o respectivo número de medições e total de precipitação ocorrida nos dias imediatamente anteriores ao início de cada ciclo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	110
5. Modelos de estimativa da evolução do potencial matricial da água no solo (Ψ_m , MPa) em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades (z, m), em função do tempo de secagem do solo (TSS, dias), com respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2_{ajis}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	117

6. Número de dias necessários para que o potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), atinja os limites de $-0,05\text{MPa}$ e $-0,08\text{MPa}$, em diferentes profundidades (z), durante seis ciclos de secagem do solo (Tabela 4). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	121
7. Períodos selecionados para avaliação da extração de água do solo pelo milho ao longo do tempo e caracterização da cultura nos dois experimentos realizados. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	133
8. Ciclos de extração de água do solo, com a respectiva duração, índice de área foliar do milho (IAF), graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}), evapotranspiração de referência média (ET_o) e precipitação imediatamente anterior ao início da secagem do solo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	144
9. Modelos de estimativa da evolução do potencial matricial da água no solo (Ψ_m , MPa) em plantio direto e preparo convencional em diferentes profundidades (z), em função do tempo de secagem do solo (TSS , dias), com respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação ($R^2_{ajis.}$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	145
10. Coeficientes do modelo de estimativa do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional cultivado com milho, em diferentes profundidades (z) (Equação 18) e respectivos coeficientes de determinação dos mesmos ($R^2_{ajis.}$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	155
11. Equações para estimar Ψ_{m_o} , a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$ para o plantio direto e preparo convencional, em função da profundidade do solo (z), e respectivos coeficientes de determinação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	166
12. Profundidade máxima e coeficiente de aprofundamento do sistema radicular do milho em florescimento (Az_r), sob diferentes níveis de irrigação, em solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), com os respectivos graus-dia acumulados (GD_{acm}) e dias após a emergência (DAE). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	175
13. Ciclos de avaliação da evaporação da água na superfície do solo com respectivos número de medidas feitas, total de dias envolvidos e tempo de secagem do solo (TSS) em que foram iniciadas as medições, a equivalência em relação aos dias após a emergência do milho (DAE) e graus-dia acumulados (GD_{acm}) pela cultura. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.....	184

14. Umidade do solo, em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), no interior dos microlisímetros no primeiro dia de início de cada ciclo de determinação da evaporação, em presença e ausência de plantas, (com e sem irrigação). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....

185

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET _o) em relação a dias após a emergência do milho (DAE) no primeiro experimento. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02. (Fonte: Boletim Agrometeorológico – EEA/UFRGS).....	57
2. Precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET _o) em relação a dias após a emergência do milho (DAE) no segundo experimento. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03. (Fonte: Boletim Agrometeorológico – EEA/UFRGS).....	58
3. Evolução do índice de área foliar medido do milho (<i>I_{AF}</i>) irrigado (<i>I₄</i>) e não irrigado (<i>I₀</i>) para o sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função de graus-dia acumulados (<i>GD_{acm}</i>). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.....	60
4. Evolução do índice de área foliar estimado do milho (<i>I_{AF}</i>), irrigado (<i>I₄</i>) e não irrigado (<i>I₀</i>) para o sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função de graus-dia acumulados (<i>GD_{acm}</i>). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	60
5. Densidade do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades, e respectivo desvio padrão. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	65
6. Porosidade total do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades no perfil. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	67
7. Macroporosidade (a), mesoporosidade (b) e microporosidade (c) do solo cultivado em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades no perfil. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	70

8. Distribuição da mesoporosidade das diferentes camadas de solo, em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes subclasses de diâmetro de mesoporos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	74
9. Distribuição da mesoporosidade da camada de solo entre 0 a 0,375m de profundidade, em plantio direto (PD) e no preparo convencional (PC), em diferentes subclasses de diâmetro de poros. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	76
10. Taxa de infiltração (V_i) (a) e infiltração acumulada de água no solo (I_a) (b), em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), com os respectivos ajustes pelo modelo de Kostiaikov-Lewis em função do tempo de medição (t). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	80
11. Condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades no perfil EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	82
12. Condutividade hidráulica do solo não saturado para quatro camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), estimada em função de diferentes valores de umidade volumétrica. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	85
13. Curvas características de retenção de água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), nas camadas de 0 a 0,05m (a) e 0,05m a 0,1m (b), com valores medidos e ajustados pelo modelo de Van Genuchten. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS – 2002.....	87
14. Curvas características de retenção de água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) nas camadas de 0,1m a 0,225m (a) e 0,225m a 0,375m (b), com valores medidos e ajustados pelo modelo de Van Genuchten. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS – 2002.....	88
15. Água disponível (AD) entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente obtidos em laboratório, em diferentes camadas no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	97
16. Disponibilidade relativa de água (AD) a partir dos limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, obtidos em laboratório, em diferentes camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	97

17. Água disponível (AD) por centímetro cúbico de solo, em diferentes camadas no perfil, em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pelas profundidades média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	98
18. Diferença na disponibilidade de água entre o solo em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para todo o perfil (0 a 0,825m) e para a camada mais afetada pelos sistemas de manejo (0 a 0,375m), utilizando a CC e o PMP obtidos em laboratório. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	100
19. Água disponível (AD) no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), nas quatro camadas próximas à superfície, calculada a partir da CC e PMP obtidos em laboratório. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	101
20. Água disponível (AD) no solo até o potencial matricial de $-0,08\text{MPa}$ (mm) e valor relativo da mesma à capacidade máxima (%), para diferentes camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	102
21. Água disponível (AD) no solo até o potencial matricial de $-0,1\text{MPa}$ (mm) e valor relativo da mesma à capacidade máxima (%), para diferentes camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	104
22. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional, em quatro profundidades, em área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.....	107
23. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional, em quatro profundidades, em área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	108
24. Evolução da secagem do solo em plantio direto e preparo convencional, com base na variação do potencial matricial da água no solo em diferentes profundidades, no período de 09 a 21 de janeiro. Área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.....	111
25. Evolução da secagem do solo em plantio direto e preparo convencional, com base na variação do potencial matricial da água no solo em diferentes profundidades, no período de 26 de dezembro a 08 de janeiro. Área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	113

26. Evolução da secagem do solo em plantio direto e preparo convencional, com base na variação do potencial matricial da água no solo em diferentes profundidades, no período de 24 de janeiro a 04 de fevereiro. Área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003.....	114
27. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0,075m, medido e estimado em função do tempo de secagem do solo (<i>TSS</i>) (modelo da Tabela 5). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	118
28. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0,15m, medido e estimado em função do tempo de secagem do solo (<i>TSS</i>) (modelo da Tabela 5). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	119
29. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0,3m, medido e estimado em função do tempo de secagem do solo (<i>TSS</i>) (modelo da Tabela 5). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	120
30. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e em preparo convencional (PC) (b) em três profundidades (m), medido com tensiômetros e estimado a partir dos modelos da Tabela 5. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	124
31. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho não irrigado, em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.....	128
32. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho não irrigado (I0), em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	129
33. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho irrigado (I4), em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.....	130
34. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho irrigado (I4), em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	131

35. Potencial matricial da água do solo em plantio direto [(a) e (c)] e preparo convencional [(b) e (d)] cultivado com milho não irrigado (I0), em diferentes profundidades, durante o crescimento vegetativo no primeiro [(a) e (b)] e segundo [(c) e (d)] experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	134
36. Potencial matricial da água do solo em plantio direto [(a) e (c)] e preparo convencional [(b) e (d)] de milho não irrigado (I0), em diferentes profundidades, próximo ao pendoamento/ espigamento do milho, no primeiro [(a) e (b)] e segundo [(c) e (d)] experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	136
37. Potencial matricial da água do solo em plantio direto [(a) e (c)] e preparo convencional [(b) e (d)], cultivado com milho não irrigado (I0), em diferentes profundidades, no pendoamento/espigamento do milho, durante o primeiro [(a) e (b)] e segundo [(c) e (d)] experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	138
38. Potencial matricial da água no solo medido em plantio direto (PDm) e preparo convencional (PCm) cultivado com milho e valores estimados em função do tempo de secagem (<i>TSS</i>) (PDe e Pce) para a profundidade de 0,075m, no primeiro (01/02) e segundo (02/03) experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	147
39. Potencial matricial da água no solo medido em plantio direto (PDm) e preparo convencional (PCm) cultivado com milho e valores estimados em função do tempo de secagem (<i>TSS</i>) (PDe) e (Pce) para a profundidade de 0,15m, no primeiro (01/02) e segundo (02/03) experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	148
40. Potencial matricial da água no solo medido em plantio direto (PDm) e preparo convencional (PCm) cultivado com milho e valores estimados em função do tempo de secagem (<i>TSS</i>) (PDe e Pce) para a profundidade de 0,3m, no primeiro (01/02) e segundo (02/03) experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	152
41. Diferença em número de dias entre a ocorrência de um determinado valor de potencial matricial da água no solo, cultivado com milho em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em 2001/02 (a) e 2002/03 (b). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	154
42. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b) cultivado com milho na profundidade de 0,075m, em função do tempo de secagem do solo (<i>TSS</i>) e de graus-dia acumulados após a emergência (<i>GD_{acm}</i>). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	157

43. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b) cultivado com milho na profundidade de 0,15m, em função do tempo de secagem do solo (TSS) e de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}),. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	158
44. Evolução do potencial matricial da água no solo cultivado com milho em plantio direto (a) e preparo convencional (b) em função do tempo de secagem do solo (TSS) e da graus-dia acumulados após a emergência do milho (GD_{acm}), na profundidade de 0,3m. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	161
45. Evolução do potencial matricial da água no solo cultivado com milho em plantio direto (a) e preparo convencional (b), em função do tempo de secagem do solo (TSS) e dos graus-dia acumulados após a emergência do milho (GD_{acm}) na profundidade de 0,45m. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	162
46. Variação dos coeficientes Ψm_o , a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$ da Tabela 10, para o plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função da profundidade do solo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	165
47. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função do tempo de secagem do solo (TSS), após o florescimento do milho. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	168
48. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b), em função do tempo de secagem do mesmo (TSS) e da profundidade no perfil, durante o florescimento do milho,. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	170
49. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b) cultivado com milho, medido com tensiômetros e estimado a partir da equação 19, na camada de 0 a 0,975m de profundidade. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	173
50. Coeficiente de aprofundamento do sistema radicular do milho (Az_r) em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função da razão entre precipitação ou irrigação acumulada (P_{acm}) e graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	180
51. Profundidade radicular do milho (z_r) cultivado em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), medida através do acompanhamento da variação do potencial matricial da água no solo, e estimada pelas equações 20 e 21. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	182

52. Evaporação da água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no primeiro (a), quarto (b) e oitavo (c) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada, sem plantas. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.....	187
53. Evaporação da água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no décimo (a) e décimo segundo (b) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada, sem plantas. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	188
54. Evaporação acumulada de água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no primeiro (a), quarto (b) e oitavo (c) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.....	191
55. Evaporação acumulada de água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no décimo (a) e décimo segundo (b) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.....	192
56. Evaporação acumulada de água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), normalizada pela umidade do solo interno dos microlisímetros, no primeiro (a), décimo (b) e décimo segundo (c) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, para a área não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.....	194

RELAÇÃO DE SÍMBOLOS E ABREVIações

\bar{T}	Temperatura média do ar	(°C)
α	Coeficiente de Van Genuchten	(MPa)
ω	Adicional de umidade volumétrica do solo	
Ψ_m	Potencial matricial da água no solo	(MPa)
Ψ_{m_0}	Potencial matricial da água no solo no tempo zero	(MPa)
θ_r	Umidade residual do solo	(m ³ m ⁻³)
θ_s	Umidade de saturação do solo	(m ³ m ⁻³)
θ_v	Umidade volumétrica	(m ³ m ⁻³)
a	Coeficiente empírico das equações	
A	Área da secção transversal da amostra	(m ²)
AD	Água disponível às plantas	(mm ou mm cm ⁻³)
AF	Área foliar média	(m ² m ⁻²)
A/pt	Altura de plantas	(m)
a_{TSS}	Coeficiente empírico relacionado com TSS	
Az_r	Coeficiente de aprofundamento do sistema radicular	
b	Coeficiente empírico das equações	
$b_{GD_{acm}}$	Coeficiente empírico relacionado com GD_{acm}	
Bt	Horizonte B textural	
c	Coeficiente empírico	
CAD	Capacidade de água disponível	
CC	Capacidade de campo	(m ³ m ⁻³)
CV	Coeficiente de variação	

<i>D</i>	Diâmetro de poros	(μm)
DA	Data de amostragem	
DAE	Dias após a emergência	
Ds	Densidade do solo	(Mg m^{-3})
<i>e</i>	Base do logaritmo natural	
Es	Evaporação da água do solo	(mm ou mm dia^{-1})
ETm	Evapotranspiração máxima	(mm)
ETo	Evapotranspiração de referência	(mm)
GD	Graus-dia	($^{\circ}\text{C}$)
GD_{acm}	Graus-dias acumulados	($^{\circ}\text{C}$)
<i>h</i>	Altura da carga hidráulica	(cm)
<i>H</i>	Altura da coluna de mercúrio acima da cuba	(cm)
h_1	Altura do nível de água em t_1	(cm)
h_2	Altura do nível de água em t_2	(cm)
<i>hc</i>	Altura média do mercúrio acima do nível do solo	(cm)
I0	Irrigação nível zero	não irrigado
I1	Irrigação nível um	(20% CC)
I2	Irrigação nível dois	(41% CC)
I3	Irrigação nível três	(98% CC)
I4	Irrigação nível quatro	(100% CC)
<i>Ia</i>	Infiltração acumulada	(cm)
<i>IAF</i>	Índice de área foliar	($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
<i>k</i>	Coeficiente empírico	
$K(\theta)$	Condutividade hidráulica do solo não saturado	(cm h^{-1})
K_0	Condutividade hidráulica do solo saturado	(cm h^{-1})
L	Altura da amostra	(cm)
<i>l</i>	Parâmetro empírico	
<i>m</i>	Parâmetro empírico de Van Genuchten	
<i>M</i>	Massa do conjunto microlisímetros e solo	(g)
Mg	Mega grama	
Ms	Massa da matéria seca	(Mg ou g)
Mu	Massa da matéria úmida	(Mg)
<i>n</i>	Parâmetro empírico de Van Genuchten	

NF	Número de folhas	
P_{acm}	Precipitação acumulada	(mm)
PC	Sistema de preparo convencional	
PD	Sistema de plantio direto	
PMP	Ponto de murcha permanente	($m^3 m^{-3}$)
r	Raio do microlisímetro	(m)
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa	($mol m^{-2} dia^{-1}$)
RFA_{inc}	Radiação fotossinteticamente ativa incidente	($mol m^{-2} dia^{-1}$)
RFA_{int}	Radiação fotossinteticamente ativa inteceptada	($mol m^{-2} dia^{-1}$)
RFA_t	Radiação fotossinteticamente ativa transmitida	($mol m^{-2} dia^{-1}$)
Rg	Radiação solar global	($MJ m^{-2} dia^{-1}$)
S	Área de solo média	(m^2)
t	Tempo	(min ou h)
T_1	Tempo no instante 1	(min)
T_2	Tempo no instante 2	(min)
T_b	Temperatura base para o milho	($^{\circ}C$)
TSS	Tempo de secagem do solo	(dias)
TSS_o	Tempo inicial de secagem do solo	(dia)
U	Umidade gravimétrica	(%)
V	Volume	(m^3)
V_i	Taxa de infiltração	($cm h^{-1}$)
VIB	Infiltração básica	($cm h^{-1}$)
X_o	Coeficiente empírico	
z	Profundidade no perfil do solo	(cm ou m)
Z_r	Profundidade do sistema radicular do milho	(m)
Z_{ro}	Profundidade inicial do sistema radicular do milho	(0,1 m)

1. INTRODUÇÃO

Os avanços obtidos nas técnicas de produção agrícola, nos últimos tempos, passaram pela ruptura de paradigmas, tanto por parte do produtor quanto pela pesquisa científica. No lado do agricultor vários foram os desafios enfrentados. O principal, talvez, tenha sido deixar de preparar o solo através de arações e gradagens para produzir num solo não “preparado”, utilizando a mesma tecnologia disponível no momento.

No caso da pesquisa científica o desafio inicial foi desenvolver uma tecnologia apropriada, de baixo custo e eficiente, para atender à mudança de paradigma no campo. Para tanto, houve a necessidade de entender os processos envolvidos no sistema em macro e micro escala. Dada a complexidade com que as relações se estabelecem entre diferentes processos, o desafio maior foi (e continua sendo) integrar conhecimentos de várias áreas, numa perspectiva de sistemas dinâmicos, complexos e auto-organizativos.

Atualmente, o grande desafio da agricultura é produzir numa visão de sustentabilidade econômica e ecológica, em que, à pesquisa cabe a tarefa de desenvolver os meios para atender essa necessidade, reduzindo riscos. Para tanto, o entendimento dos processos envolvidos é fundamental, inclusive para o agricultor, pois o passo seguinte é identificar as características de cada unidade de produção e como elas determinam o rendimento das culturas, numa ótica de monitoramento dinâmico.

De certa forma, grande parte do que foi exposto encontra-se inserido no sistema plantio direto. Sua utilização se constituiu em uma ruptura de paradigma e tem-se mostrado uma técnica de produção mais sustentável, reduzindo riscos na agricultura, por alterar inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e da própria superfície. O não revolvimento do solo

possibilita que se instale um processo de auto-organização mais eficiente do que no preparo convencional, sendo que o fator tempo é uma variável muito importante. Isto torna cada área produtiva uma unidade peculiar, com características próprias de definição do desempenho das culturas, razão pela qual o entendimento dos processos, nas escalas macro e micro, se tornam fundamental.

Entre as inúmeras alterações provocadas pela adoção do plantio direto, a modificação da dinâmica da água no solo é de especial importância, pois grande parte dos riscos de perda de safras se deve ao fator déficit hídrico. No entanto, o estado hídrico do solo em plantio direto é condicionado por inúmeras alterações no sistema solo-planta-atmosfera. Isto engloba mudanças de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, alterações em características de superfície, como a presença de palha e modificações de respostas das plantas, em relação ao sistema de preparo convencional. Todas estas variáveis são interdependentes e associadas de forma a construir um processo de retroalimentação (“feedback”).

Este trabalho procura mostrar esta visão de integração de variáveis ligadas à dinâmica da água no solo em sistema de plantio direto e sua alteração em relação ao preparo convencional, enfocando a necessidade de avaliar os processos em cada ambiente para ajuste ou elaboração de novos índices. O trabalho está centrado, basicamente, nas diferenças da dinâmica da água no solo, entre o plantio direto e o preparo convencional, considerando o fator tempo envolvido nos processos.

O trabalho visou testar as seguintes hipóteses estabelecidas:

- O sistema plantio direto provoca alterações na dinâmica da água do solo, em função de modificações físicas que ocasiona no mesmo e da presença da palha na superfície;
- Em decorrência dessas alterações ocorrem diferenças na armazenagem de água no solo entre os dois sistemas, devido a modificações nas propriedades físicas ao longo do perfil, diferenças na distribuição do sistema radicular das plantas e redução da evaporação da água na superfície;
- No plantio direto ocorre redução da evaporação, devido à manutenção da cobertura da palha na superfície do solo;

- Modificações físicas do solo e suas implicações na disponibilidade hídrica alteram o padrão de respostas das plantas, na comparação entre o plantio direto e o preparo convencional.

O objetivo geral do trabalho foi quantificar alterações físico-hídricas no perfil e na superfície do solo, manejado em plantio direto e preparo convencional, com ênfase na dinâmica da água e respostas das plantas.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar diferenças em parâmetros físico-hídricos do solo cultivado em plantio direto e preparo convencional;

- Avaliar alterações provocadas pelo sistema plantio direto quanto à capacidade de armazenagem de água no solo, disponibilidade de água e padrão de extração da mesma pelas plantas de milho, quando comparado ao sistema convencional;

- Quantificar diferenças na evaporação da água na superfície do solo em plantio direto e preparo convencional;

- Avaliar respostas das plantas de milho cultivadas em plantio direto e preparo convencional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de plantio direto e preparo convencional: Conceito

O conceito de PC é amplo e pode variar em função de vários fatores ligados à sua execução, como tipo, quantidade e seqüência das práticas adotadas. De acordo com Dickey et al. (1992) o preparo convencional consiste de uma seqüência de operações que são mais comumente utilizadas em uma determinada área geográfica, a fim de preparar o solo para semeadura de uma cultura qualquer. No nosso meio, o PC é caracterizado, basicamente, pela realização de uma aração do solo, na profundidade entre 0,2 e 0,3m, e duas gradagens para nivelamento da superfície (Morote et al., 1990; Rojas & Van Lier, 1999), que tem também a função de controlar invasoras nas áreas de produção agrícola antes da semeadura (Phillips & Phillips, 1984). Gliessman (2000) acrescenta que o conceito de PC deve incluir também a necessidade de incorporar matéria orgânica ao solo e permitir o crescimento de raízes, pois estas condições são essenciais para garantir a sustentabilidade do sistema de PC, sob o ponto de vista econômico e ecológico.

O sistema PD surgiu, primeiramente, como meio de controlar ou reduzir a erosão do solo. Tem, como premissas básicas, a manutenção dos resíduos (palha) das espécies antecessoras na superfície do solo e o estabelecimento das culturas mediante mobilização de solo exclusivamente na linha de semeadura.

Com o surgimento de informações técnicas geradas pela pesquisa e o entendimento dos princípios científicos envolvidos, o PD passou a ser tratado como um sistema de exploração agropecuária, composto por um complexo ordenado de práticas agrícolas, interrelacionadas e interdependentes (Kochhann & Denardin, 2000). Desta forma, o conceito inicial de PD foi ampliado e passou a envolver também a diversificação de espécies cultivadas, via rotação de culturas

(Kochhann & Denardin, 2000), como forma de melhorar o aproveitamento dos nutrientes, as características físicas do solo e diversificar a matéria orgânica adicionada ao sistema, além do controle da erosão. Atualmente, o conceito de PD deve incluir resultados de outras áreas de conhecimento, como manejo das culturas, controle fitossanitário e variáveis agrometeorológicas, numa visão de monitoramento da dinâmica associada a esse sistema de manejo de solo.

A adoção do sistema PD, na essência, significa substituir processos mecânicos adotados em PC do solo por processos biológicos, como forma de proporcionar condições adequadas para o estabelecimento, crescimento e produção das plantas. A matéria orgânica, adicionada à superfície e o não revolvimento do solo criam condições para o surgimento e atuação da fauna do solo, produzindo um meio estruturado e pronto para receber a semente (Lal, 1991; Mielniczuk, 1997), o que terá reflexos na dinâmica dos fluxos associados ao mesmo.

A mudança de atitude começa por considerar o solo como um sistema complexo, trocando, permanentemente, matéria e energia com o meio na forma de um sistema aberto (Addiscott, 1995). Assim, o PD se aproxima de um conceito de desenvolvimento sustentável com redução de risco para a produção agrícola e melhoria das condições de vida da população ligada à agricultura e à população urbana.

2.2 Alterações de propriedades físicas do solo, associadas ao sistema de manejo do mesmo

O solo apresenta um arranjo espaço-temporal variável de seus constituintes, decorrente da ação de fatores pedo-climáticos que agem na sua formação e da própria evolução temporal, por ser um sistema complexo. A interferência antrópica desvia o curso natural dessa evolução e imprime uma nova dinâmica aos processos presentes no mesmo.

Qualquer forma de cultivo do solo altera suas propriedades físicas em relação àquelas em ambiente nativo (solo virgem) (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Anjos et al., 1994; Da Ros et al., 1997; Klein & Libardi, 2002; Costa et al., 2003). Após a interferência humana é, praticamente, impossível devolver-lhe as mesmas condições físicas que se encontram em ambiente natural. Entretanto, a forte degradação das mesmas pode ser evitada ou recuperada em diferentes

graus, por meio de práticas de manejo adequadas, à medida que se conhece suas interações com o meio, especialmente, a dinâmica dos fluxos no sistema solo-planta-atmosfera.

2.2.1 Densidade e porosidade do solo

Fisicamente, a densidade representa a razão entre a massa seca de uma amostra de solo e o volume ocupado pela mesma, na forma natural que é retirada do solo. Os espaços vazios entre os constituintes minerais e orgânicos constituem a porosidade do solo, que pode estar preenchida por ar ou água, em diferentes proporções ao longo do tempo.

A porosidade total do solo é formada por poros de diferentes tamanhos, os quais são divididos em três classes principais, que são a macroporosidade, a mesoporosidade e a microporosidade, cada qual cumprindo funções distintas no solo. Entretanto, na maioria dos trabalhos na literatura a discriminação de classes da porosidade não é feita desta forma. Normalmente, a mesoporosidade não é separada, ficando a mesma contabilizada na microporosidade do solo, a qual é considerada como porosidade de retenção de água, embora, nem toda essa água esteja disponível às plantas.

Os solos cultivados no sistema PD, em geral, sofrem compactação na superfície, devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas e uma consolidação natural pelo não revolvimento (Eltz et al., 1989). Estas condições aumentam a densidade e reduzem a porosidade total na camada superficial, comparada àquela do solo em PC que, tradicionalmente, é revolvida pelas operações de preparo (Derpsh et al., 1986; Tormena et al., 1998a; Ghuman & Sur, 2001).

A densidade do solo, normalmente é mais elevada em PD do que em PC, sendo esse aumento mais significativo até, aproximadamente, 0,2m de profundidade (Da Ros et al., 1997; Secco et al., 1997; Rojas & Van Lier, 1999; Stone & Silveira, 2001). No entanto, diferenças significativas na densidade e na porosidade do solo podem ocorrer até 0,3 ou 0,4m de profundidade, dependendo de como são manejados os sistemas de PD e PC, do tipo de solo, do histórico da área e como o PD foi iniciado (Da Ros et al., 1997; Ball-Coelho et al., 1998; Stone & Silveira, 2001).

A redução da porosidade total do solo em PD se dá, principalmente, pela diminuição da macroporosidade. Isto ocorre porque os poros de maior diâmetro são mais sensíveis ao processo de compactação, à medida que são submetidos à compressão colapsando mais facilmente do que aqueles de pequeno diâmetro. A compressão e o adensamento dos poros maiores promove o aumento da microporosidade, o que explica porque o solo em PD apresenta maior microporosidade do que em PC (Hill 1990; Da Ros et al., 1997; Corsini & Ferraudo, 1999; Schjonning & Rasmussen, 2000; Stone & Silveira, 2001). Por outro lado, em PC a porosidade total é mais elevada, também, devido ao revolvimento constante do solo no momento do preparo para a semeadura, o que eleva, principalmente, a macroporosidade. Isso mostra que, não necessariamente, ocorre redução da porosidade total em PD e, sim, que as diferenças ocorrem pelo aumento da mesma em PC (Da Ros et al., 1997; Stone e Silveira, 2001). O reflexo direto na alteração da relação entre macro e microporosidade (mesoporosidade) é o aumento da capacidade de retenção de umidade pelo solo em PD.

Embora as tendências relatadas acima sejam amplamente aceitas (Lima & Lima, 1995a), existem resultados que não correspondem às mesmas. Vários autores não encontraram diferenças significativas na densidade, porosidade total, macro e microporosidade entre o solo em PD e PC, após vários anos de cultivo nestes sistemas de manejo (Albuquerque et al., 1995; Da Ros et al., 1996; Costa et al., 2003). Estas propriedades podem, inclusive, apresentar tendência contrária; ou seja, a densidade pode ser menor e a porosidade total maior em PD do que em PC, em alguns tipos de solo (Anjos et al., 1994), principalmente, em experimentos com longa duração do manejo do solo em PD (Ismail et al., 1994).

Os resultados contraditórios, encontrados na literatura, podem ser atribuídos a várias causas, como às práticas de manejo adotadas (Hill, 1990), especialmente, a seqüência de cultivos empregados (Albuquerque et al., 1995). Entretanto, quase todos os trabalhos que tratam do assunto parecem unânimes em evidenciar que as alterações nas propriedades físicas estão muito mais associadas aos aspectos de evolução no solo de cada sistema de PD, em relação ao seu tempo anterior. Isto significa que a variabilidade entre PD e PC ocorre

pelas diferenças no modo de implantação dos sistemas de manejo e como o processo de evolução é alimentado.

Tal afirmação é suportada pelo fato de que o aumento da densidade e a redução da porosidade total do solo em PD aparecem, com maior frequência, nos primeiros anos de implantação do sistema, sendo que depois as mesmas tendem a fazer o caminho inverso (Douglas et al., 1980; Albuquerque et al., 1995). Isto ocorre porque a adição de matéria orgânica na superfície, com o tempo de utilização do PD favorece o desenvolvimento de uma estrutura do solo mais resistente à compactação e adensamento (Fernandes et al., 1983), ajudando a suportar fatores de estresse que são, periodicamente, aplicados sobre o mesmo. Além disso, os resíduos vegetais ativam a fauna do solo que, juntamente com a decomposição de raízes, formam bioporos, contribuindo para elevar a porosidade total e diminuir a densidade do solo em PD (Kay & VandenBygaart, 2002). Os bioporos, pela maneira como são formados e pelas características que apresentam, principalmente, deposição de matéria orgânica, são vias preferencias para o crescimento radicular e alojamento da fauna do solo. Isso confere maior resistência ao colapso natural dos mesmos.

Vários trabalhos mostraram que a contribuição do PD na melhoria das condições físicas é evidente, de forma mais significativa, naqueles solos com mais tempo de cultivo neste sistema de manejo (Voorhees & Lindstrom, 1984; Da Ros et al., 1996; Kay & VandenBygaart, 2002; Costa et al., 2003). Isto é ocasionado, principalmente, pela maior bioporosidade que os mesmos apresentam, a qual interliga o interior do solo com a superfície, permitindo trocas mais rápidas de energia e matéria com o meio (Griffith et al., 1992). Os benefícios do PD sobre a porosidade, segundo Voorhees & Lindstrom (1984), começam a aparecer a partir do quarto ano de implantação do sistema, e atingem o equilíbrio após o sétimo ano, com cerca de 4 a 5 % mais poros em relação ao sistema de PC (Corsini & Ferraud, 1999). De acordo com Kay & VandenBygaart (2002), a diferença na porosidade total entre o solo em PD e aquele em PC podem ser ampliadas, sendo bem mais consistente para períodos maiores do que 15 anos de utilização do sistema PD. Isso evidencia a forte dependência do fator tempo a ser considerado na análise das variações nas propriedades físicas do solo em PD, ao contrário do que é verificado em PC, cujo tempo de evolução é limitado entre uma e outra operação de preparo.

A intensidade com que ocorrem as diferenças na densidade e na porosidade do solo em PD e PC depende de outros fatores, além do tempo de implantação dos sistemas (Suwardji & Eberbach, 1998). São citados, por exemplo, que as práticas de manejo adotadas, como a rotação de culturas (Hill, 1990; Albuquerque et al., 1995; Tormena et al., 1998a), fatores químicos do solo, como adições elevadas de nutrientes, especialmente, o fósforo (Carvalho Junior et al., 1998; Silva et al., 2001a) condições climáticas, como a variabilidade das precipitações (Stone & Silveira, 2001), entre outros, afetam a densidade e a porosidade em distintos graus, determinando que ora sejam mais elevadas em PD, ora em PC. Em consequência disso, as variações nas propriedades físicas, ao longo do perfil do solo em PD ocorrem de forma distinta e com maior variabilidade em relação ao PC, principalmente, nas camadas superficiais (Souza, 1992). Segundo Diiwu et al. (1998), isso ajuda a explicar a grande diversidade de resultados encontrados na literatura, referentes à variação das propriedades físicas do solo em PD.

2.2.2 Infiltração de água no solo

As alterações na densidade e porosidade do solo em PD, em relação àquele em PC, influenciam diretamente a infiltração de água e a condutividade hidráulica neste sistema de manejo (Franzluebbers, 2002). Isto ocorre porque essas propriedades são intimamente associadas, pelo fato do movimento da água no solo depender, além do gradiente de Ψ_m , da $K(\theta)$ que, por sua vez, depende da estrutura porosa do meio, definida pela variação da densidade e da porosidade total.

A teoria que rege a infiltração explica que a entrada de água no solo é determinada, primeiramente, pelo gradiente de Ψ_m , que está associado à umidade do mesmo. Ao mesmo tempo, a entrada de água é controlada pela geometria porosa do meio. Em função disso, inicialmente, a taxa de infiltração é elevada, respondendo ao gradiente de Ψ_m , e com o tempo, diminui até se tornar constante quando o solo satura. Neste momento, a infiltração passa a ser função, quase que exclusivamente, da macroporosidade do solo e é denominada de infiltração básica, a qual pode ser definida como a quantidade máxima de água que o solo pode conduzir (Hillel, 1973; Reynolds et al., 1995). Tanto o gradiente

de Ψ_m quanto à geometria porosa do meio são modificados pelo PD, através do não revolvimento do solo e da presença da palha na superfície do mesmo.

Analisando o efeito dos sistemas de manejo sobre a infiltração de água, observa-se que, geralmente, ela é maior em PD do que em PC (Centurion & Demattê, 1985; Eltz, et al., 1989; Barcelos et al., 1999; Ghuman & Sur, 2001; Franzluebbbers, 2002; Alves Sobrinho et al., 2003). Isto é verificado apesar do PD apresentar, geralmente, menor macroporosidade e maior umidade no solo, as quais tenderiam a contribuir para menor infiltração, quando comparado com o PC, em que a umidade é menor e a macroporosidade é mais elevada. Entretanto, no caso do PD a infiltração de água depende, também, de outros fatores, que são determinantes da dinâmica deste processo, como o não revolvimento do solo e a presença de resíduos na superfície.

A manutenção dos resíduos na superfície do solo é uma das principais causas do aumento da infiltração de água em PD, pois absorve o impacto da gota de chuva e reduz o selamento superficial (Baumhardt, et al., 1993; Barcelos et al., 1999). O selamento é um fator de alta restrição à entrada de água no solo, por obstruir poros importantes ao fluxo, principalmente macroporos, oriundos do rearranjo natural do mesmo. Por isso, esse fator é altamente restritivo à entrada de água no solo em PC, sendo, na maioria das vezes, o responsável pela menor infiltração neste sistema de manejo.

A infiltração também é influenciada em PD pela presença dos canais formados pela fauna e pelo apodrecimento das raízes, que não são destruídos, ou pela continuidade que não é interrompida pelo preparo do solo. Estes bioporos proporcionam uma taxa de infiltração e um volume final de água infiltrado maior em PD do que em PC (Eltz et al., 1989; Azooz & Arshad, 1996), devido à manutenção da continuidade dos poros, a qual é quebrada pelas operações de preparo em PC (Maulé & Reed, 1993; Barcelos et al., 1999). Por conta destas modificações, ou seja, presença de bioporos e manutenção da continuidade dos poros, Roth et al. (1998) observaram que uma precipitação de 60mm infiltrou completamente no solo em PD, enquanto que, em PC, ela foi de apenas 20%, mesmo apresentando maior porosidade do que PD. Isto mostra que a atividade radicular e da fauna são parte integrante do sistema PD, contribuindo na alteração e/ou na manutenção da dinâmica dos fluxos neste sistema de manejo.

A infiltração de água no solo em PD pode ser até duas a três vezes mais elevada do que em PC (Dao, 1993; Franzluebbbers, 2002). Entretanto, isto nem sempre ocorre, pois muitos trabalhos mostram não haver diferenças significativas na taxa de infiltração entre o solo em PD e aquele em PC (Maulé & Reed, 1993; Souza & Alves, 2003). Além disso, a infiltração pode ser mais elevada em PC do que em PD (Steichen, 1984; Pelegrin et al., 1990; Anjos et al., 1994; Jones et al., 1994), dependendo das características dos respectivos sistemas de manejo e de fatores associados às formas de avaliação, entre outros.

O fato de muitos trabalhos não apontarem diferenças significativas na taxa de infiltração e/ou na infiltração acumulada, ou ainda, desta ser maior no solo em PD do que em PC, também pode estar relacionado ao tempo de utilização do PD. Segundo Dao (1993) e Arshad et al. (1999), o PD apenas contribui no aumento da taxa de infiltração de água após vários anos de sua implantação, o que concorda com as afirmações feitas por Corsini & Ferraudó (1999) e Kay & VandenBygaart (2002), sobre a contribuição do PD na porosidade do solo.

Para sistemas com menos de cinco anos, alguns autores (Lindstrom & Onstad, 1984; Unger, 1992) observaram que a infiltração pode ser similar entre o PD e o PC ou até menor em PD, devido à compactação inicial do solo e à falta da atividade biológica, condições que afetam negativamente a porosidade de condução de água. Além disso, os métodos utilizados nas medições (Eltz et al., 1989), o conteúdo inicial de água no solo (Baumhardt et al., 1993), a época de realização das medições (Pelegrin et al., 1990), a consolidação natural do solo em PD (Baumhardt et al., 1993), o tipo de sistema de PC realizado, as mudanças temporais na superfície e na macroporosidade, que ocorrem após as operações de preparo do solo (Maulé & Reed, 1993) e a declividade do terreno, entre outros fatores, determinam variações que nem sempre seguem a tendência expressa pela maioria dos trabalhos encontrados na literatura, ou seja, de infiltração maior em PD do que em PC. Isto, não permite identificar com clareza a contribuição desta propriedade quanto à sua influência na performance hídrica do solo de um ou de outro sistema de manejo.

2.2.3 Condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado

Quando a infiltração básica de água no solo é maior em um ou em outro sistema de manejo, indica que o mesmo apresenta também maior K_o , uma

vez que a taxa constante de infiltração é a própria K_o (Reichardt, 1986). Desta forma, a K_o também depende dos fatores que interferem na porosidade e na infiltração de água, principalmente, do não revolvimento do solo e da existência de bioporos, interligando vários pontos de diferentes condições físicas no interior do perfil e deste com a superfície. Em PD, o não revolvimento do solo e a existência de bioporos tornam a porosidade, de uma maneira geral, muito mais eficiente no transporte interno de água. Isto determina uma K_o mais elevada no solo deste sistema de manejo do que naquele em PC (Azooz & Arshad, 1996; Sing et al., 1996).

O aumento da K_o em PD não foi constatado por Maulé & Reed (1993) e Sing et al. (1996). Segundo esses autores, a K_o diminuiu na camada superficial do solo em PD, apresentando grande variabilidade em relação ao sistema de PC (Diiwu et al., 1998), seguindo tendência mostrada por Souza (1992), para algumas características físico-químicas. Esses resultados opostos, em relação àqueles apresentados por Azooz & Arshad (1996) e Sing et al. (1996), possivelmente, podem ser atribuídos às mesmas causas que influenciam a porosidade e a infiltração de água, como a redução das práticas de cultivo (Sheptukhov et al., 1997), aumento da atividade da fauna do solo e da maior continuidade dos poros (Sing et al., 1996), as quais, quando presentes, elevam a K_o do solo em PD, em relação ao PC.

Segundo Azooz & Arshad (1996), a $K(\theta)$, que é responsável pela movimentação da água no interior do solo quando este não está saturado, também é maior em PD do que em PC. Neste caso, os resultados são contrariados por Miller et al. (1998), que afirmam ter encontrado um decréscimo na $K(\theta)$ em PD, comparando ao PC, em função do efeito deste sistema de manejo sobre a porosidade do solo. A mesma tendência foi mostrada por Rojas & Van Lier (1999). Porém, observaram que, em menor umidade do solo, a $K(\theta)$ foi superior em PD, o que, possivelmente, seja reflexo da dependência desta à K_o , a qual também foi maior em PD. Desta forma, parece evidente que as contradições, quanto à variação da $K(\theta)$, estão relacionadas à questão da variabilidade da porosidade e também da condição de umidade do solo, sendo ambas modificadas pelas práticas de manejo do solo, como aquelas adotadas em PD (Azooz & Arshad, 1996).

A divergência entre os resultados apresentados na literatura, quanto à variação da condutividade hidráulica, se deve também a outros fatores que influenciam, de forma distinta, esta propriedade em PD e em PC. Uma variação estacional na $K(\theta)$ pode surgir de mudanças nas características estruturais do solo, densidade, porosidade, atividade biológica e das próprias precipitações estacionais (Sing et al., 1996; Suwardji & Eberbach, 1998), principalmente em PC, entre o período logo após o preparo do solo e poucas semanas depois, quando o mesmo apresenta uma acomodação natural. Isto significa que a variabilidade climática, associada às práticas de manejo do solo, pode ser importante fonte de variação do fluxo hídrico em um ou outro sistema de manejo e, desta forma, afetar direta ou indiretamente o balanço hídrico do solo. A esta gama de fatores, Azooz & Arshad (1996) acrescentam que a inconsistência dos resultados referentes às propriedades hidráulicas e físicas do solo em PD e PC pode estar relacionada à natureza transitória da sua estrutura após o cultivo, conteúdo inicial e final de água, história do local, tempo de amostragem e distúrbio do mesmo. Na afirmação de Azooz & Arshad (1996) está implícito o caráter evolutivo do sistema PD, demonstrando ser o tempo, uma variável de grande importância neste sistema de manejo do solo.

Conforme pode ser verificado, inúmeros e variados fatores estão relacionados às mudanças físico-hídricas do solo em PD, comparado ao PC, os quais se sobrepõem, tornando difícil separar o efeito de cada um (Lima & Lima, 1995b). Os resultados analisados parecem indicar que o efeito interativo do solo com os cultivos e a atmosfera pode ser mais importante do que os efeitos de um deles em separado (Hill et al., 1985). Além disso, é nítido que as alterações físicas refletem mudanças na forma, magnitude e frequências dos estresses impostos ao solo (Kay & VandenBygaart, 2002), condição que faz com que os solos manejados em PD adquiram condicionamentos físicos diferentes daqueles em outros sistemas de manejo, como o PC (Reinert et al., 1984).

2.3 Retenção de água no solo

Várias propriedades do solo que afetam o conteúdo e a energia de retenção de água dependem diretamente do teor de umidade do mesmo. Entre essas propriedades, incluem-se as mecânicas como: consistência, friabilidade, e resistência à penetração radicular; físicas como: densidade e distribuição do

tamanho de poros; biológicas como: atividade de raízes e microorganismos; químicas como: potencial de oxiredução (Sheptukhov et al., 1997), além de outras propriedades importantes (Gavande, 1973; Hillel, 1982). A influência da umidade sobre estas propriedades é distinta de solo para solo, devido, principalmente, às variações de textura, estrutura e matéria orgânica dos mesmos (Baver et al., 1991), condições que, para um determinado solo, são afetadas pelas práticas de manejo adotadas, como aquelas vinculadas ao PD (Carpenedo & Mielniczuk, 1990).

A retenção de água no solo depende de dois fenômenos, que são a capilaridade e a adsorção. A capilaridade está ligada à afinidade das partículas de solo com a água. Necessita da formação de um menisco para atuar, que apresenta curvaturas diferenciadas de acordo com o tamanho dos poros. A adsorção corresponde a uma atração entre a parte sólida do solo e a água, na forma de um filme de água. Atua, principalmente, quando os poros já estão vazios, sendo, portanto, mais importante à medida que ocorre a secagem do solo. Nestas condições, a energia de retenção é muito maior do que no caso da capilaridade, o que aumenta o grau de dificuldade para retirada de água pelas plantas (Gavande, 1973; Reichardt, 1986).

No solo, a energia de retenção da água e seu conteúdo, em base de volume de massa, são expressos pela curva característica de retenção de água, que apresenta formato diferenciado entre os processos de secagem e umedecimento (Hillel, 1998). A relação entre o Ψ_m e a umidade pode ser descrita por equações como a de Van Genuchten (1980), que possibilita estimar uma variável em relação à outra. Estas equações são práticas e úteis no estudo das relações hídricas do solo, porém, sua aplicação deve ser criteriosa em função das mesmas apresentarem variações de solo para solo e alterações no espaço e no tempo, de acordo com mudanças nas propriedades físicas do mesmo, como a umidade (fenômeno da histerese) (Moraes et al., 1993; Hillel, 1998; Tormena & Silva, 2002).

Com base no ajuste da equação de Van Genuchten (1980), Rojas (1998) e Rojas & Van Lier (1999) compararam curvas características de retenção de água no solo em PD e PC. Os autores observaram diferenças significativas entre os respectivos sistemas de manejo, com maior retenção de água em PC, em praticamente todos os potenciais avaliados e em distintas camadas de solo.

Diferenças entre curvas características de água também foram observadas por Hill et al. (1985). Porém, a maior retenção ocorreu em PD, em todos os potenciais avaliados e em dois locais distintos. A mesma tendência foi verificada por Sidiras et al. (1983), num Latossolo Roxo no Paraná, cujo total de retenção de água, em PD, foi de 4 a 5% mais elevado que em PC. Por outro lado, Tormena & Silva (2002) e Xu & Mermonud (2003) não observaram influência significativa entre PD e PC no ajuste das curvas características de água no solo, indicando mesma capacidade de retenção entre os respectivos sistemas de manejo.

A diferença na retenção de água de um solo em PD, em relação a outro em PC, se deve, basicamente, às alterações nas propriedades físicas dos mesmos. A elevação na capacidade de retenção de água em PD, normalmente, ocorre pelo aumento da porosidade de retenção (meso ou microporosidade) (Rojas & Van Lier, 1999). Entretanto, o aumento da matéria orgânica, na camada de solo mais próxima à superfície, também contribui para elevar o teor de umidade, devido à sua maior capacidade de hidratação e de retenção de água (Model et al., 1995) e seu efeito sobre as propriedades físicas (Carpenedo & Mielniczuk, 1990). No caso do PC, o aumento da umidade mais próximo à superfície pode estar relacionado à formação de uma camada subsuperficial compactada, que impede a percolação da água no perfil, retendo maior quantidade de água no solo até o ponto em que ela se encontra localizada (Centurion & Demattê, 1985).

A relação entre as curvas características de retenção de água e as propriedades físicas do solo é bem conhecida e suportada por bases físicas consolidadas (Hill, 1990), o que torna possível tomá-las como indicadoras da condição hídrica do solo. Segundo Hill (1990), o Ψ_m da água no solo está intimamente relacionado à quantidade, distribuição e continuidade dos poros de um dado tamanho e sua habilidade em reter água. Estas condições são melhoradas pelo PD, devido à maior estabilidade de agregados e formação de bioporos pela fauna do solo e pelo apodrecimento das raízes (Sheptukhov et al., 1997). Portanto, com o tempo, o solo em PD tende a apresentar maior retenção de água do que em PC, podendo resultar em maior disponibilidade de água às plantas cultivadas naquele sistema de manejo, diminuindo riscos de redução de safras, por exemplo, por curtas estiagens.

Embora o efeito do PD no solo seja largamente verificado, o benefício sobre algumas propriedades não é imediato. Considerando afirmações de Voorhees & Lindstrom (1984), a respeito da variação da porosidade em PD, a superioridade apresentada por este sistema de manejo na armazenagem de água, em relação ao PC pode ser esperada apenas a partir do quarto ano de sua implantação, conforme observado por Norwood (1994) e Sheptukhov et al. (1997). Entretanto, este período pode ser ainda maior, segundo argumentação de Kay & VandenBygaart (2002), para quem são necessários, no mínimo, 15 anos para o PD apresentar resultados consistentes quanto à melhoria da porosidade do solo e, portanto, aumentar a retenção de água. Em resumo, a condição hídrica do solo em PD depende do processo de evolução inserido em cada sistema de manejo e de todas as variáveis intervenientes que atuam ao longo do tempo.

2.4 Disponibilidade de água às plantas

A disponibilidade de água às plantas não está, necessariamente, relacionada de forma direta com a capacidade de armazenagem do solo. Enquanto a armazenagem máxima é determinada pelo espaço poroso, a água disponível às plantas é apenas uma parte do volume total que o solo armazena. A quantidade de água que as plantas podem dispor encontra-se dentro de certos limites, classicamente denominados de CC (capacidade de campo) e PMP (ponto de murcha permanente). Esses limites dependem de muitos fatores intrínsecos ao solo, como a textura, e de outros que são modificados pelo manejo, como a estrutura e a porosidade. Por isso, são variáveis no espaço e no tempo, dependendo da condição em que são avaliados.

Os limites de CC e PMP são utilizados, de longa data, em estudos das relações hídricas do solo e, deste, integrado com as plantas que crescem na superfície. Estes limites, embora muito empregados ainda hoje, foram criticados por vários estudos (Ritchie, 1981; Ratcliff et al., 1983; Reid et al., 1984) sob a argumentação de que as plantas podem retirar água do solo a potenciais matriciais menores do que $-1,5\text{MPa}$ e maiores do que $-0,033\text{MPa}$, $-0,01\text{MPa}$ ou $-0,006\text{MPa}$ (Reichardt, 1988). Ainda, relatam que, freqüentemente, as determinações laboratoriais da CC e PMP não conferem com os valores obtidos a campo, devido à grande variabilidade espacial do solo, principalmente, das propriedades físicas. Entretanto, os mesmos são úteis sob o ponto de vista prático

para fins de avaliação agroclimática, de deficiência ou excessos hídricos, e para o planejamento de doses e do ponto de rega, entre outras aplicações (Bergamaschi et al., 1992).

Considerando que os limites de CC e PMP dependem das propriedades físicas do solo e, que estas são alteradas pelo PD, é fácil supor que sua variação, para um mesmo tipo de solo, ocorre apenas alterando o tipo de manejo. Diante disso, dependendo do grau em que as propriedades físicas são afetadas, a superioridade do PD em garantir melhor retenção de água pode não se refletir em maior disponibilidade às plantas se a quantidade adicional de água armazenada encontra-se em potenciais menores daquele em que as plantas conseguem extrair (-1,5MPa). Esta tendência foi constatada por Tollner et al. (1984), em que a disponibilidade de água às plantas foi menor em PD apesar de ter apresentado maior armazenagem do que no solo em PC. Já, Van Ouwerkerk & Boone (1970) verificaram que a disponibilidade de água às plantas foi semelhante entre os sistemas de manejo, embora o PD tenha apresentado maior retenção do que o solo em PC.

A falta de uma relação direta entre retenção e disponibilidade de água está ligada às diferenças de propriedades físicas, estrutura e porosidade do solo (relação macro e microporos) entre os sistemas de manejo. Essa diferença nas propriedades físicas pode deslocar, de forma diferenciada, os limites de CC e PMP, ou aumentar a quantidade de poros numa faixa cuja água retida não se encontrará disponível para as plantas.

Apesar de haver resultados divergentes, a maioria dos trabalhos na literatura sobre o assunto aponta para uma superioridade do PD, em relação ao PC em termos de armazenagem e disponibilidade de água às plantas (Sidiras et al., 1983; Centurion & Demattê, 1985; Nesmith et al., 1987; Norwood, 1994; Salton & Mielniczuk, 1995; Drury et al., 1999; Silva et al., 2001b; Lampurlanés et al., 2001). Isso é constatado, principalmente, em sistemas que apresentam mais tempo de utilização, possivelmente, pelo efeito de longo prazo que o PD tem sobre a densidade e, principalmente, sobre a porosidade do solo (Corsini & Ferraudó, 1999; Kay & VandenBygaart, 2002).

As diferenças de disponibilidade de água em PD e em PC são mais significativas na camada próxima à superfície, sendo mais freqüentes quando o solo se encontra em processo de secagem avançado (Bragagnolo & Mielniczuk,

1990a; Fortin, 1993; Sauer et al., 1996). Neste caso, a água encontra-se mais na dependência de forças de adsorção do que de capilaridade (Centurion & Demattê, 1985), o que torna mais difícil a absorção pelas plantas no solo mais seco, como na grande maioria dos casos verificados em PC. Entretanto, alguns autores observaram que as maiores diferenças na retenção de água, entre os respectivos sistemas de manejo, são mais perceptíveis quando o solo apresenta teor elevado de umidade (Centurion & Demattê, 1985), especialmente após eventos importantes de precipitação, por causa do maior espaço de armazenagem que o mesmo apresenta em PD (Lampurlanés et al., 2001). Nesta situação, em ambos sistemas de manejo as plantas não sofrem restrição ao processo de absorção, a menos que a aeração ao nível das raízes seja reduzida drasticamente em um ou outro sistema de manejo.

O aumento da retenção de água no solo em PD, em relação aquele em PC, normalmente, é da ordem de 4 a 5% (Sidiras et al., 1983, Drury et al., 1999; Lampurlanés et al., 2001), podendo variar de cerca de 1% (Drury et al., 1999) até 10% (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990b). Ao longo do ciclo de uma cultura, esse aumento pode garantir em torno de 30 a 40% mais água disponível às plantas em PD, em relação ao PC, conforme observado por NeSmith et al. (1987) para a camada 0 a 0,1m de solo e por Sidiras et al. (1983) para a camada de 0 a 0,2m de profundidade. Tal condição também foi observada para a cultura do milho por Zhai et al. (1990), em que o PD manteve maior quantidade de água disponível às plantas ao longo do ciclo, quando comparado ao PC. Em todas as situações, as diferenças de disponibilidade de água entre os sistemas de manejo foram atribuídas às melhores condições de armazenagem proporcionadas pelo PD, como a melhoria da estrutura e da porosidade do solo (Centurion & Demattê 1985).

O incremento na armazenagem de água pelo PD pode não resultar em respostas positivas para algumas culturas, pois o sistema afeta outros fatores ligados à produção. Lyon et al. (1998) verificaram que o aumento de umidade no solo em PD não proporcionou incrementos na produção do trigo, devido à menor disponibilidade de nitrogênio que ocorre em PD (Doran et al., 1998). Porém, a utilização do PD em combinação com cultivos freqüentes em rotação aumenta a eficiência de uso da água (Baumhardt et al., 1985; Peterson et al., 1996; Sheptukhov et al., 1997) e pode aumentar também a eficiência do nitrogênio, já

que esse nutriente apresenta relação direta e positiva com o aumento da disponibilidade de água (França, 2003), promovida pelo PD. Esta é a condição buscada na atividade agrícola, a fim de garantir sustentabilidade tanto sob ponto de vista econômico quanto ecológico.

O aumento da armazenagem de água no solo em PD, mesmo que pequeno em relação ao PC assume especial importância também por outros motivos. Para culturas sensíveis ao déficit hídrico e que possuem um período crítico bem definido, como o milho, pequenos acréscimos de umidade no solo, neste período, pode garantir rendimentos satisfatórios, reduzindo flutuações, normalmente verificadas em lavouras em PC, em períodos de estiagem. Munawar et al. (1990) observaram que o aumento na armazenagem de água em PD, provavelmente, foi o fator que aumentou o rendimento da cultura do milho nos anos de 1985 e 1986, em relação ao PC. Esta constatação também foi feita por Webber III et al. (1987), para os quais o rendimento da soja foi maior em PD do que em PC, em períodos com precipitação menor do que a necessária para a cultura. Portanto, uma maior quantidade de água disponível, ao longo do tempo, pode ajudar as culturas a enfrentar períodos curtos de estiagem, sem grandes perdas no rendimento final (Sidiras et al., 1983).

Estes resultados concordam com a afirmação de Lindwall et al. (1995) de que o PD é mais benéfico às culturas quando as precipitações são abaixo da normal, proporcionando melhores condições hídricas, apesar das diferentes influências na estrutura do solo, parâmetros físico-hídricos e estrutura do espaço poroso, em relação ao PC (Sheptukhov et al., 1997). Segundo Bragagnolo & Mielniczuk, (1990b), em curtas estiagens, esse benefício é alcançado com 5,0Mg ha⁻¹ a 7,5Mg ha⁻¹ de palha adicionada à superfície, quantidades que podem ser obtidas pelos produtores em lavouras.

O aumento na retenção e disponibilidade de água às plantas pelo solo em PD, tanto na camada mais próxima à superfície quanto em profundidades maiores (até 1,0m, segundo Johnson et al., 1984), são atribuídas, basicamente, a duas causas. A primeira é a barreira formada pelos resíduos que reduz a evaporação da água na superfície (Munawar et al., 1990; Hatfield et al., 2001; Baumhardt & Jones, 2002), condição que, na prática, nem sempre ocorre, quando a evaporação é medida no campo (Dalmago et al., 2003a). A outra causa é a modificação da geometria porosa do solo (Lindstrom et al., 1984; Tollner et al.,

1984; Hill et al., 1985; Bragagnolo & Mielniczuk, 1990a), que também é coerente sob o ponto de vista da física do solo e que, talvez, seja aquela que apresenta maior contribuição. Entretanto, o maior efeito na manutenção de uma condição hídrica mais favorável no solo em PD, segundo Baumhardt & Jones (2002), ocorre quando ambos fatores são combinados, ou seja, quando a quantidade de água armazenada é aumentada e a perda por evaporação é reduzida.

Alguns trabalhos evidenciam que a diferença na armazenagem da água pode estar associada também à infiltração mais elevada no solo em PD (NeSmith et al., 1987), bem como à quantidade e distribuição da palha sobre o mesmo (Munawar et al., 1990) e à extração de água pelas plantas (NeSmith et al., 1987), que varia de acordo com a espécie cultivada (Norwood, 1994) e o tempo em que são realizadas as medições. Todas essas causas apresentam embasamento físico que pode explicar diferenças na disponibilidade de água no solo entre PD e PC. Porém, na grande maioria das vezes, são conseqüências de outras características, como: distintas condições de manejo, teor de matéria orgânica, tempo de utilização dos sistemas, metodologia de amostragem adotada e espessura da camada amostrada, que aumentam as variações entre sistemas (Silva et al., 2001b). Além disso, as condições meteorológicas no período avaliado podem ampliar a variabilidade entre o PD e o PC, uma vez que a extração de água e a própria secagem do solo dependem das mesmas.

O aumento na armazenagem de água pode ser caracterizado de várias formas. A mais simples é a coleta de amostra para determinação do teor de umidade em base gravimétrica. Outra maneira é dispor de sensores que medem diretamente a quantidade de água do solo, através de diferentes princípios físicos. Nos dois casos é fornecida a quantidade total de água que o mesmo apresenta no momento, mas não a energia com que ela se encontra retida na matriz do solo. Isto é conseguido medindo-se o potencial da água no solo através de tensiômetros, o qual expressa, de forma mais coerente, o estado termodinâmico do sistema. A representação do estado hídrico do solo com base no potencial da água tem um significado físico consistente e está relacionado ao estado energético da água na planta e na atmosfera (Bergamaschi et al., 1992).

Avaliações da condição hídrica do solo em termos de Ψ_m , em PD e PC, são apresentadas por alguns trabalhos (Salton & Mielniczuk, 1995; Azooz & Arshad, 1996; Sing et al., 1996). Os autores identificaram diferenças significativas

entre os respectivos sistemas de manejo, mostrando que o Ψ_m é um indicador da capacidade de armazenagem de água que o solo apresenta, independente do sistema de manejo (Azooz & Arshad, 1996). A diferença na retenção de água entre os sistemas de manejo foi observada em toda a faixa de água disponível (-0,006MPa a -1,5MPa), sendo maior ora em PD ora em PC, e muito dependente da profundidade avaliada (Salton e Mielniczuk, 1995; Sing et al., 1996).

Segundo Salton & Mielniczuk (1995), a água retida no solo nos potenciais de -0,006MPa; -0,03MPa; -1,5MPa foi semelhante até 0,4m de profundidade nos dois sistemas de manejo decorrentes da semelhança na porosidade do solo, especificamente da relação entre macro e microporosidade. Após um mês sem precipitações, todo o perfil do solo (até 0,4m) em PC estava com a água em potenciais abaixo de -1,5MPa, enquanto o PD apresentava potenciais na faixa de disponibilidade de água às plantas, nas profundidades abaixo de 0,2m, indicando permanência do efeito dos sistemas de manejo, mesmo após longo período de estiagem (Salton & Mielniczuk, 1995).

2.5 Extração de água do solo pelas plantas

A extração de água do solo é o processo que resulta da interação de fatores do sistema solo-planta-atmosfera. Por isso a separação da contribuição de cada componente do conjunto é muito difícil, pois, além de atuarem ao mesmo tempo, são interdependentes em maior ou menor grau, de acordo com a escala de variação de um ou de outro fator.

A disponibilidade e a energia de retenção da água no solo limitam a maior parte da extração de água pelas plantas. Este limite pode ser ampliado ou reduzido de acordo com as condições oferecidas para o crescimento radicular, como disponibilidade de oxigênio e resistência do solo à penetração das raízes (Tormena et al., 1998a). A planta determina a velocidade de extração de água do solo, a qual é variável ao longo do tempo em função do crescimento da área foliar e do sistema radicular. Já, o controle da taxa de extração é feito pela demanda evaporativa da atmosfera, que é função das condições meteorológicas, as quais apresentam grande variabilidade espaço-temporal (Denmead & Shaw, 1962; Forsythe, 1967).

A absorção de água pelas plantas é afetada por inúmeros fatores que atuam de forma direta ou indireta sobre características do sistema solo-planta-

atmosfera, criando uma dependência espaço-temporal da mesma (Li et al., 2001). Vários desses fatores foram apresentados por Reichardt (1986) e se referem à eficiência e desenvolvimento do sistema radicular (extensão, profundidade e idade), condições de demanda evaporativa atmosférica (radiação solar, temperatura, umidade e vento) e propriedades físicas do solo (capacidade de água disponível, $K(\theta)$ e aeração).

No caso do solo, muitos destes fatores são afetados pelo sistema PD e variam com a profundidade no perfil (Annandale et al., 2000). Estes fatores são os principais responsáveis pelas diferenças em relação ao sistema de PC, quando os dois sistemas de manejo são comparados em pequenas áreas, em que as condições meteorológicas são semelhantes. Valores de quantidade de água mais elevados em PD, em relação a aquele em PC, foram encontrados para as culturas de soja (Sidiras et al., 1983; Webber III et al., 1987), milho (Munawar et al., 1990; Drury et al., 1999; Norwood, 1999), cevada (Izaurre et al., 1994) e trevo vermelho (Drury et al., 1999), com diferentes graus de variação de acordo com a espécie, condições de solo e demanda hídrica atmosférica.

Kramer & Boyer (1995), numa tentativa de simplificar o entendimento da extração de água pelas plantas, classificaram os fatores influentes em dois grupos. O primeiro reúne aqueles que afetam a resistência do movimento da água através do solo, basicamente composto por propriedades físicas do mesmo. O segundo é composto pelos fatores que afetam o gradiente do potencial da água entre o solo e a raiz, englobando também características das plantas e condições atmosféricas, numa referência vaga e indireta ao contínuo solo-planta-atmosfera.

Embora concordando com as afirmações acima, Passioura (1988) observa que a retirada de água do solo depende muito mais da interação entre os fatores que afetam a mesma, do que de alguns em separado. Segundo esse autor, a extração da água pelas plantas depende da ocupação preferencial de poros maiores e contínuos pelas raízes e da habilidade das mesmas em manter a continuidade hidráulica com o meio, a fim de assegurar o sistema conectado, no maior tempo possível. Assim, a retirada de água pelas plantas pode ser definida como um processo dinâmico modulado por condições do solo, da planta e meteorológicas (Homae et al., 2002), o que evidencia o aspecto de variação espaço-temporal mencionado por Li et al. (2001).

Basicamente, dois modelos podem ser utilizados para descrever a dinâmica da água no contato solo-raiz e absorção pelas plantas. O modelo microscópico considera o fluxo individual das raízes, dando ênfase ao efeito das propriedades do solo na absorção de água (Zhuang et al., 2001), o que se aproxima mais da visão apresentada por Kramer & Boyer (1995). O outro modelo é macroscópico, em que o conjunto do sistema radicular é considerado como fator de extração de umidade de cada ponto da zona radicular (Zhuang et al., 2001), em detrimento da contribuição individual das raízes, sendo, portanto, mais próximo do posicionamento de Passioura (1988). Nos dois casos, o controle da absorção de água é realizado pela taxa de transpiração (Kramer & Boyer, 1995), que tende a ser semelhante à absorção, principalmente nas altas taxas, quando a água para o crescimento pode ser desconsiderada (Brunini & Thurtell, 1998). Porém, o aumento da taxa de transpiração reduz a eficiência de extração de água pelas raízes, devido aos elevados gradientes de potencial formados entre camadas de solo e entre o solo e as raízes (Van Lier, 1997), condição que é verificada em alta demanda evaporativa da atmosfera (Denmead & Shaw, 1962).

A resistência do solo à absorção de água começa a ser fator mais limitante ao transporte da mesma no sistema solo-planta-atmosfera em potenciais menores do que $-0,600\text{MPa}$, enquanto acima deste limite as resistências da planta são mais determinantes (Brunini & Thurtell, 1998). Se a transpiração do dossel é potencial, conforme ocorre logo após uma precipitação ou irrigação, e a demanda evaporativa não for muito elevada, a distribuição da extração da água é determinada pela distribuição da massa de raízes no solo (Novák, 1987; Li et al., 2002). No caso em que o Ψ_m é menor do que esse valor crítico, a transpiração é menor do que a máxima possível e é proporcional ao Ψ_m (Novák, 1987). Reid & Huck (1990) mostram que a distribuição do Ψ_m no perfil do solo afeta significativamente o modelo de extração de água pelas plantas, uma vez que a água é extraída de camadas mais profundas no perfil, sempre que o Ψ_m da respectiva camada considerada diminui.

A distribuição das raízes ao longo do perfil é parâmetro essencial para a descrição da absorção de água nos diferentes horizontes, podendo alterar o padrão da mesma, em momentos de secagem do solo (Bréda et al., 1995). Na camada superficial a massa de raízes, numa condição de suficiente umidade no

solo, tem uma forma de distribuição exponencial com decaimento em função da profundidade (Novák, 1987). O decréscimo da densidade radicular com a profundidade é altamente relacionado às propriedades físicas do solo, as quais determinam que as maiores profundidades sejam exploradas, principalmente por raízes finas, que requerem menos gasto de energia na sua formação (Bréda et al., 1995). No entanto, de acordo com Schmidhalter et al. (1994) e Dalton (1995), é mais importante conhecer a atividade das raízes do que meramente sua distribuição no perfil, por estar mais associado com a eficiência de absorção de água.

Através de modelos, Van Lier (1997) descreveu a extração de água do solo por raízes, comprovando a ocorrência de zonas de esgotamento da umidade próximo às raízes, em função da absorção que foi realizada. No caso do milho, os modelos também comprovaram que as raízes próximas à base da planta são mais efetivas na absorção de água do que aquelas localizadas na entre-linha (Li et al., 2002). Ao mesmo tempo, os autores demonstram que há uma pequena vantagem para as plantas que tem distâncias menores entre as raízes (Van Lier, 1997), condição que ocorre quando o sistema radicular estiver mais concentrado. Porém, há evidências de que a extração pelas plantas é facilitada em solo com maior $K(\theta)$ (Van Lier, 1997), permitindo que se formem padrões laterais e descendentes de extração de água, conforme a variabilidade da $K(\theta)$ (Li et al., 2002). Considerando que o PD altera a distribuição do sistema radicular, concentrando-o mais próximo à superfície (Mello Ivo & Mielniczuk, 1999) e que, também, propriedades hídricas como a $K(\theta)$ são alteradas, pode-se esperar variações no padrão de extração de água entre os dois sistemas de manejo. Segundo Pelegrin et al. (1990), alteração na retirada de água do solo pelas plantas em PD, quando comparado ao PC, deve-se também às características de retenção dos sistemas de manejo que, por fim, influenciam o crescimento radicular e a $K(\theta)$.

As diferenças na extração de água que ocorrem entre os sistemas de manejo são ampliadas ou reduzidas, também, em função da espécie cultivada, devido às diferenças no crescimento radicular (Pelegrin et al., 1990; Cabelguenne & Debaeke, 1998) e da área foliar. Segundo Cabelguenne & Debaeke (1998), das cinco culturas estudadas (milho, girassol, soja, sorgo e trigo), o milho é a que

extraiu água das camadas mais próximas à superfície (0,5m) e, como as demais espécies, conseguiu fazê-lo, inclusive, a potenciais abaixo de $-1,5\text{MPa}$. Isto levou os autores a concluir que o uso da água é muito diferente entre as espécies, sendo dependente de vários fatores genéticos e atmosféricos, que interferem na eficiência de absorção e de utilização da mesma.

Com relação ao efeito dos sistemas de manejo do solo, Grevers et al. (1986) observaram que a retirada de água do solo pelo trigo, durante a estação de crescimento, seguiu essencialmente o mesmo modelo em PD e PC, o que não significa que a quantidade de água retirada tenha sido a mesma. De acordo com Norwood (1999), a extração foi maior no sistema PD do que em PC, principalmente nas maiores profundidades no perfil (0,9m a 1,2m de profundidade) em, pelo menos, um dos anos analisados. Esta tendência também foi verificada por Chaudhary et al. (1991) para a cultura do trigo, o que foi atribuído ao aumento do desenvolvimento do sistema radicular em PD (Ehlers et al., 1991).

Nos trabalhos de Norwood (1999) o aumento da extração de água em PD foi verificado em apenas dois dos cinco anos avaliados e para todas as espécies estudadas (milho, sorgo, girassol e soja). Isto permite inferir que, em média, as plantas em PD extraem menos água do que em PC. Quando isso acontece, normalmente, é devido à dificuldade no acesso à mesma pelo impedimento do próprio solo ou pela redução do crescimento radicular em PD (Chaudhary et al., 1991), o que torna as plantas em PD muito mais suscetíveis a uma condição de déficit hídrico. Entretanto, esta diferença, em relação ao PC, pode ser compensada pelo freqüente suprimento de água pelas precipitações (Chaudhary et al., 1991).

Outros resultados apresentados por Grevers et al. (1986) mostram que a redução de umidade do solo sob cultivo de trigo, em PC, foi substancialmente maior do que em PD, principalmente, até os primeiros 0,4m de profundidade. Abaixo deste limite, praticamente não houve variação de umidade nos dois sistemas de manejo, provavelmente, em função de não ter sido alterada a capacidade de armazenagem pelo PD. Na mesma linha, Hundal & Dedatta (1984) também observaram que a extração de água pelo sorgo foi maior em PD que em PC, embora as diferenças não tenham sido significativas. A superioridade do PD

resultou, provavelmente, do maior comprimento e densidade radicular neste sistema, conforme verificado por Hundal & Dedatta (1984).

A maior habilidade na extração de água pelas espécies em PD garantiu o estabelecimento de um estresse menos intenso, em relação ao PC (Norwood, 1999). Esta condição, associada à alternância de resposta dos sistemas de manejo entre sucessivos anos de cultivo (Norwood, 1999) e ao efeito das diferentes espécies cultivadas na extração de água (Cabelguenne & Debaeke, 1998), evidencia a forte influência das condições meteorológicas e da área foliar das espécies na condução deste processo. Ao mesmo tempo, reforçam a idéia de que tanto a retenção quanto à disponibilidade de água às plantas e a própria retirada do solo, são processos dinâmicos e resultantes da interação de vários fatores, construída ao longo do tempo.

2.6 Evaporação da água na superfície do solo

2.6.1 Princípio físico

A evaporação na superfície do solo é um processo puramente físico, que consiste na passagem da água do estado líquido para o gasoso. A mudança de estado ocorre com o aumento da energia cinética das moléculas até a quebra da energia de ligação molecular, conhecida como forças de London-van der Waals ou, simplesmente, forças moleculares de coesão (Ometto, 1981; Libardi, 1995).

As forças de tensão superficial, que impedem que as moléculas de vapor d'água escapem para a atmosfera, são vencidas quando a energia interna de agitação das mesmas for maior do que a energia de ligação molecular na superfície evaporante. Isto é alcançado quando são fornecidas cerca de 590 calorias por grama de água a ser evaporada, à temperatura de 15º C. As moléculas de água, assim acionadas, quebram as ligações que as mantêm unidas e saem do sistema, carregando consigo esta energia na forma de calor latente de evaporação (Ometto, 1981).

A fonte da energia consumida na evaporação natural seja de uma superfície de água livre ou diretamente do solo, é a radiação solar. O fenômeno também é condicionado pela temperatura e déficit de saturação do ar e pela velocidade do vento junto à superfície, os quais, juntamente com a radiação solar, formam a demanda evaporativa da atmosfera, normalmente considerada como

variável representativa das condições meteorológicas. Assim, a evaporação é um processo exclusivamente de superfície, mas dependente das propriedades físicas da matéria umedecida, por exemplo, o solo, quando não se trata de superfície de água livre (Ometto, 1981). Vista desta forma, a evaporação da água na superfície é altamente limitada pela energia que chega à mesma, se não houver outro fator restritivo ao fluxo hídrico.

Para que ocorra o processo de evaporação da água do solo e o mesmo seja mantido ao longo do tempo, são necessárias três condições. Primeiro, a superfície deve ser, continuamente, suprida de energia e, em seguida, deve haver uma diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar (segunda condição). Estas duas condições são determinadas pelas variáveis meteorológicas (Hillel, 1973) e são influenciadas pelas características da superfície, como a cor e a rugosidade, que reduzem a quantidade de energia disponível e a velocidade do vento próximo a mesma (Ometto, 1981).

A terceira condição é que deve haver um suprimento contínuo de água do interior do solo à superfície, onde ocorre a evaporação. Esta condição depende do Ψ_m e das condições de transferência do meio, como a $K(\theta)$, para que, juntos, consigam manter uma taxa máxima de perda de água por evaporação (Hillel, 1973). Portanto, o suprimento de água para a evaporação é dependente das propriedades físicas do solo, principalmente, estrutura, densidade e porosidade. Estas, por sua vez, influenciam a dinâmica da água no solo e são modificadas pelo PD, através do não revolvimento e da manutenção da palha na superfície.

A evaporação da água do solo apresenta três estágios distintos, que se sucedem ao longo do tempo de secagem do mesmo (Lemon, 1956; Idso et al., 1974). No estágio um, quando a superfície está úmida, a taxa de evaporação é elevada, constante e independente da umidade do solo. Neste período, a perda de água depende das condições de demanda evaporativa da atmosfera rente ao solo (Reichardt, 1996). O fluxo capilar de água no perfil é suficiente para manter a superfície úmida, a fim de atender à demanda, favorecendo a rápida perda de água (Lemon, 1956).

A evaporação entra no estágio dois quando começa a se estabelecer uma resistência ao fluxo de água do interior do solo à superfície, pelo decréscimo da umidade e da $K(\theta)$ (Phillips, 1984). Em conseqüência, ocorre uma rápida

redução da taxa de perda de água com o tempo. As condições atmosféricas logo acima da superfície perdem importância em relação aos fatores intrínsecos do solo, que governam a taxa de perda de água para a atmosfera (Lemon, 1956; Reichardt, 1996). O fluxo capilar, a transferência de vapor e a combinação dos dois processos na condensação capilar dominam o processo de evaporação neste estágio (Lemon, 1956), cuja taxa de perda de água é função linear da umidade média do perfil do solo (Reichardt, 1996). Segundo Idso et al. (1974), neste estágio, a evaporação se mantém até a umidade na superfície do solo alcançar um valor crítico, o qual pode variar entre solos.

O estágio três se inicia quando a relação entre a taxa de evaporação e a umidade média do solo perder a linearidade estabelecida no estágio dois e o solo se encontra bem mais seco. O mesmo se caracteriza por um movimento bastante lento da água no solo, decorrente da baixa $K(\theta)$, principalmente, na fase de vapor (Reichardt, 1996). A taxa de perda de água é extremamente lenta e governada pelas forças adsorptivas, equivalentes à distância molecular da interface sólido-líquido (Lemon, 1956), mais precisamente, da primeira e segunda camada molecular de água ao redor das partículas de solo (Idso et al., 1974). No estágio três, a evaporação ocorre no interior do solo e o transporte da umidade para a atmosfera é feito por difusão de vapor, que é mais lento do que seria a perda de água na superfície (Lemon, 1956).

Os estágios em que foi dividida a evaporação da água do solo (Lemon, 1956) foram, inicialmente, questionados por Idso et al. (1974), sob alegação de que não haviam sido demonstrados experimentalmente a campo, mas somente em laboratório. Num estudo a campo, Idso et al. (1974) não apenas comprovaram a ocorrência dos três estágios de evaporação observados em laboratório, como também, concluíram sob outros pontos importantes relacionados à perda de água por evaporação da superfície do solo. De acordo com esses autores, a transição entre os diferentes estágios de secagem do solo, pode ser deduzida a partir de medições do albedo na superfície, considerando que as propriedades óticas do solo mudam com o estágio do ciclo de secagem e umedecimento do mesmo. Ao mesmo tempo, observaram que o reumedecimento da superfície durante a noite, pode reinstalar o estágio dois de evaporação pela manhã. Também, as oscilações entre os estágios dois e três podem permanecer por vários dias, em condições de baixa demanda evaporativa da atmosfera (Idso et al., 1974). Entretanto, isto pode

não ser aplicável para todo o tipo de solo, devido a diferenças na sua constituição, bem como entre os distintos estágios de secagem, uma vez que a transição entre eles é abrupta, especialmente entre os estágios um e dois (Hillel, 1973).

2.6.2 Fatores que afetam a evaporação na superfície do solo

A evaporação na superfície do solo é influenciada por vários fatores que determinam a variabilidade da taxa de perda de água entre diferentes áreas de cultivo. Estes fatores foram separados por Gordiyenko & Kostogryz (1990) em dois grupos, que são os meteorológicos e aqueles referentes ao solo. Os fatores meteorológicos são os mesmos que compõem a demanda evaporativa da atmosfera, que são a radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar (Lemon, 1956; Ometto, 1981; Gordiyenko & Kostogryz, 1990), os quais estão inseridos, também, na variável tempo de secagem do solo (Hide, 1954; Bond & Willis, 1970). Já os fatores relacionados com o solo correspondem à estrutura, densidade e porosidade (Gordiyenko & Kostogryz, 1990), que afetam o teor de umidade, bem como os fluxos líquido e gasoso da água no interior do solo (Hide, 1954; Lemon, 1956; Idso et al., 1974; Gordiyenko & Kostogryz, 1990). Além disso, também é importante a contribuição da $K(\theta)$ no suprimento hídrico à superfície, que favorece o processo de evaporação à medida que a mesma aumenta de magnitude (Phillips, 1984).

A evaporação da água na superfície do solo pode ser afetada por outros fatores externos, além daqueles citados anteriormente. Esses fatores atuam indiretamente, modificando as condições de demanda rente à superfície e as propriedades físicas do solo. Entre eles, os mais importantes são o método de preparo do solo, a presença de plantas crescendo sobre o mesmo e as práticas de manejo adotadas, principalmente, aquelas que modificam a superfície do solo.

Os métodos de preparo do solo, que envolvem revolvimento do mesmo, provocam a interrupção da capilaridade que conduz água à superfície. Ao mesmo tempo, afetam também a densidade e a estrutura, que estão direta ou indiretamente ligados ao estado hídrico do solo (Gordiyenko & Kostogryz, 1990), por modificarem a capacidade de retenção de água e sua dinâmica no perfil (Sidiras et al., 1983; Drury et al., 1999; Lampurlanés et al., 2001).

A presença de plantas crescendo na superfície influencia a evaporação, à medida que promove o sombreamento do solo, reduzindo a

quantidade de energia que chega ao nível do mesmo (Bergamaschi et al., 2004; Dalmago et al., 2004a). No início do ciclo da cultura o efeito do índice de área foliar é pequeno, mas aumenta em importância durante o ciclo das plantas. Por isso, a evaporação da água na superfície do solo tende a ser maior no início do crescimento do que durante o *IAF* máximo, quando a maior quantidade de energia é interceptada pelo dossel (Bergamaschi et al., 2004). O efeito da área foliar de uma cultura sobre a evaporação da água do solo foi concebido por Ritchie (1972) num modelo de estimativa da perda de água por evaporação e encontra-se detalhado também em Ritchie & Johnson (1990).

Entre as práticas de manejo do solo e cultura que interferem na perda de água por evaporação, aquela que tem maior efeito sobre esta variável em PD é a presença da palha das culturas anteriores na superfície do solo. Segundo vários trabalhos (Baumhardt et al., 1985; Centurion & Demattê, 1985; Morote et al., 1990; Bragagnolo & Mielniczuk, 1990b; Fortin, 1993; Salton & Mielniczuk, 1995), a palha reduz a perda de água por evaporação por formar uma barreira que dificulta os processo de condução e difusão de vapor na superfície e aumenta a refletividade à radiação solar, devido à sua coloração mais clara.

A redução da evaporação tem sido apontada como uma das maiores vantagens da permanência dos resíduos na superfície do solo (Campos et al., 1994), a qual reduziria em cerca de 30% a evaporação da água em PD, comparado àquele em PC (Morote et al., 1990; Bragagnolo & Mielniczuk, 1990b; Salton & Mielniczuk, 1995). No entanto, apesar do embasamento físico presente nessas afirmações, um melhor entendimento sobre esse assunto se faz necessário, uma vez que o efeito da palha depende muito da taxa de cobertura, da uniformidade de distribuição da mesma e da quantidade adicionada ao solo, além do tipo e da cor, que variam com a exposição ao ambiente (Steiner, 1989; Sauer et al., 1996; Singh et al., 1996; Flerchinger et al., 2003).

2.6.3 Evaporação da água do solo sob plantio direto

Conforme foi visto no item anterior, é consenso na maioria dos trabalhos encontrados na literatura de que a palha na superfície do solo, em PD, tem um efeito redutor da evaporação da água no mesmo. Fisicamente, isso se dá pela formação de uma espécie de “colchão de ar” entre a atmosfera e o solo, que impede maior evaporação da água (Muzilli, 1985), ao mesmo tempo em que

reduz a entrada de energia no sistema, pelo aumento da refletividade e da rugosidade na superfície, mudando as características aerodinâmicas da camada limite próximo ao solo (VanBavel & Hillel, 1976; Shen & Tanner, 1990). Entretanto, a maior parte dos trabalhos que postulam o efeito da palha na redução da evaporação em PD (Army et al., 1961; Bond & Willis, 1969; Hammel et al., 1981; Unger, 1984; Baumhardt et al., 1985; Centurion & Demattê, 1985; Derpsch et al., 1985; Morote et al., 1990; Bragagnolo & Mielniczuk, 1990b; Fortin, 1993; Salton & Mielniczuk, 1995), não avaliaram, diretamente, esta variável. As afirmações são baseadas em determinações de variáveis indiretas, principalmente, com base na variação da umidade do solo em momentos pontuais, o que nem sempre reflete, de forma condizente, a dinâmica da água neste ambiente. De acordo com Hillel (1973), o processo de evaporação ocorre simultaneamente ao processo de redistribuição de água no solo, o que pode se tornar fator restritivo à perda de água por evaporação, ao contribuir na formação de uma camada de solo mais seca próximo à superfície. Desta forma, a avaliação pontual, sem considerar a evolução do processo e o fato de que o mesmo se inicia a cada precipitação (Phillips & Phillips, 1984), pode levar a resultados imprecisos quanto à perda de água por evaporação.

Poucos estudos foram realizados para medir, de forma direta, as perdas reais de água por evaporação na superfície do solo em PD. Aase & Tanaka (1987) mediram a evaporação como função da presença de resíduos na superfície, utilizando lisímetros de pesagem, e não observaram diferenças significativas entre a evaporação que ocorreu no solo desnudo e com diferentes formas de manejo da palha. Segundo Aase & Tanaka (1987), após dez dias de secagem do solo, todos os tratamentos apresentavam evaporação acumulada muito próxima, sugerindo que o efeito maior da palha ocorre no início do processo de secagem do solo, conforme evidenciaram Bond & Willis (1969). Em experimentos feitos em ambiente controlado, Sauer et al. (1996) observaram que a evaporação da água foi menor nas colunas de solo que tinham cobertura de palha, em relação àquelas de solo desnudo, encontrando grande similaridade com estimativas feitas a campo. Os mesmos autores relatam significativa redução da evaporação com aumento da quantidade de palha na superfície, da mesma forma que foi verificado por Bond & Willis (1969) em experimento de ambiente de

laboratório e por Bragagnolo & Mielniczuk (1990b) a campo, a partir de avaliações indiretas, pela θ_v .

Embora o efeito da palha na redução da evaporação da água na superfície do solo em PD tenha respaldo físico, principalmente, quando grandes quantidades de resíduos são adicionadas, estes resultados nem sempre podem representar, adequadamente, a perda de água por este processo. Isto ocorre, principalmente, quando as avaliações são baseadas em medições gravimétricas da umidade do solo, devido à redistribuição da mesma no perfil (Hillel, 1973) e ao aumento da capacidade de retenção de água que ocorre no solo em PD (Voorhees & Lindstrom, 1984; Norwood, 1994; Rojas & Van Lier, 1999). Além disso, a evaporação depende, principalmente, da disponibilidade de energia na superfície, expressa pela demanda evaporativa da atmosfera, que é composta pela radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar. A forte dependência entre a evaporação da água na superfície do solo e a demanda evaporativa da atmosfera pode ser observada nos trabalhos de Hide (1954), Heilman et al. (1992) e Mwendera & Feyen, (1994).

Mwendera & Feyen (1994), ao obterem resultados divergentes entre estudos de evaporação em ambiente controlado e a campo, chamam à atenção para o fato de que os experimentos realizados em ambiente controlado nem sempre refletem a condição de campo, principalmente, devido às diferenças na rugosidade da superfície e na quebra da condutividade capilar do solo. Em PD, o solo tende a apresentar maior continuidade e interligação entre os poros (Maulé & Reed, 1993; Schaefer et al., 2001), o que facilita o transporte de água à superfície para manter o processo de evaporação. Aliado a isso, também, está o fato de que o aumento da refletividade da superfície do solo pela palha, mencionada em muitos trabalhos (VanBevel & Hillel, 1976; Shen & Tanner, 1990), tem-se mostrado mais significativo apenas logo após o acamamento da mesma, reduzindo-se significativamente, num curto espaço de tempo (Wagner-Riddle et al., 1996; Dalmago et al., 2004a), o que não dá suporte à afirmação de redução na disponibilidade de energia em PD por longo tempo (Phillips & Phillips, 1984). Esta variação da reflectância da superfície da palha em PD é confirmada pela dinâmica térmica do solo neste sistema (Comiran et al., 2003; Dalmago et al., 2004a; Dalmago et al., 2004b).

Diante das considerações apresentadas, percebe-se que a evaporação da água na superfície do solo em PD ainda carece de um melhor entendimento, principalmente, na medida em que existem evidências contrárias àquelas normalmente aceitas. Neste sentido, Levien (1999) demonstrou que, dois dias após a precipitação, a camada superficial do solo em PC se apresentava mais seca do que em PD. Isto é uma indicação de que o processo de evaporação, após esse tempo, foi mais restringido no solo em PC do que em PD, principalmente, se, neste sistema, houver disponibilidade de energia radiante ou convectiva.

A secagem da camada superficial que, normalmente, é mais rápida no solo em PC, comparado àquele em PD, leva à redução da evaporação na superfície, devido à quebra da continuidade dos poros. Quando isso acontece, a evaporação ocorre no interior do solo com fluxo gasoso à superfície, o que aumenta as resistências à transferência de água para a atmosfera (Lemon, 1956). A quebra da continuidade dos poros, com a secagem do solo, forma uma camada de isolamento na superfície, a qual funciona como se fosse um “mulching” adicionado à mesma (Phillips, 1984) e tendo, portanto, efeito semelhante a uma camada de palha adicionada sobre o solo. Isto reduz a evaporação da água no solo em PC, quando relacionada àquela que ocorre em PD, quando, neste sistema, a superfície se mantém úmida (Dalmago et al., 2003a). Desta forma, num período de estiagem prolongada, a evaporação da água no solo em PD pode ser maior do que em PC, concordando como o modelo apresentado por Lemon (1956) e as discussões feitas por Phillips (1984). Tais tendências foram evidenciadas por resultados preliminares apresentados por Dalmago et al. (2003a).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

3.1.1 Local e clima

Foram conduzidos dois experimentos em PD e PC nos anos agrícolas de 2001/02 e 2002/03, respectivamente, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS). A Estação localiza-se no município de Eldorado do Sul, RS (30°05'S, 51°39'W, altitude de 40m) na região climática da Depressão Central do Rio Grande do Sul.

O clima da região é subtropical úmido de verão quente do tipo fundamental Cfa, conforme a classificação climática de Köppen. Os meses mais quentes são janeiro e fevereiro, com temperatura média próxima a 25°C e os mais frios são junho e julho, com média próxima a 9°C. A precipitação média anual é de 1400mm, com 425mm nos meses de novembro a fevereiro, que abrange o período da emergência à maturação fisiológica do milho. A ETo média anual, calculada pelo método de Penman, é de 1235mm, com 583mm nos meses de novembro a fevereiro (Bergamaschi et al., 2003a).

3.1.2 Solo

O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com horizonte Bt (Rojas, 1998). Os solos desta unidade de mapeamento caracterizam-se como sendo rasos, imperfeitamente drenados, com relevo suavemente ondulado e de textura arenosa.

A distribuição das partículas primárias do perfil do solo (análise granulometria) da área experimental foi determinada por Rojas (1998). Os resultados obtidos por esse autor encontram-se no Apêndice 1.

3.1.3 Antecedentes da área

A área experimental esteve sob vegetação nativa por, pelo menos, três anos antes da implantação dos sistemas de manejo do solo PD e PC. Antes deste período foi utilizada como área física para execução de experimentos na área de forrageiras. O croqui dos experimentos encontra-se no Apêndice 2.

No inverno de 1995, a área de aproximadamente 0,46ha foi dividida em duas parcelas de 25m x 90m, com a maior dimensão disposta na direção leste-oeste. Uma das parcelas foi submetida ao manejo em PD e a outra em PC, envolvendo milho como cultura de verão, em sucessão a um consórcio de aveia preta (*Avena strigosa*) + ervilhaca (*Vicia sativa*) no inverno. Na ocasião da realização dos dois experimentos, os sistemas encontravam-se no sétimo (primeiro experimento) e oitavo (segundo experimento) ano de utilização, respectivamente.

3.2 Caracterização dos sistemas plantio direto e preparo convencional

3.2.1 Instalação e manejo da cultura de cobertura de inverno

Foram adotados os mesmos procedimentos nos dois experimentos em relação à implantação e ao manejo da cobertura de inverno. A semeadura do consórcio de aveia+ervilhaca foi realizada a lanço, nos meses de maio e junho no primeiro e segundo experimentos, respectivamente. Após a distribuição das sementes, foi feita gradagem com uma grade de discos leve, em ambos sistemas de manejo de solo, para melhorar o contato das sementes com o solo. Efetuou-se apenas uma adubação de cobertura com uréia no final do inverno, na base de 45kg ha⁻¹ de Nitrogênio. O manejo final da cultura de cobertura do solo foi realizado no início do mês de novembro.

No PD a cobertura de inverno foi dessecada com a aplicação de 3,0L ha⁻¹ de herbicida à base de glifosate, através de pulverizador acoplado ao trator, cerca de 25 dias antes da semeadura do milho. A aveia encontrava-se no estágio de grão leitoso e a ervilhaca no florescimento. Antes da semeadura do milho, a cobertura morta foi acamada com a passagem de um rolo-faca tracionado por trator.

No PC a cobertura de inverno foi incorporada ao solo através de uma aração, entre 0,18m e 0,25m de profundidade, com arado de discos reversível.

Após, foram realizadas duas gradagens para nivelar o solo, sendo uma logo após a aração e outra pouco antes da semeadura do milho, para auxiliar no controle de plantas daninhas.

A aração do solo no PC e a dessecação das plantas de aveia e ervilhaca no PD foram feitas com dois dias de diferença no experimento em 2001/02 e com 10 dias em 2002/03. No segundo experimento, a diferença foi maior devido à elevada umidade do solo que impossibilitou o preparo do mesmo no convencional, imediatamente após a dessecação no PD. Prevendo-se essa dificuldade, em virtude do grande número de dias com precipitação, a aveia e a ervilhaca da área em PC também foram dessecadas, juntamente com a dessecação no PD, para eliminar as plantas em PD e PC, ao mesmo tempo.

3.2.2 Instalação e manejo da cultura de milho

3.2.2.1 Semeadura do milho

Uma faixa de 25m x 20m (cerca de 20% da área) no lado oeste da área maior em cada sistema de manejo foi mantida sem plantas de milho e livre de plantas daninhas através da aplicação de herbicida à base de glifosate, durante todo o período experimental. A área restante (em torno 80%) foi semeada com o híbrido simples Pioneer 32R21, ciclo precoce, em 16/11/01 (primeiro experimento) e em 25/11/02 (segundo experimento) (Apêndice 2). A semeadura foi feita neste período devido à necessidade de formação de matéria seca da cobertura de inverno (cerca de 4,5Mg ha⁻¹ no primeiro e 5,5Mg ha⁻¹ no segundo experimento) e devido ao tempo gasto no preparo do instrumental de medição que foi instalado.

Para a implantação da cultura utilizou-se uma semeadora de três linhas para milho, da marca Vence Tudo, modelo 1150 com disco de corte da palha e haste sulcadora (facão), tracionada por trator. Esse conjunto foi utilizado em ambos sistemas de manejo, embora a semeadora tivesse sido desenvolvida para semeadura direta (plantio direto). As sementes foram colocadas à cerca de 0,040m a 0,05m de profundidade.

O espaçamento entre linhas foi de 0,75m e foram colocadas entre 9 e 11 sementes por metro linear. A população alcançada em cada sistema foi de, aproximadamente, 65.000 plantas ha⁻¹, nos dois experimentos (Apêndice 3). As fileiras de plantas tiveram orientação leste-oeste.

3.2.2.2 Adubação de base e de cobertura

As adubações foram baseadas na análise de solo (Apêndice 4) e no histórico anterior de adubação da área. No primeiro experimento a adubação de base foi de 125kg ha⁻¹ de P₂O₅, 125kg ha⁻¹ de K₂O e 25kg ha⁻¹ de N₂, e no segundo foi de 100kg ha⁻¹ de P₂O₅, 100kg ha⁻¹ de K₂O e 25kg ha⁻¹ de N₂. Foram aplicados mais 60kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60kg ha⁻¹ de K₂O a lanço em cobertura no segundo experimento, devido à limitação de aplicação da semeadora para doses maiores do que 500kg ha⁻¹ de NPK, pela fórmula 5-20-20. Essa aplicação foi realizada 15 DAE do milho.

Nos dois experimentos, foram feitas duas adubações de nitrogênio em cobertura, com a aplicação de 60kg ha⁻¹ de N na forma de uréia sem incorporação ao solo. As aplicações foram feitas quando as plantas apresentaram a quarta e a oitava folha expandida.

3.2.2.3 Controle de pragas e plantas daninhas

Não houve ocorrência de pragas capaz de causar dano econômico. Porém, observou-se ataques da larva de *Diabrotica speciosa* (vaquinha), no primeiro experimento, e *Agrotis ipsilon* (lagarta rosca) e *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) no segundo experimento. O controle foi feito com inseticida à base de permethrin (0,065% do produto comercial).

O controle de plantas daninhas foi realizado preventivamente, com aplicação de herbicida pré-emergente à base de atrazine+metolachlor (5,0L ha⁻¹), logo após a semeadura do milho. No segundo ano, também foi aplicado herbicida à base de glifosate (2,0L ha⁻¹) antes da semeadura para controlar invasoras não eliminadas na gradagem. Durante o ciclo do milho foram realizadas duas aplicações de herbicida à base de paraquat (1,5L ha⁻¹) direcionado ao solo e entre as linhas para controlar, principalmente, *Cyperus rotundus* (tiririca) e *Brachiaria plantaginea* (papuã), nos dois experimentos.

3.2.2.4 Irrigação

Para a irrigação, utilizou-se um sistema de aspersão constituído por uma única linha de aspersores, instalada na linha central do experimento, na direção leste-oeste, entre os sistemas PD e PC (Apêndice 2). Os aspersores foram espaçados em 6m, com a saída da água a 3m de altura. A tubulação foi de

PVC de 0,1m de diâmetro com redução para os aspersores de 0,0254m de diâmetro. O recalque da água foi feito com um conjunto moto-bomba elétrico de 10HP.

Em função da localização da irrigação foram obtidos níveis decrescentes de água, a partir da linha de aspersores, em cada sistema de manejo do solo (Apêndice 2). A faixa mais próxima à linha de aspersores (3m de largura) recebeu a máxima irrigação (I4) aplicada (100%), definida como a quantidade de água para elevar a θ_v à CC. Os demais níveis foram o I3 (98%), I2 (41%) e I0, que foi mantido sem irrigação. O nível I1 não foi considerado neste trabalho, mas corresponde à cerca de 20% da quantidade de água para elevar a θ_v à CC (Müller, 2001). Os níveis foram aferidos através de coletores, ao final dos experimentos, após a retirada das plantas.

As irrigações foram efetuadas entre 6 e 8h da manhã para evitar deriva (horário sem vento). O controle da irrigação foi feito pelo acompanhamento da variação do Ψ_m , através de tensiômetros de coluna de mercúrio, instalados no centro da parcela de máxima irrigação (I4) no sistema PD e na área com plantas. A lâmina de recarga foi calculada através da evapotranspiração medida em lisímetro de pesagem, localizado numa área adjacente, buscando-se a elevação da θ_v à CC no nível I4. Nos dois experimentos, as irrigações foram feitas nas áreas com plantas e sem plantas de milho em cada sistema. As quantidades e datas das irrigações encontram-se no Apêndice 5.

3.3 Determinação de propriedades físico-hídricas do solo

As propriedades físicas do solo foram avaliadas no final do ciclo da cultura de inverno (aveia+ervilhaca) em novembro do ano de 2002, para obter uma condição intermediária entre os experimentos de 2001/02 e 2002/03. A determinação da composição granulométrica do solo não foi feita neste trabalho, por ter sido realizada por Rojas (1998) (Apêndice 1), que trabalhou na mesma área experimental, quando os sistemas PD e PC estavam no terceiro ano de implantação.

Para a determinação das propriedades físicas foi aberta uma trincheira em cada sistema de manejo, até 1m de profundidade. As amostras indeformadas de solo foram coletadas através de um amostrador do tipo Uhland, com dois

tamanhos de cilindros, sendo coletadas três repetições em cada camada de solo amostrada.

Os cilindros maiores tinham 0,07m altura e 0,085m de diâmetro e foram utilizados para coletar amostras nas camadas de 0 a 0,1m, 0,1m a 0,225m, 0,225m a 0,375m, 0,375m a 0,525m, 0,525m a 0,675m e 0,675m a 0,825m de profundidade. Aqueles de menor dimensão (0,025m de altura e 0,064m de diâmetro) foram utilizados para coletas de solo nas camadas de 0 a 0,05m, 0,05m a 0,1m, 0,1m a 0,225m, 0,225m a 0,375m, 0,375m a 0,525m, 0,525m a 0,675m e 0,675m a-0,825m de profundidade. As amostras representam, aproximadamente, os pontos médios de 0,025m, 0,075m, 0,15m, 0,3m, 0,45m, 0,6m e 0,75m de profundidade, para o caso dos cilindros menores e 0,05m, 0,15m, 0,3m, 0,45m, 0,6m e 0,75m de profundidade para os cilindros maiores.

As análises físicas foram feitas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos, no laboratório de Agrometeorologia do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia, da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no Laboratório de Química Agrícola da Fundação de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO), todos em Porto Alegre.

3.3.1 Densidade do solo

A partir de amostras indeformadas, coletadas com os cilindros de maior dimensão, foi determinada a densidade do solo seguindo metodologia descrita por Blake & Hartge (1986), para todas as camadas, exceto para aquela de 0 a 0,1m. Nessa camada a densidade foi determinada para as profundidades de 0 a 0,05m e 0,05m a 0,1m, utilizando-se amostras coletadas com os cilindros de menor tamanho.

A densidade foi calculada pela equação:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (1)$$

em que D_s (Mg m^{-3}) é a densidade do solo, M_s (Mg) é a massa da amostra seca em estufa a 105°C e V (m^3) o volume do cilindro.

3.3.2 Porosidade total e distribuição do tamanho de poros

Para a determinação da porosidade total, em cada camada de solo, foram utilizadas amostras retiradas com os anéis de menor dimensão. A porosidade total ($m^3 m^{-3}$) foi obtida pela diferença entre a massa da amostra saturada e a massa da amostra seca em estufa à 105°C. Desta forma, a porosidade total correspondeu ao volume de água extraída entre esses dois limites.

Com as mesmas amostras de solo foram determinadas, também, a macro, a meso e a microporosidade ($m^3 m^{-3}$) das diferentes camadas do perfil. A partir da diferença entre a porosidade total e a θ_v ($m^3 m^{-3}$) no Ψ_m de -0,006MPa, obteve-se a macroporosidade ou poros de drenagem (acima de 50 μ m). A mesoporosidade (entre 50 μ m e 0,2 μ m), considerada como porosidade de retenção de água disponível para as plantas, foi obtida a partir da diferença entre a θ_v do solo no Ψ_m de -0,006MPa e -1,5MPa. A θ_v obtida a partir do Ψ_m de -1,5MPa correspondeu à microporosidade (menor de 0,2 μ m), a qual retém água, teoricamente, não disponível às plantas.

A mesoporosidade foi subdividida em quatro subclasses de tamanho de poros, de acordo com os potenciais aplicados de -0,033MPa, -0,1MPa, -0,3MPa, -0,500MPa e -1,5MPa. O diâmetro de poros foi calculado pelo modelo de ascensão capilar de água (Reichardt, 1986; Libardi, 1995), o qual foi manipulado algebricamente, resultando na equação:

$$D = \frac{0,2932}{\Psi_m} \quad (2)$$

em que D (μ m) é o diâmetro dos poros e Ψ_m (MPa) é o potencial de água aplicado.

Para potenciais de -0,006MPa foi utilizado um funil de placa porosa (tipo “Haines”) e para os demais potenciais, utilizou-se uma câmara de pressão com placa porosa (Câmara de Richards), descritos por Libardi (1995), com utilização conforme descrição a seguir.

3.3.3 Curvas características de retenção de água

Para a determinação das curvas características de retenção de água foram utilizadas amostras de solo com estrutura natural indeformada, coletadas com cilindros de menor dimensão. Seguiram-se os procedimentos descritos por Cauduro & Dorfman (1988), que consiste na utilização de dois equipamentos, segundo os potenciais aplicados.

Para o potencial de -0,006MPa foi utilizado um funil de placa porosa (tipo “Haines”) e para os potenciais de -0,033MPa, -0,1MPa, -0,3MPa, -0,5MPa e -1,5MPa utilizou-se uma câmara de pressão com placa porosa (Câmara de Richards), descritos por Libardi (1995). A θ_v e o Potencial (MPa) foram ajustados à equação de Van Genuchten (1980) (equação 3) que possibilita estimar uma variável em função da outra. Para este procedimento utilizou-se o programa elaborado por Dourado Neto et al. (1990), que emprega a equação de Van Genuchten:

$$\theta_v = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha |\Psi m|)^n\right]^m} \quad (3)$$

em que θ_v ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) é a umidade volumétrica, Ψm é o potencial matricial da água no solo (MPa), θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) é a umidade residual, θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) é a umidade de saturação, α (MPa^{-1}), m e n são parâmetros empíricos, sendo n dependente de m e θ_r e θ_s calculados pelo método de extrapolação.

3.3.4 Condutividade hidráulica

A K_o (cm dia^{-1}) foi determinada com amostras de solo de estrutura indeformada coletadas com os cilindros de maiores dimensões. As medições foram feitas pelo método do permeâmetro de carga constante, descrito por Cauduro & Dorfman (1988), utilizando como líquido de percolação a água. A K_o foi calculada pela equação:

$$K_o = 60 \frac{V L}{A t h} \quad (4)$$

em que K_0 (cm h^{-1}) é a condutividade hidráulica saturada, V (cm^3) é o volume médio de água medido em cada intervalo de tempo, A (cm^2) é a área da secção transversal da amostra, t (min) tempo, h (cm) altura da carga hidráulica, L (cm) altura da amostra e 60 é o fator de conversão do tempo, de minutos para horas.

A $K(\theta)$ foi calculada a partir da K_0 , segundo procedimento apresentado por Van Genuchten (1980), através da equação:

$$K(\theta) = K_0 \omega^l \left[1 - (1 - \omega^{1/m})^m \right]^2 \quad (5)$$

em que $K(\theta)$ (cm dia^{-1}) é a condutividade hidráulica no solo em função da θ_v , l é um parâmetro empírico, adotado como 0,5 segundo Mualem (1976), m é o parâmetro de ajuste da curva de retenção pelo modelo de Van Genuchten (1980), ω é uma θ_v adicional, dada pela equação:

$$\omega = \frac{\theta_v - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

em que θ_v ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) é a umidade volumétrica do solo, θ_r e θ_s ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) são as umidades volumétricas residual e de saturação, respectivamente.

3.3.5 Capacidade de campo (CC)

Para a determinação da CC foi inundada uma área de 9m^2 ($3\text{m} \times 3\text{m}$), delimitada por chapas de zinco, até a mesma atingir saturação completa. Após, o solo foi coberto com lona plástica para evitar a evaporação da água e, transcorrido o tempo de 72 horas necessário para a drenagem natural, foi realizada a coleta de amostras de solo.

As amostragens de solo foram feitas com trado holandês, nas camadas de 0 a 0,1m, 0,1m a 0,225m, 0,225m a 0,375m, 0,375m a 0,525m, 0,525m a 0,675m e 0,675m a 0,825m de profundidade, com três repetições por camada. O solo retirado foi acondicionado em latas de alumínio, com tampa vedada por fita adesiva e transportado para o laboratório. Depois de pesadas, as latas foram colocadas para secar em estufa a 105°C até massa constante.

A umidade gravimétrica foi calculada pela equação:

$$U = \frac{Ms - Mu}{Ms} 100 \quad (7)$$

em que U (%) é a umidade gravimétrica, Mu (Mg) é a massa de solo úmido e Ms (Mg) é a massa do solo seco. Os valores de U foram transformados em θ_v através da multiplicação pela densidade do solo em cada camada.

3.3.6 Taxa de infiltração de água

A infiltração vertical de água no solo foi quantificada pelo método dos cilindros concêntricos, descritos por Cauduro & Dorfman (1988). Foram feitas seis repetições em cada sistema de manejo, no final do ciclo da cultura de cobertura de inverno (aveia+ervilhaca). Utilizou-se cilindros de metal com altura de 0,3m e diâmetros de 0,3m e 0,5m, respectivamente para os cilindros interno e externo. No interior do cilindro menor (0,3m) a lâmina de água infiltrada foi medida com uma régua graduada, nos tempos 0,5, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 minutos após o tempo zero.

A taxa de infiltração de água no solo foi calculada pela equação:

$$Vi = \frac{h_1 - h_2}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

em que Vi (cm h^{-1}) é a taxa de infiltração, h_1 (cm) é a altura do nível de água dentro do cilindro (leitura na régua) no tempo t_1 (h) e h_2 em t_2 , respectivamente.

Os valores de quatro repetições da Vi , em função do tempo, foram ajustados à equação empírica da infiltração de Kostiakov-Lewis (equação 9), enquanto o valor médio das outras duas repetições foi utilizado para validar o modelo. Esta equação foi escolhida devido à simplicidade de sua aplicação e ao bom ajuste aos dados medidos (Fabian & Ottoni Filho, 1997). A mesma é uma generalização da equação de Kostiakov, em que a infiltração de longa duração tende para VIB. A forma da respectiva equação é apresentada a seguir:

$$Vi = aKt^{a-1} + c \quad (9)$$

em que V_i (cm h^{-1}) é a taxa de infiltração estimada, t (h) é o tempo de infiltração, K , a e c são coeficientes empíricos a serem ajustados. A constante c é a VIB, sendo denominada a “priori” como a infiltração terminal nos testes de infiltração (Fabian & Ottoni Filho, 1997).

A infiltração acumulada, em função do tempo, foi obtida pela integração da equação 9, que, após manipulações algébricas, resulta na equação 10:

$$I_a = Kt^a + ct \quad (10)$$

em que I_a (cm) é a lâmina de infiltração acumulada. Os demais termos foram descritos, anteriormente, na equação 9.

Em cada dia de realização dos testes foi retirada uma amostra de solo nas profundidades de 0 a 0,15m e 0,15m a 0,3m, após a instalação dos cilindros, para determinar a umidade do solo.

3.4 Medição do potencial matricial da água no solo

No primeiro experimento o Ψ_m foi medido com tensiômetros de manômetro de mercúrio, na faixa de máxima irrigação (I4) e na faixa não irrigada (I0), na área com e sem plantas de milho, nos dois sistemas de manejo e durante todo o ciclo da cultura. No segundo experimento o Ψ_m também foi medido no nível intermediário de irrigação (I2) na área com plantas, cujo volume de água foi cerca de 40% daquele aplicado no nível I4 (Apêndice 2).

Na área sem plantas foi instalado um conjunto de tensiômetros em cada combinação de sistema de manejo do solo e níveis de irrigação extrema (I4 e I0), nas profundidades de 0,075m, 0,15m, 0,3m, 0,45m e 0,6m. No segundo experimento foi acrescentado um tensiômetro na profundidade de 0,75m.

Na área com plantas foram instalados tensiômetros, em cada combinação de tratamentos, para monitorar a variação do Ψ_m nas profundidades de 0,075m, 0,15m, 0,3m, 0,45m, 0,6m, 0,75m, 0,9m e 1,05m no primeiro experimento, e incluindo 1,2m no segundo experimento.

A altura de ascensão do mercúrio foi registrada diariamente sempre que possível, ou num intervalo máximo de três dias. Ao atingir altura entre 0,650m

e 0,700m de coluna de mercúrio, os tensiômetros foram desativados, sendo reativados após uma precipitação ou irrigação.

As leituras da altura da coluna de mercúrio foram transformadas em Ψm pela equação:

$$\Psi m = (-12,6 H + hc + z) 0,0001 \quad (11)$$

em que Ψm (MPa) é o potencial matricial da água no solo, H (cm) é a leitura da coluna de mercúrio acima da cuba, hc (cm) é a altura média do mercúrio na cuba acima do nível do solo e z (cm) é a profundidade de instalação no solo do centro da cápsula porosa do tensiômetro. A constante 0,0001 converte o Ψm de centímetros de coluna d'água para MPa.

3.5 Secagem do solo e extração de água pelo milho

A secagem do solo e a extração de água pelo milho foram avaliadas através da evolução do Ψm ao longo do tempo, durante períodos de secagem do mesmo. O início de cada ciclo de secagem foi considerado a partir do primeiro dia após uma precipitação ou irrigação, cujo volume de água adicionada ao solo foi superior a 25mm, devido a possibilitar a saturação satisfatória da camada superficial do solo, seja em PD seja em PC. Ainda, foi adotado como critério a existência de, pelo menos, quatro leituras de tensiômetros, em todas as profundidades, para considerar um respectivo ciclo de secagem do solo como pertencente ao conjunto de dados utilizados para descrever o processo de secagem e extração de água.

Inicialmente, cada ciclo de secagem foi considerado em separado para avaliar a consistência das tendências entre o PD e o PC. A seguir, foram reunidos para possibilitar o ajuste de uma função aos dados que descrevesse o determinismo físico e assumisse as pressuposições estatísticas necessárias. A variação do Ψm foi descrita em função de TSS , contado a partir do dia seguinte a uma precipitação ou irrigação. Para todos os casos foi dada preferência a ciclos iniciados após uma precipitação, para fins de ajuste das funções, por considerar que a distribuição da umidade no solo é melhor do que após uma irrigação.

No caso da extração de água do solo, a avaliação foi feita considerando estádios de desenvolvimento do milho, devido a que o crescimento

das plantas (área foliar e sistema radicular) também influencia a variação do Ψ_m . Além disso, para explicar a evolução do Ψ_m ao longo do tempo, foi acrescentada a variável GD_{acm} nos modelos. Desta forma, foi incorporado o efeito do crescimento da cultura (área foliar e sistema radicular) juntamente com a contribuição do tempo de secagem, na extração de água do solo. Também, considerou-se que ambas variáveis apresentam inseridas variações de demanda evaporativa atmosférica, seja pela participação da temperatura na contabilização dos GD_{acm} ou, indiretamente, pela evolução de TSS .

3.6 Variáveis meteorológicas

Em uma estação automática modelo W2000 (Campbell Scientific), localizada próxima a área experimental foram registrados e disponibilizados dados de R_g ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s^{-1}) e precipitação pluvial (mm), em intervalos de 15 min. A partir destes dados foi calculada a ET_o , pelo método de Penman (1948), cujos parâmetros utilizados encontram-se descritos em Bergamaschi et al. (2003a).

Considerando que o milho responde satisfatoriamente à soma térmica, foram calculados os GD_{acm} a partir da emergência, através da equação:

$$GD_{acm} = \sum_{n=1}^N \left(\bar{T} - T_b \right) \quad (12)$$

em que GD_{acm} ($^{\circ}\text{C}$) são os graus-dia acumulados a partir do primeiro dia após a emergência do milho, \bar{T} é a temperatura média do dia, medida na estação automática com o sensor a 1,5m acima do solo gramado, e T_b é a temperatura base inferior para o milho, tomada como sendo 8°C , segundo Berlato e Sutili (1976).

3.7 Determinação de variáveis de crescimento e desenvolvimento da cultura

No primeiro experimento (2001/02) a área foliar foi medida em planímetro eletrônico ótico modelo LI 3000 (LICOR). As medições foram feitas, aproximadamente, a cada sete dias em quatro plantas de cada sistema de

manejo de solo, nos dois níveis extremos de irrigação (I4 e I0). Com a área foliar medida foi calculado o *IAF* pela seguinte equação:

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad (13)$$

em que *IAF* (m² m⁻²) é o índice de área foliar, *AF* (m²) é a área foliar média das quatro plantas e *S* (m²) é a área de solo média ocupada pelas mesmas. O *IAF* foi calculado até o período de pendramento/espigamento do milho, quando alcança o valor máximo.

Os valores de *IAF* de cada amostragem foram ajustados ao número de folhas (*Nf*), altura de plantas [*Alpt* (m)] e aos *GD_{acm}*. A *Alpt* foi medida com régua, em quatro repetições, tomando-se como limite superior a inclinação da folha de inserção mais elevada. Nas mesmas plantas foi contado o *Nf*.

Os modelos foram ajustados a partir de valores médios de cada variável, atendendo-se a pressuposições básicas para elaboração dos mesmos. A equação ajustada foi:

$$IAF = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{X - X_0}{b}\right)}} \quad (14)$$

em que, *a*, *b* e *X₀* são coeficientes do modelo e *X* é a respectiva variável independente, conforme o caso (*GD_{acm}*, *Nf* ou *Alpt*). Os coeficientes e demais parâmetros estatístico encontram-se no Apêndice 6.

No segundo experimento (2002/03) foram determinadas as mesmas variáveis independentes (*GD_{acm}*, *Nf* e *Alpt*). Neste experimento o *IAF* foi estimado a partir dos modelos ajustados para o experimento 2001/02 (Apêndice 6).

A data média de ocorrência dos estádios fenológicos foi determinada segundo escala adaptada de Hanway (1963). No final dos experimentos foram avaliados o rendimento final e os componentes do rendimento do milho nos dois sistemas de manejo de solo e condições hídricas, cujos resultados foram apresentados por Dalmago et al. (2002) e Bergamaschi et al. (2003b).

3.8 Estimativa da profundidade do sistema radicular do milho

O aprofundamento do sistema radicular foi estimado seguindo metodologia adotada por Prasad (1988), Faria & Madramootoo (1996) e Müller (2001) para diferentes culturas, inclusive o milho. Em todos esses trabalhos, o aprofundamento do sistema radicular foi considerado como uma função linear do acúmulo de GD, a partir da emergência da cultura até o florescimento.

Considerando a relação existente entre a distribuição do sistema radicular do milho e a retirada de água do solo (Molz, 1971), o aprofundamento do sistema radicular foi estimado através do acompanhamento do Ψm nas diferentes profundidades, durante períodos de baixa precipitação. A profundidade máxima do sistema radicular foi considerada como próxima à localização das cápsulas dos tensiômetros que indicavam alterações no Ψm , por ocasião do florescimento da cultura (Müller, 2001). Assim, a profundidade máxima do sistema radicular foi estimada por uma função linear com os GD_{acm} , na forma de:

$$z_r = z_{r_0} + GD_{acm} Az_r \quad (15)$$

em que, z_r (m) é a profundidade do sistema radicular, z_{r_0} é a profundidade do sistema radicular por ocasião da emergência do milho (considerada como 0,1m) (Müller, 2001), GD_{acm} ($^{\circ}$ C) graus-dia acumulados após emergência e Az_r é o acréscimo de profundidade por unidade de GD_{acm} até o florescimento. O Az_r foi calculado pela mesma equação (equação 15) a partir da profundidade máxima do sistema radicular e dos GD_{acm} necessários para atingir o florescimento.

3.9 Avaliação da cobertura do solo no plantio direto

A evolução da cobertura do solo por resíduos no PD foi feita pelo método da corda seccionada, segundo Sloneker & Moldenhauer (1977). O método consiste em marcar pontos (cerca de 100) eqüidistantes (no caso, 0,1m), num cordão. Após, o mesmo é esticado sobre o solo (a mais ou menos 0,1m de altura) e conta-se os pontos em que, logo abaixo, observa-se solo desnudo ou palha. De posse destes resultados e, a partir de várias repetições, obtém-se a percentagem média de cobertura do solo para aquele momento da medição. Avaliando-se várias vezes no decorrer do ciclo da cultura, estima-se a evolução

da cobertura do solo (Apêndice 7). As avaliações foram feitas nas parcelas com e sem plantas.

3.10 Medição da radiação solar fotossinteticamente ativa (*RFA*) interceptada pela cultura do milho

A *RFA* foi medida, continuamente, desde o início do crescimento do milho até a maturação fisiológica nos dois experimentos. Para medição da *RFA* incidente (RFA_{inc}) foi utilizado um sensor “quantum” da marca LICOR, instalado acima da cultura do milho. A *RFA* transmitida (RFA_t) pela cultura, ou seja, a quantidade que chega na superfície do solo, foi medida a 0,05m acima da superfície do solo com quatro conjuntos de sensores (barras) em cada sistema de manejo de solo na cultura irrigada ou não irrigada.

Cada barra foi constituída por cinco células fotovoltaicas de silício amorfo, ligadas em paralelo. As barras foram conectadas a um multiplexador de canais e este foi ligado a um datalogger marca Campbell modelo CR10, que continha uma unidade armazenadora de dados externa (módulo de memória). O sistema foi programado para fazer leituras a cada 30 segundos e armazenar as médias a cada 15 minutos. A parcela da *RFA* interceptada pela cultura de milho foi calculada pela equação:

$$RFA_{int} = RFA_{inc} - RFA_t \quad (16)$$

em que RFA_{int} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada, RFA_{inc} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a radiação solar fotossinteticamente ativa incidente e RFA_t ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é radiação solar fotossinteticamente ativa transmitida pela cultura.

3.11 Fluxo de calor para o solo

O fluxo de calor para o solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi medido durante o mesmo período de medição da *RFA*. As medições foram realizadas com fluxímetros, modelo HFT3 (marca REBS), instalados a 0,01m de profundidade. Foi utilizada uma repetição em cada sistema de manejo de solo na área irrigada (I4) com e sem plantas de milho. As placas foram instaladas a 0,15m de distância da linha

de plantas, no caso da área com plantas, e foram conectadas ao mesmo conjunto multiplexador/datalogger utilizado nas medições da *RFA*, seguindo os mesmos procedimentos de leitura e armazenagem dos dados.

3.12 Medição da evaporação da água na superfície do solo (*Es*)

A *Es* foi medida com microlisímetros construídos a partir de canos de PVC. Os mesmos apresentavam 0,15m de diâmetro e tinham paredes de 0,002m de espessura, o que determinou uma área evaporante de 0,0177m². A altura dos microlisímetros também foi de 0,15m, conferindo, assim, a capacidade máxima de armazenagem de solo de 0,00265m³. Na borda superior foi colocada uma alça para facilitar o manuseio do mesmo e, na borda inferior, a parede externa foi biselada formando uma superfície cortante para facilitar a entrada no solo.

Os microlisímetros foram introduzidos no solo por percussão, aplicada com martelo de borracha sobre uma madeira que cobria completamente a borda superior, a fim de permitir a entrada uniforme no solo. Após a inserção completa, o microlisímetro foi retirado do local preservando a integridade do monolito de solo formado em seu interior. Na base, envolvendo a abertura, foi colocado um tecido sintético com malha, suficientemente fino para evitar a perda de solo e permitir apenas a drenagem natural do excesso de água das precipitações ou irrigações. O tecido foi preso à parede externa do microlisímetro com fita adesiva plástica.

Uma vez montados, os microlisímetros retornaram ao local em que o solo foi retirado, deixando-se uma borda de, aproximadamente, 0,01m acima da superfície. No fundo de cada cavidade, em que foram colocados, foi posta uma tela com a finalidade de quebrar a condutividade hidráulica entre o solo externo e interno do lisímetro.

A *Es* foi medida em cada combinação de sistemas de PD e PC, nas áreas com e sem plantas de milho e nos níveis de irrigação I0 e I4 (Apêndice 2). Em cada combinação de fatores foram utilizadas quatro repetições dispostas lado a lado, totalizando 32 microlisímetros.

Na área com milho e nos dois sistemas de manejo de solo, os microlisímetros foram instalados a 0,15m de distância da linha das plantas. No PD foi mantida a camada de palha na superfície, presente no local de colocação dos microlisímetros, representando a condição circundante. A *Es* foi medida durante

todo o ciclo da cultura de milho e nos dois anos de experimento, com os mesmos procedimentos experimentais.

Na quantificação da E_s foi considerada a variação de massa dos microlisímetros em uma balança eletrônica com resolução de 2g e capacidade máxima de peso de 20.000g. Os períodos seqüenciais de medições iniciaram-se um dia após a ocorrência de precipitação ou irrigação, para permitir a drenagem natural do solo. Sempre que possível, as determinações foram feitas diariamente ou senão, foram determinados valores cumulativos de, no máximo, dois a quatro dias. Antes da pesagem retirava-se todo o excesso de solo aderido à parte externa dos microlisímetros.

A E_s na superfície do solo foi calculada pela equação:

$$E_s = \frac{M_{n-1} - M_n}{\pi r^2} 0,001 \quad (17)$$

em que, E_s (mm dia^{-1}) é a evaporação da água do solo, M (g) é a massa do microlisímetro dos dias “n-1” e “n” respectivamente, r (m) é o raio do microlisímetro e 0,001 é a constante de transformação de gramas para milímetros.

No final dos experimentos determinou-se a densidade do solo em cada microlisímetro para estimar a θ_v em cada momento da realização das medições.

3.13 Delineamento experimental e análise dos resultados

Desde a implantação do PD e do PC, os experimentos nesta área foram conduzidos considerando os sistemas de manejo e os níveis de irrigação dispostos em faixas. Nos dois experimentos deste trabalho foi mantido este desenho experimental por permitir o manejo do solo e da cultura, garantindo representatividade dos sistemas de manejo, além do aspecto de evolução temporal inserido, principalmente, no sistema de PD.

Para as avaliações físico-hídricas do solo, feitas em um único momento em novembro de 2002, adotou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso com os fatores dispostos em faixas e com três repetições. O fator principal foi considerado o sistema de manejo, cujos tratamentos foram PD e PC do solo. Um fator secundário foi atribuído à camada de solo amostrada até a profundidade

de 0,85m num total de sete. No caso da infiltração foram feitas quatro repetições, uma por bloco, sendo que o fator secundário foi considerado o tempo, que foi pré-fixado em 13 intervalos a partir do tempo zero.

Nas avaliações feitas durante os ciclos de secagem do solo, como a extração de água/secagem do solo, além dos fatores sistemas de manejo e nível de irrigação, houve um terceiro, que foi a planta, cujos tratamentos foram presença ou ausência de plantas. Para essas variáveis a sistemática de análise foi alterada, embora todos os fatores tenham sido mantidos com distribuição em faixas. No caso da *Es* o fator planta foi desconsiderado, pois a mesma foi avaliada apenas na área sem plantas.

Tendo em vista os objetivos do trabalho, foi privilegiada a análise das diferenças na dinâmica da água entre o solo em PD e aquele em PC, independentemente da interação entre os fatores ser significativa ou não. Assim, os processos de secagem/extração de água e *Es* foram analisados considerando a combinação dos fatores secundários e terciários, como se cada combinação fosse um experimento independente. A adoção deste critério foi feita pelo fato do experimento apresentar diferentes interações com as condições meteorológicas, inclusive para cada ciclo de secagem do solo. A associação de cada experimento, com os ciclos de secagem do solo, permitiu avaliar a evolução temporal dos processos, integrada às diferentes condições de demanda evaporativa da atmosfera.

Considerando que o fator tempo é uma variável a ser considerada com maior rigor, quando o PD está envolvido, pelo mesmo influenciar de forma diferente que no PC, as análises foram mais detalhadas na área não irrigada. Este procedimento considera o maior *TSS* como fator diferenciador entre os sistemas PD e PC e, também, pelo fato da irrigação ser um fator redutor de risco para a atividade agrícola e, portanto, uniformizador das alterações entre sistemas no aspecto hídrico.

A análise dos resultados foi realizada de acordo com a configuração experimental para cada caso e com os objetivos do trabalho. Parte dos resultados foram avaliados pela análise de variância, aplicando o teste de Tukey para comparação de médias com 5% de probabilidade de erro. Também, foi utilizada a análise de regressão e correlação para identificar as relações de dependência e associação entre as variáveis. Em todas as análises foram adotadas

transformações nos dados originais para respeitar as pressuposições teóricas dos modelos de análise de variância e de regressão/correlação (normalidade e variância constante dos erros, principalmente). Na análise de regressão também foi avaliada a existência de pontos influentes na variável dependente (“outliers”) e na variável independente (alavancas), através de testes específicos. Foi adotado o nível de significância de 5% de probabilidade de erro para considerar como significativas às relações de dependência entre as variáveis analisadas.

No caso das análises físico-hídricas foram efetuadas duas análises de variância, uma considerando todas as profundidades do perfil e a outra somente englobando as profundidades até 0,375m. Isso foi feito devido à presença do horizonte Bt a, aproximadamente, 0,375m de profundidade (Rojas, 1998) e considerando que, até esse limite, ocorreram as maiores alterações nas propriedades físicas do solo por conseqüência da adoção do PD.

No estudo de secagem e extração de água do solo foi efetuada a análise de evolução temporal entre os sistemas e condições hídricas, privilegiando a descrição física dos processos envolvidos, por ser mais apropriada aos objetivos do trabalho. Isto se justifica considerando o aspecto evolutivo do PD enquanto sistema e, também, pelo fato de não ter havido repetições de Ψ_m em cada profundidade de medição. A análise estatística adotada nesta parte do trabalho foi a regressão linear e não-linear, de acordo com a distribuição dos dados e com as interações conhecidas entre as variáveis. Quando foi necessária análise de variância, os diferentes dias de medição foram adotados como blocos para possibilitar a realização da mesma.

Para a avaliação da E_s , em cada experimento, foi adotada a análise de variância dentro de cada ciclo de secagem do solo, pelas oscilações nas condições de demanda evaporativa da atmosfera e pelo TSS, que são fontes de variabilidade entre os tratamentos. Entretanto, também neste caso foi privilegiada a análise de descrição física do processo, independente da significância das diferenças.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos, tendo como pressuposições, as condições de contorno definidas em Material e Métodos. Algumas destas condições foram medidas durante a execução dos trabalhos e, por isso, serão apresentadas como resultados para contextualizar, de forma mais significativa, os experimentos realizados. Além disso, os resultados serão apresentados considerando-se alguns aspectos teóricos, que devem estar presentes em trabalhos deste gênero.

Neste sentido, deve-se levar em conta, principalmente, a idéia de que o PD é um sistema que apresenta um estado de equilíbrio dinâmico, em que a evolução temporal dos processos é, sem dúvida nenhuma, a principal característica que o diferencia do sistema de PC. No PD o solo se aproxima de um organismo vivo e complexo, trocando permanentemente, matéria e energia com o meio na forma de um sistema aberto (Addiscott, 1995). As propriedades emergentes (Vezzani, 2001), nesta forma de cultivar o solo, são a expressão mais próxima de um sistema que proporciona a redução de risco e garante, em grande parte, a sustentabilidade da agricultura sob o ponto de vista econômico e ecológico. No PC todo o processo evolutivo é mais lento e interrompido a cada preparo de solo.

4.1 Condições de contorno

As condições de contorno que foram avaliadas durante a execução dos experimentos, e que interferem de forma direta ou indireta na dinâmica dos processos hídricos do sistema solo-planta-atmosfera, são três: condição química do solo; evolução temporal da cobertura de palha e condições meteorológicas. Embora o crescimento/desenvolvimento da cultura do milho também afeta a

dinâmica da água no solo, estes serão tratados como uma resposta da cultura do milho aos sistemas de manejo.

4.1.1 Condições químicas do solo

A respeito das condições químicas do solo, avaliadas antes da instalação da cultura do milho (Apêndice 4), verifica-se que os principais indicadores, normalmente utilizados na literatura para discriminar os respectivos sistemas de manejo (Falleiro et al., 2003), também foram avaliados no presente trabalho. Devido ao não revolvimento do solo e à manutenção da palha sobre o mesmo, observa-se, consistentemente, teores mais elevados de matéria orgânica nas camadas do solo em PD mais próximas da superfície, em relação ao PC. Pelas mesmas razões, associadas à adubação localizada, verifica-se maior concentração de nutrientes nas camadas de solo em PD logo abaixo da superfície, principalmente fósforo. Quanto aos demais indicadores as diferenças entre sistemas não foram nítidas, o que significa que pode ser considerado, com efeito, semelhante nos processos associados ao PD e PC (Apêndice 4).

A mudança nos teores de matéria orgânica e na condição nutricional às plantas, próximo à superfície afetam de forma indireta a parte hídrica do solo. No caso da matéria orgânica, seu principal efeito se dá sobre a modulação das propriedades físicas do solo, que afeta a armazenagem e disponibilidade de água no mesmo, como a estrutura e a porosidade (Carpenedo e Mielniczuk, 1990). A condição nutricional mais favorável rente à superfície altera a dinâmica hídrica, por modificar o crescimento radicular, principalmente no aspecto de aprofundamento do mesmo no perfil, favorecendo a concentração de raízes nas primeiras camadas de solo (Newell & Wilhelm, 1987; Mello Ivo e Mielniczuk, 1999).

4.1.2 Evolução da cobertura de palha

A quantidade de palha da cultura de inverno, adicionada ao solo, foi de 6,76Mg ha⁻¹ no PD e 6,68Mg ha⁻¹ no PC no experimento de 2001/02 e de 5,11Mg ha⁻¹ no PD e 4,29Mg ha⁻¹ no PC no experimento de 2002/03. A evolução temporal da mesma é mostrada no Apêndice 7.

Observa-se que houve elevada cobertura do solo em PD nos dois experimentos, sendo maior no primeiro do que no segundo, devido à maior

quantidade de palha adicionada. Apenas no segundo experimento, verificou-se tendência de redução da cobertura proporcionada pela palha com o tempo, em função da decomposição que ocorre naturalmente. No PC a pequena quantidade de palha que ficou sobre o solo, após as operações de aração e gradagem, se decompõe mais rapidamente que no PD, devido ao maior contato com o solo e microorganismos.

O efeito da palha sobre o solo no estado hídrico do mesmo em PD ocorre, principalmente, pela redução da evaporação, conforme mostram vários trabalhos na literatura (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990b; Campos et al., 1994; Salton & Mielniczuk, 1995). Entretanto, resultados preliminares de medição da evaporação, que fazem parte deste trabalho (Dalmago et al., 2003a), não ratificam tais evidências, apresentando, inclusive, tendência contrária, ou seja, de maior evaporação no solo em PD em relação ao PC. A maior evaporação em PD, em comparação ao PC, é suportada pelo pequeno efeito da palha em aumentar a refletância da superfície e reduzir o fluxo de calor para o solo ao longo do tempo, em relação ao PC (Dalmago et al., 2004a).

4.1.3 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas, nos dois períodos experimentais, apresentaram diferenças em relação às normais climatológicas do local (Bergamaschi et al., 2003a), principalmente quanto à precipitação pluvial e a ETo (Apêndice 8). A precipitação esteve acima da média nos meses de novembro, janeiro e fevereiro do primeiro experimento e nos meses de novembro, dezembro e fevereiro, do segundo experimento. Nos mesmos períodos, a ETo foi superior à normal apenas nos meses de fevereiro (0,7%) e janeiro (2,6%) do primeiro e segundo experimento, respectivamente. A redução máxima da ETo, em relação à média climática, ocorreu nos terceiros decêndios de janeiro e dezembro no primeiro e segundo experimentos, respectivamente, sendo em torno de 17% (Apêndice 8). A Rg e a temperatura média do ar estiveram próximas à média climática, durante todos os meses de condução dos experimentos. A precipitação pluvial e a variação diária da ETo, durante os períodos experimentais, estão representadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Durante o período de estabelecimento da cultura do milho (até cerca de 30 DAE) a precipitação pluvial foi superior a média climatológica nos

experimentos 1 e 2, na ordem de 35% e 74%, respectivamente. No primeiro experimento, a maior quantidade se concentrou nos primeiros 15 dias (Figura 1), enquanto, no segundo, a mesma esteve mais distribuída dentro do período de 30 DAE (Figura 2). Ao contrário da precipitação pluvial, ETo foi próximo a média climatológica nos dois experimentos, ficando em torno de 166mm e seguindo a tendência de variação da Rg no período. As condições observadas foram propícias para um adequado crescimento inicial do milho nos dois experimentos. Entretanto, a distribuição da precipitação no período promoveu variações na θ_v do solo, o que podem ter induzido a alterações em termos de expansão espaço-temporal do sistema radicular, com possíveis reflexos posteriores sobre a dinâmica da água.

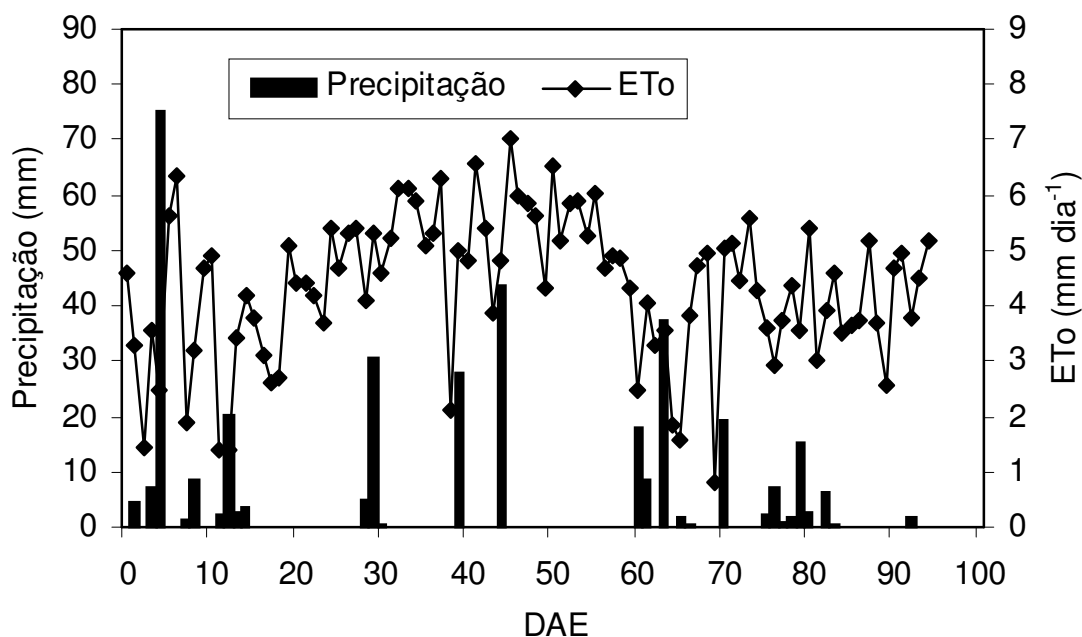


FIGURA 1. Precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ETo) em relação a dias após a emergência do milho (DAE) no primeiro experimento. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02. (Fonte: Boletim Agrometeorológico – EEA/UFRGS).

No crescimento vegetativo, período que vai dos 30 DAE a 55 DAE, aproximadamente, ocorreu o contrário do que foi verificado no estabelecimento da cultura. Enquanto a precipitação foi inferior à normal climatológica, a ETo superou a média, nos dois experimentos, acompanhando o aumento da Rg (Apêndice 8). Esta tendência se manteve durante o pendramento/espigamento do milho (até

cerca de 55 DAE a 60 DAE), determinando a ocorrência de curtos períodos de déficit hídrico, devido à ausência de precipitações e alta ETo (Figuras 1 e 2). No segundo experimento (2002/03) o déficit hídrico foi mais intenso que no primeiro (2001/02), em função de altos e constantes valores de ETo, bem como, às menores precipitações ocorridas antes da instalação do déficit, em relação às condições verificadas no ano de 2001/02.

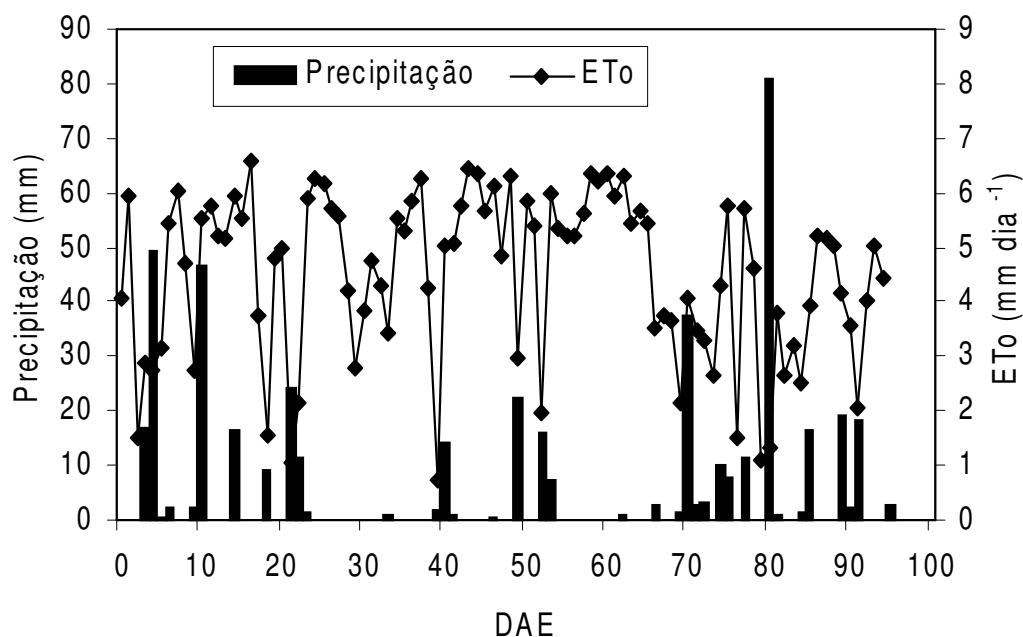


FIGURA 2. Precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ETo) em relação a dias após a emergência do milho (DAE) no segundo experimento. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03. (Fonte: Boletim Agrometeorológico – EEA/UFRGS).

Após o pendoamento, durante o período de enchimento de grãos do milho, as precipitações foram freqüentes nos dois experimentos (Figuras 1 e 2), restabelecendo condições adequadas de θ_v no solo. Isto, aliado à redução da ETo, em consequência da diminuição da R_g (Apêndice 8), proporcionou condições adequadas de θ_v para a parte final (1/3) do ciclo da cultura.

Considerando as condições meteorológicas, em macro-escala, de acordo com a previsão de longo prazo, os dois experimentos estiveram sob situações diferentes. No primeiro experimento (2001/02) a condição que prevaleceu foi neutra e no segundo (2002/03) foi de El Niño.

4.2 Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho

O crescimento e o desenvolvimento da cultura podem, ao mesmo tempo, ser afetados pelos sistemas de manejo e afetar os processos que ocorrem nos mesmos. Devido ao sistema utilizado, podem ocorrer alterações no crescimento das plantas e na data de ocorrência dos estádios fenológicos do milho. Em virtude disso, processos relacionados à dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera podem ser afetados pela alteração de variáveis de plantas, como o *IAF*.

No caso da disponibilidade hídrica no solo, o *IAF*, aliado à demanda evaporativa da atmosfera, determina a necessidade de água da cultura. Considerando que a água necessária às plantas é retirada do solo, o *IAF* interfere indiretamente na extração da água do mesmo, determinando maior ou menor velocidade deste processo de acordo com sua evolução.

A evolução da área foliar da cultura do milho, da emergência até o máximo *IAF*, em PD e PC e em condições hídricas contrastantes (I4 e I0), pode ser verificada nas Figuras 3 e 4. Para o experimento de 2001/02 (Figura 3) foram representados os dados medidos a campo, enquanto para o experimento de 2002/03 (Figura 4) os valores de *IAF* foram estimados para número de GD_{acm} , equivalentes aos momentos das medições feitas no experimento 2001/02, usando a equação 14 e com os coeficientes do Apêndice 6.

Nos dois experimentos, o *IAF* apresentou tendência semelhante de evolução ao longo do tempo, tanto entre PD e PC, quanto na relação dos mesmos com as condições hídricas (Figuras 3 e 4). O *IAF* máximo do milho, na condição irrigada (I4), foi em torno de 4% maior em PD do que em PC, atingindo valores próximos a $5,0\text{m}^2\text{ m}^{-2}$. Na área não irrigada, o mesmo oscilou entre $4,0\text{m}^2\text{ m}^{-2}$ e $4,2\text{m}^2\text{ m}^{-2}$, o que significou uma redução em torno de 20%, em relação ao *IAF* máximo verificado na área irrigada (Figuras 3 e 4). A mesma tendência foi observada quando o *IAF* de cada condição de cultivo foi estimado em função do número de folhas ou altura de plantas (Apêndice 6). Em todas as situações, apenas as diferenças entre condição hídrica, para um mesmo sistema de manejo de solo, foram significativas a 5% de probabilidade de erro, pelo teste de Tukey.

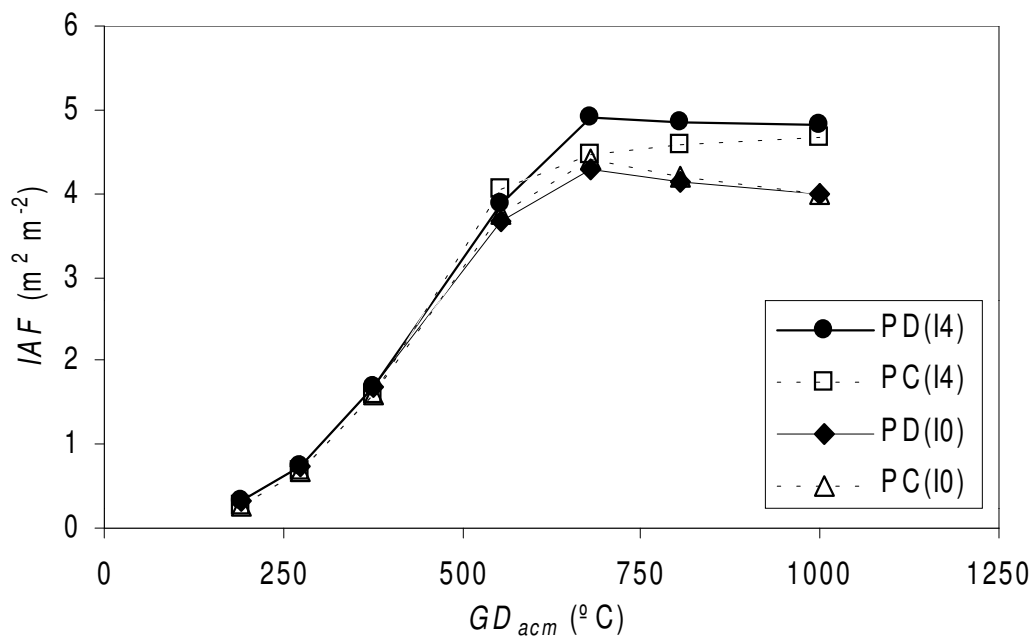


FIGURA 3. Evolução do índice de área foliar medido do milho (IAF) irrigado (I4) e não irrigado (I0) para o sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função de graus-dia acumulados (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

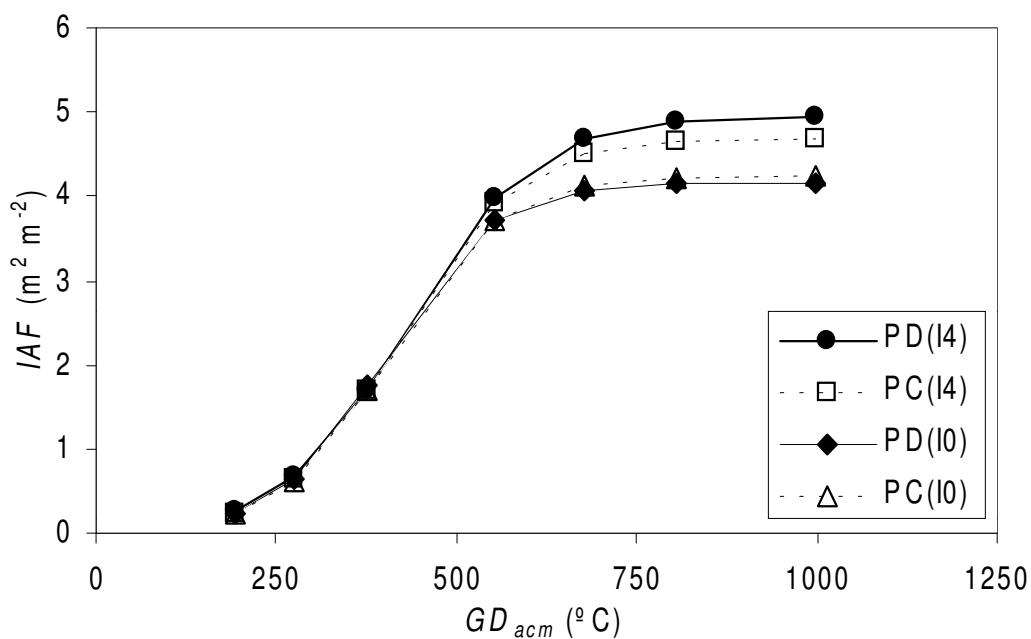


FIGURA 4. Evolução do índice de área foliar estimado do milho (IAF), irrigado (I4) e não irrigado (I0) para o sistema de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função de graus-dia acumulados (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

As diferenças de *IAF*, significativas ou não, tanto entre PD e PC, quanto entre as condições hídricas, num mesmo sistema de manejo de solo foram observadas a partir dos valores de *IAF* em torno de quatro, atingido, com cerca de 550 GD_{acm} ou 40 DAE (Figuras 3 e 4). Este momento correspondeu ao período de menor precipitação em ambos experimentos (Figuras 1 e 2). Por isso, a redução do *IAF* na área não irrigada pode ser atribuída à condição hídrica menos favorável em relação à área irrigada, a partir daquele momento. Por outro lado, isto significa que a irrigação, nos volumes aplicados (Apêndice 5), foi determinante para elevar o *IAF* do milho, potencializando a utilização dos recursos de produção, como a água, para a época de semeadura na área irrigada.

Na área irrigada o *IAF* mais elevado do milho cultivado em PD, mesmo que não significativamente diferente daquele em PC, em parte, também pode ser atribuído à melhor condição hídrica deste solo (Dalmago et al., 2003b) e ao fato das irrigações terem sido feitas com base na variação do Ψ_m medido em PD. Isso pode ter penalizado o milho cultivado em PC e contribuído para redução do *IAF*, em relação em PD, uma vez que a irrigação sempre foi realizada com atraso em PC, em relação ao ponto ótimo.

As tendências verificadas na evolução do *IAF* também foram observadas na altura de plantas e no número de folhas (Apêndice 9), sendo as mesmas mais evidentes e se aproximando da variação do *IAF* no experimento de 2002/03. Entretanto, nos dois experimentos, principalmente na área irrigada, tanto o número de folhas quanto à altura de plantas apresentaram tendências opostas ao *IAF*, ou seja, foram levemente superiores em PC, em relação a PD. Esta discordância pode ser atribuída ao menor número de plantas em PC (Apêndice 3), o que reduziu o *IAF*, mesmo que, individualmente, as plantas neste sistema de manejo tenham apresentado maior área foliar que em PD. Entretanto, avaliando o comprimento e a largura das folhas, verificou-se que, em média, o milho irrigado em PC, durante o crescimento vegetativo e no florescimento, apresentou folhas cerca de 4% mais compridas do que em PD, enquanto na largura não houve diferenças (Apêndice 10).

A fenologia da cultura do milho, com base na adaptação da escala de Hanway (1963), apresentada na Tabela 1, mostra que houve aumento no número de dias para o milho atingir um determinado estágio de desenvolvimento no experimento de 2002/03, em relação àquele de 2001/02. Este aumento no

número de dias, aliado à temperatura do ar mais elevada no ano de 2002/03, até o estabelecimento da cultura (cerca de 30 DAE), em consequência da maior radiação solar no período (Apêndice 11), determinaram maior soma térmica para o milho num determinado estágio, em relação à 2001/02, na média dos tratamentos. O aumento na soma térmica e no número de dias para atingir um determinado estágio em 2002/03 pode ser explicado pela menor amplitude térmica neste ano, ocasionada pelo aumento da temperatura mínima. Temperaturas mínimas mais elevadas estão associadas às temperaturas médias noturnas também mais elevadas em 2002/03, o que aumenta a respiração da cultura, reduzindo a fotossíntese líquida. Entretanto, considerando que, em média, houve um aumento de dois dias em 2002/03, em relação à 2001/02, as diferenças também podem ser atribuídas a erros de avaliação.

Analisando as tendências entre os sistemas de manejo, observa-se que o milho em PD demorou mais tempo para atingir um determinado estágio fenológico em relação aquele em PC (Tabela 1). O atraso foi verificado em quase todos os estágios de desenvolvimento e foi maior na área não irrigada (I0) do que na área irrigada (I4), nos dois experimentos.

Para uma mesma condição hídrica a diferença máxima entre os sistemas de manejo de solo foi de quatro dias e ocorreu no estágio de grão farináceo (2001/02). Já, entre as condições hídricas a situação mais contrastante foi observada no estágio de espigamento e polinização do ensaio de 2002/03, cujo atraso foi de oito dias em I0 em relação ao I4, tanto em PD quanto em PC. O atraso verificado em 2002/03 foi ocasionado pela estiagem ocorrida logo após o pendoamento (Figura 2), que manteve as plantas neste estágio por mais tempo, em relação às irrigadas, determinando, inclusive, que várias delas nem entrassem em espigamento (observação visual).

A variação entre os sistemas de manejo, verificado já a partir do crescimento inicial do milho, pode ter ocorrido em resposta à condição nutricional distinta entre PD e PC, especialmente em função da disponibilidade de nitrogênio. Em PD grande parte do nitrogênio mineral aplicado pode ser imobilizado pela atividade microbiana no solo, o qual é utilizado na decomposição do material

TABELA 1. Estádios fenológicos da cultura do milho, adaptados de Hanway (1963), em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), irrigado (I4) e não irrigado (I0), com as respectivas datas de amostragem (DA), dias após a emergência (DAE) e graus-dia acumulados (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

Estádio	Características da cultura	DA	Sistema e Nível de irrigação	DAE	GD_{acm}
.....Período experimental 2001/02.....					
0	Emergência	23/11/01	Todos tratamentos	0	0
1	Quatro folhas visíveis	28/11/01	PDI0, PDI4, PCI0	5	68
		29/11/01	PCI4	6	80
2	Oito folhas visíveis	15/12/01	PCI4	22	291
		16/12/01	PDI4, PDI0, PCI0	23	304
3	Doze folhas visíveis	31/12/01	PCI4	38	523
		02/01/02	PCI0	40	554
		03/01/02	PDI4	41	570
		04/01/02	PDI0	42	586
4	Pendoamento (50% das plantas)	14/01/02	PCI0, PCI4	52	749
		16/01/02	PDI0, PDI4	54	779
5	Espigamento e polinização	18/01/02	PCI0, PCI4	56	804
		19/01/02	PDI4	57	817
		21/01/02	PDI0	59	850
8	Grãos farináceos	14/02/02	PCI4, PCI0	73	1209
		18/02/02	PDI4, PDI0	77	1267
10	Grãos maduros fisiologicamente	22/02/02	PCI0	91	1330
		25/02/02	PDI0, PDI4, PCI4	94	1371
.....Período experimental 2002/03.....					
0	Emergência	02/12/02	Todos tratamentos	0	0
1	Quatro folhas visíveis	08/12/02	PCI0, PCI4	6	90
		10/12/02	PDI0, PDI4	8	119
2	Oito folhas visíveis	29/12/02	Todos tratamentos	27	403
3	Doze folhas visíveis	13/01/03	PCI0, PCI4	42	643
		15/01/03	PDI0, PDI4	44	678
4	Pendoamento (50% das plantas)	22/01/03	PDI4, PCI4	51	795
		25/01/03	PCI0	54	836
		26/01/03	PDI0	55	852
5	Espigamento e polinização	26/01/03	PDI4, PCI4	55	852
		03/02/03	PDI0, PCI0	63	1158
8	Grãos farináceos	18/02/03	Todos tratamentos	78	1241
10	Grãos maduros fisiologicamente	09/03/03	Todos tratamentos	97	1552

orgânico deixado na superfície. Com isso, o nitrogênio é liberado mais lentamente durante o ciclo do milho do que em PC, reduzindo a produção de carboidratos e atrasando o desenvolvimento inicial do milho em PD, em relação ao PC, com reflexos nos estádios posteriores da cultura. Entretanto, o suposto atraso na liberação do nitrogênio não se evidenciou no *IAF*, em função da variação no número de plantas entre os sistemas de manejo (Apêndice 3), mas, foi evidente, nas variáveis relacionadas ao crescimento da cultura, como altura de plantas e número de folhas, as quais apresentaram tendência de serem superiores em PC (Apêndice 9). A contribuição do nitrogênio no início do ciclo do milho é suportada pelo fato que as plantas estiveram em condições ambientais semelhantes e com níveis adequados de outros nutrientes para a produção da cultura (Apêndice 4).

4.3 Propriedades físicas do solo

A mudança do sistema de manejo de solo da forma convencional para o PD afeta, de imediato, duas propriedades físicas do solo, que são a densidade e a porosidade. Estas propriedades são básicas para explicar a variação imediata e a evolução temporal de outras propriedades relacionadas à dinâmica dos fluxos no solo, especialmente, o fluxo hídrico.

4.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo, nos dois sistemas de manejo, pode ser observada na Figura 5. Verifica-se que houve variação inversa da mesma entre PD e PC, em profundidade. A densidade aumentou em PD e reduziu-se em PC. A tendência foi influenciada pelo valor da mesma na camada superficial do solo em PC.

A análise de variância detectou interação significativa ($P < 0,05$) para a densidade do solo entre os sistemas de manejo e as profundidades avaliadas até 0,825m e, também, para a camada mais afetada pelo PD (0-0,375m). Próximo à superfície a densidade foi significativamente menor em PD em relação a PC, com diferença de cerca de 7% (Figura 5). Esta tendência é inversa àquela observada por Rojas & Van Lier (1999) na mesma área experimental, após três anos de implantação dos sistemas.

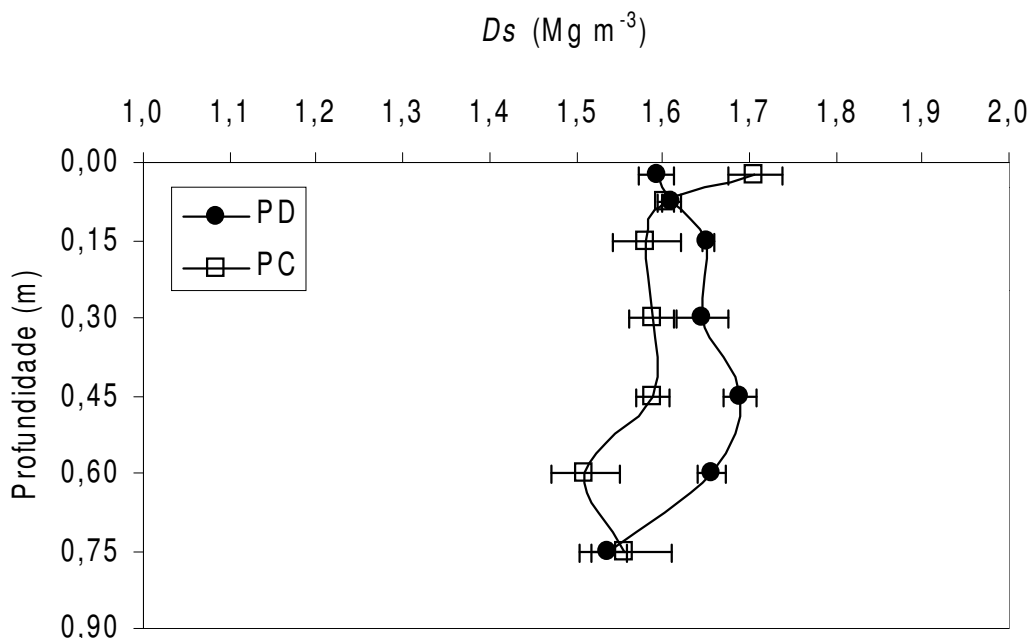


FIGURA 5. Densidade do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades, e respectivo desvio padrão. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Os resultados observados para a camada superficial contrariam tendências amplamente aceitas, de que a densidade é maior nesta camada de solo em PD (Lima & Lima, 1995a). Por outro lado, concordam com outros resultados da literatura, que mostram menor densidade em PD em relação ao convencional nas camadas próximas à superfície (Carter & Steed, 1992; Anjos et al., 1994; Olaoye, 2002).

Nas camadas subsuperficiais a densidade foi maior em PD ou semelhante entre sistemas, apresentando diferença significativa entre PD e PC apenas a 0,45m e 0,6m de profundidade (Figura 5). Nestas camadas (0,375m a 0,525m e 0,525m a 0,675m, respectivamente) a densidade foi cerca de 6% e 10% mais elevada do que em PC, mantendo tendência observada por Rojas (1998) no terceiro ano de implantação dos sistemas de manejo de solo. Os resultados relativos observados concordam com tendências médias encontradas na literatura, inclusive para outros tipos de solo (Da Ros et al., 1997; Rojas & Van Lier, 1999; Stone & Silveira, 2001).

A diferença verificada próximo à superfície pode ser atribuída tanto a um aumento de densidade em PC, quanto a uma redução da mesma no solo em PD, até 0,15m de profundidade (Figura 5). Isto pode ocorrer porque a mesma não é uma grandeza estática, podendo variar entre o preparo e a colheita, num mesmo solo (Derpsch et al., 1991; Franzluebbbers et al., 1995).

O aumento da densidade do solo próximo a superfície em PC pode ter sido provocado pela consolidação natural do mesmo após o revolvimento feito pela gradagem realizada na semeadura da aveia+ervilhaca, no outono. Em PD também foi realizada gradagem, mas o efeito provocado pela mesma, provavelmente, foi amortecido pela maior quantidade de resíduos na superfície e devido ao solo encontrar-se melhor estruturado, em função do maior teor de matéria orgânica nesta camada (Apêndice 1), conforme evidenciaram Fernandes et al. (1983) e Eltz et al. (1989). Segundo Albuquerque et al. (1995), o efeito da matéria orgânica é mais significativo em sistemas que têm incluído o milho como cultura em rotação, devido à grande quantidade de biomassa que esta cultura deixa sobre o solo. Na área em que foi realizado este experimento o milho foi a cultura de verão cultivada desde a implantação destes sistemas de manejo, em 1995, o que justificaria, em parte, a variação observada.

As diferenças na densidade entre o solo em PD e PC, nas profundidades de 0,45m e 0,6m (camadas de 0,375m a 0,525m e 0,525m a 0,675m, respectivamente) (Figura 5), provavelmente, se devem muito mais à variabilidade espacial do solo do que a alterações provocadas pelos sistemas de manejo. Entretanto, esta hipótese não pode ser totalmente descartada porque há evidências de que o efeito do sistema de manejo pode alcançar esse limite (Stone & Silveira, 2001). No caso do solo em que foi realizado o presente trabalho, entre essas profundidades inicia-se o horizonte Bt (Rojas, 1998), que apresenta, próxima à transição, uma camada com grande quantidade de concreções (observação visual). Esta condição, associada ao caráter pontual da coleta de amostras, pode ter induzido a uma maior variabilidade na densidade do solo, do que os sistemas de manejo poderiam provocar nestas profundidades.

4.3.2 Porosidade total

A análise de variância não detectou interação significativa entre sistemas de manejo e profundidades de amostragem para a porosidade total do

solo, em nenhuma das duas análises realizadas. A porosidade total apresentou diferença significativa entre PD e PC apenas entre as profundidades, sendo, proporcionalmente, mais elevada nas maiores profundidades em relação à superfície do solo (Figura 6).

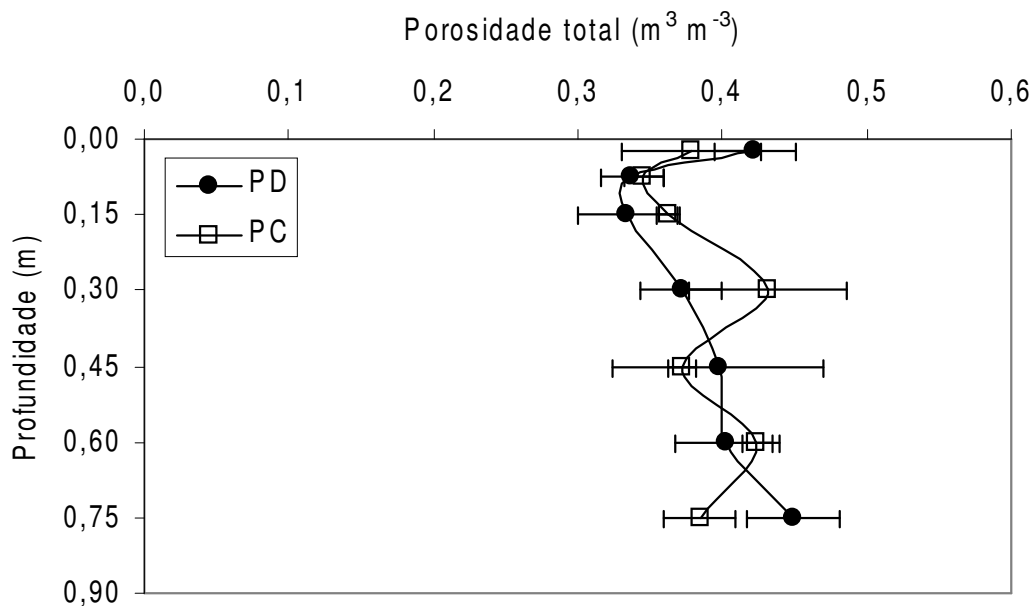


FIGURA 6. Porosidade total do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades no perfil. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Mesmo a porosidade total não tendo apresentado diferenças significativas entre sistemas, as tendências observadas entre PD e PC podem ser de grande importância, principalmente para o caso de PD. Neste sistema, pequenas alterações na porosidade, em relação ao PC, alimentam o processo de evolução temporal presente no solo em PD, o que configura a necessidade de avaliação desta propriedade, mesmo que a diferença, em média, não seja significativa.

A necessidade de conhecer como evoluem as propriedades físicas e os processos associados, como a transferência de água e calor, está implícita em vários trabalhos. Eles mostram que o PD atinge um estado de equilíbrio em suas propriedades físicas e se diferencia do PC, somente vários anos após o início do mesmo (Voorhees & Lindstron, 1984; Kay & VandenBygaart, 2002). Assim, as diferenças são também resultantes do processo de evolução que agrega

pequenas contribuições ao longo do tempo na variação das propriedades e dos fluxos associados ao PD.

Com base nesta premissa verificou-se que a porosidade total na camada de solo mais próxima à superfície foi mais elevada no PD, (Figura 6), em relação ao PC, devido à menor densidade do solo neste sistema de manejo (Figura 5). Na camada entre 0,075m e 0,375m a tendência se inverteu, e a porosidade total foi menor no solo em PD do que naquele em PC. Também neste caso, a redução da porosidade total se deve à densidade mais elevada do solo em PD (Figura 5).

Os resultados encontrados, principalmente nas camadas próximas à superfície em PC, mantêm a relação entre massa e volume do solo, que descreve a dependência física entre a variação da densidade e a porosidade do solo, apesar de não concordarem com afirmações geralmente feitas, de que a porosidade total do solo em PD é menor em relação ao PC (Tormena et al., 1998b, Ghuman & Sur, 2001). Por outro lado, estes resultados estão de acordo com as afirmações de Voorhees & Lindstrom (1984), de que a partir do quarto ano da implantação do sistema, começam a aparecer os “benefícios” do PD sobre a porosidade, atingindo o equilíbrio após o sétimo ano (Corsini & Ferraudo, 1999). Como benefício, entende-se o aumento da porosidade total do solo em PD em relação ao PC, bem como as conseqüências que advêm da variação da mesma, principalmente, sobre os fluxos de água.

Nas camadas de solo entre 0,375m a 0,675m e de 0,675m a 0,825m a relação entre a densidade do solo e a porosidade total não manteve a correspondência esperada entre massa e volume. Na primeira camada (0,375m a 0,675m) a densidade foi superior no solo em PD, enquanto na segunda (0,675m a 0,825m) ela foi semelhante ao solo em PC (Figura 5). A porosidade total apresentou tendência homogênea de ser mais elevada em PD (Figura 6), o que não concorda com a variação da densidade (Figura 5). A relação entre massa e volume não se confirmou, principalmente, devido às duas propriedades terem sido determinadas com diferentes amostras, o que aumenta a possibilidade de influência da variabilidade espacial do solo e dos erros aleatórios.

Nos dois sistemas de manejo, a porosidade total no solo, apresentou tendência de aumento em profundidade (Figura 6). Neste caso, o aumento pode ser atribuído a teores mais elevados de argila das camadas mais profundas

(Apêndice 1) (Eltz et al., 1989). Devido ao seu arranjo, em função da sua forma predominantemente laminar e ao poder de agregação, a argila eleva a porosidade total do solo em relação a horizontes mais arenosos, cuja forma das partículas são, na sua maioria, esférica e com pouca capacidade de agregação.

4.3.3 Macro, meso e microporosidade

A interação entre sistemas de manejo e profundidades de amostragem foi significativa apenas para a macroporosidade (Figura 7a) e a mesoporosidade (Figura 7b) na análise de variância, considerando todo o perfil do solo (0 a 0,825 m) e para a mesoporosidade, relativa à camada 0 a 0,375m de profundidade.

No caso da macroporosidade, diferenças significativas entre PD e PC foram observadas nas camadas de 0,375m a 0,525m, 0,525m a 0,675m ($P < 0,05$) e 0,675 a 0,825m ($P < 0,10$), sendo a mesma mais elevada em PD (Figura 7a). Para a mesoporosidade, a diferença foi significativa nas camadas de 0,225m a 0,375m e 0,525m a 0,675m ($P < 0,05$), com valores menores em PD em relação a PC (Figura 7b).

Na microporosidade (Figura 7c) a análise de variância englobando todo o perfil mostrou diferença significativa apenas entre camadas do solo em que a camada de 0,675m a 0,825m, diferiu das demais. Na análise de variância da camada 0 a 0,375m a diferença foi significativa apenas entre sistemas de manejo, ocasionada pelas diferenças significativas nas camadas de 0,05m e 0,1m e 0,1m a 0,225m. No entanto a microporosidade foi superior no solo em PC na maioria das profundidades avaliadas.

A redução da microporosidade em PD foi em média de 12 %, na camada de 0 a 0,375m de profundidade, ocasionada, principalmente, pela diferença entre sistemas, observada nas camadas de 0 a 0,05m e de 0,05m a 0,1m (Figura 7c). Na mesma área experimental, Rojas & Van Lier (1999) também encontraram menor microporosidade no solo em PD em relação àquele em PC, com três anos de utilização dos sistemas de manejo. Na ocasião, a diferença foi cerca de 20% em relação ao solo em PC.

A macroporosidade do solo (Figura 7a) não foi nitidamente afetada pelo PD até 0,375m de profundidade, considerando que as diferenças não foram significativas e os valores se mantiveram próximos àqueles do solo em PC. Isso pode ter ocorrido devido às amostragens terem sido feitas no final do ciclo das

culturas de cobertura de inverno (aveia+ervilhaca), quando a porosidade de aeração, provavelmente, se encontrava, ao menos em parte, ocupada pelo sistema radicular dessas espécies (Asady & Smucker, 1989) nos dois sistemas.

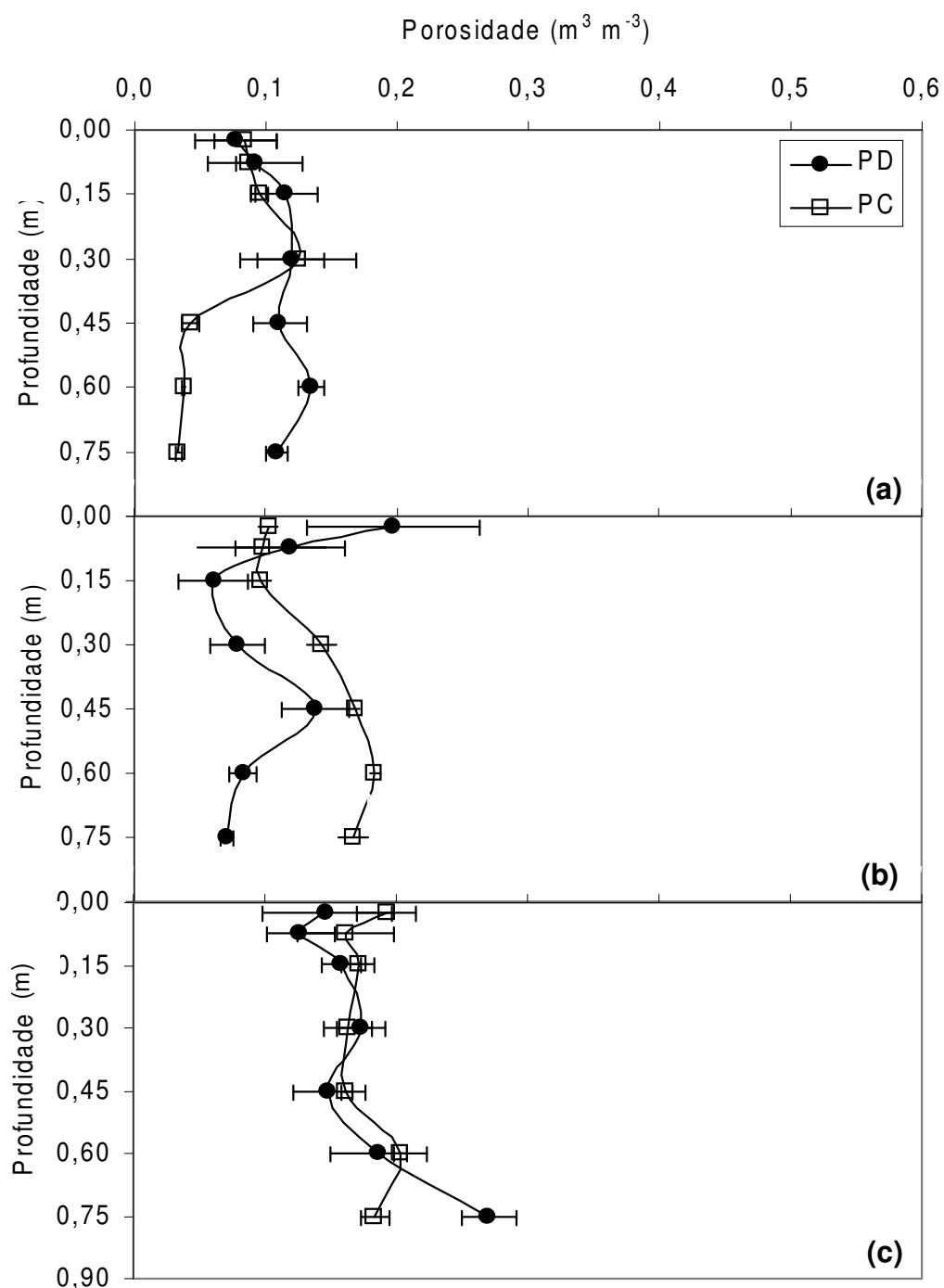


FIGURA 7. Macroporosidade (a), mesoporosidade (b) e microporosidade (c) do solo cultivado em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades no perfil. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

No restante do perfil, menores valores de macroporosidade no solo em PC, em relação àquele em PD, também foram verificados por Rojas e Van Lier (1999) no terceiro ano de implantação dos sistemas, assim como por outros autores em solos e locais diferentes (Derpsch et al., 1986; Azooz & Arshad, 1996). Uma das causas que podem explicar essa variação da macroporosidade em PC é a ocorrência de compactação subsuperficial, no chamado “pé de arado”. No entanto, não foi detectado forte aumento da densidade do solo abaixo de 0,375m de profundidade que justificasse a ocorrência deste fenômeno. Por isso, a diferença verificada entre PD e PC, principalmente, se deve à presença do horizonte Bt e suas características, já discutidas no item sobre densidade. Entretanto, a macroporosidade pode ter diferido, também, em decorrência de problemas metodológicos na determinação da mesma, já que as repetições, daquelas camadas compuseram lotes separados das demais no momento de entrada nos funis de “Haines”.

Além de facilitar a drenagem natural do solo, a macroporosidade tem a função de permitir a aeração do mesmo. Vomocil & Flocker (1961), consideraram como limite crítico para uma aeração adequada uma macroporosidade de $0,1\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, a fim de permitir suprimento suficiente de oxigênio às raízes e à fauna do solo. Esta condição não foi atingida em nenhum dos sistemas de manejo, na camada de solo de 0 a 0,1m (Figura 7a). No restante do perfil, a porosidade de aeração superou o limite crítico considerado, em todas as camadas amostradas no solo em PD, enquanto naquele sob PC o nível de aeração esteve adequado apenas na camada entre 0,225m a 0,375m de profundidade.

Os resultados apresentados acima, quanto à aeração do solo, indicam restrição ao crescimento satisfatório das plantas, sob o ponto de vista de suprimento de oxigênio ao sistema radicular no solo em PC. Entretanto, a condição restritiva da camada superficial (até 0,1m), pode ser considerada momentânea (Boone et al., 1987), em função, principalmente, da ocupação dos poros pelas raízes da aveia+ervilhaca e da movimentação superficial feita pela gradagem, na implantação da cultura de inverno. Esta operação pode ter aumentado a densidade, reduzindo a macroporosidade do solo em ambos sistemas de manejo.

Mesmo que esse efeito restritivo se mantenha, depois do encerramento do ciclo da cultura de inverno e com a decomposição das raízes, ele ainda não

chega a ser um problema limitante, tanto no solo em PD quanto naquele em PC. No caso do PD, normalmente, a semeadura das culturas de verão é feita entre 0,05m a 0,07m de profundidade, com colocação do adubo imediatamente abaixo das sementes. Isto possibilita que o sistema radicular atinja, rapidamente, as camadas inferiores de solo, que apresentam porosidade de aeração superior ao limite crítico. Além disso, a movimentação do solo na linha de semeadura aumenta a macroporosidade e, por conseqüência, a aeração do mesmo no início do crescimento das plantas. Ainda, a atuação da fauna do solo proporciona canais de comunicação como o interior do perfil (Griffith et al., 1992), facilitando a difusão do oxigênio e, ao mesmo tempo, o crescimento radicular, devido à menor resistência física e a melhor aeração. No caso do PC, a restrição observada, quanto à aeração do solo, não chega a ser limitante, pois neste sistema de manejo, é feito o revolvimento da camada superficial para a semeadura. A aração eleva a macroporosidade do solo (Da Ros et al., 1997; Stone e Silveira, 2001) até, aproximadamente 0,2m de profundidade, facilitando a aeração do mesmo. Como o solo em PC apresentou macroporosidade acima de $0,1\text{m}^3\text{ m}^{-3}$, logo abaixo deste limite (0,2m), deduz-se que a limitação quanto ao suprimento de oxigênio às raízes não se constituiu fator limitante ao crescimento adequado das plantas, também no PC.

Na faixa da mesoporosidade estão os poros que, em média, apresentaram maior diferença entre os sistemas PD e PC, tanto próximo à superfície quanto nas camadas mais profundas do solo (Figura 7b). Ao longo do perfil, as alterações na mesoporosidade seguiram as diferenças observadas na densidade do solo, entre os dois sistemas de manejo, aumentando ou diminuindo conforme a variação desta (Figura 5). A estreita relação entre essas duas propriedades se deve a que, na medida em que aumenta a densidade do solo, os poros de maior tamanho (macroporos) são facilmente colapsados, reduzindo seu diâmetro e passando a integrar a classe dos mesoporos. Devido a esta correspondência entre mesoporosidade e densidade e, considerando que a densidade do solo é a primeira propriedade a ser afetada pela utilização do PD, pode-se inferir que a porosidade responsável pela retenção de água disponível às plantas (mesoporosidade) foi a classe de poros mais afetada por este sistema de manejo de solo.

4.3.4 Distribuição do tamanho de mesoporos

Devido à importância que a mesoporosidade tem na armazenagem de água no solo, sobretudo de água disponível às plantas, foi avaliada a distribuição do tamanho de mesoporos, em cinco subclasses de diâmetros, em cada camada de solo monitorada (Figura 8).

A análise de variância detectou interação significativa entre sistemas de manejo e profundidade de amostragem, nas duas subclasses de maior diâmetro de mesoporos, mas apenas com os dados de todo o perfil. A diferença entre sistemas foi significativa nas camadas entre 0,375m a 0,525m e 0,525m a 0,675m de profundidade, para a segunda e primeira subclasses de diâmetro de mesoporos, respectivamente. Em ambas subclasses, a mesoporosidade foi mais elevada em PC em cerca de 763% e 272%, respectivamente (Figura 8).

Nas demais subclasses de diâmetro de poros foi observada diferença significativa somente entre as camadas amostradas. Entre sistemas foi verificada diferença significativa apenas na subclasse 1,0 μ m-2,9 μ m. A falta de significância das diferenças, principalmente, entre os sistemas de manejo, pode ser atribuída à grande variabilidade entre as repetições, que tiveram coeficientes de variação acima de 30% na maioria dos casos.

Avaliando-se de forma mais detalhada as tendências de distribuição da mesoporosidade entre os sistemas de manejo, observou-se, nitidamente, duas situações distintas. Enquanto, nas camadas mais próximas à superfície a distribuição de subclasses de mesoporosidade mantém uma tendência clara, entre sistemas, abaixo de 0,375m de profundidade a distribuição é mais aleatória, ou seja, ora apresenta uma forma no solo em PD ora a mesma forma é apresentada no solo em PC (Figura 8).

Nas quatro camadas de solo mais próximas à superfície, a distribuição da mesoporosidade apresentou uma redução exponencial no solo em PD, a partir da classe de maior diâmetro, enquanto no solo em PC esta segue uma tendência que se aproxima de uma distribuição normal (Figura 8). Isto significa que, no PD, a maior quantidade de mesoporos no solo está concentrada mais próxima do limite com a macroporosidade, portanto, poros de maior diâmetro. Por sua vez, no solo em PC, a distribuição seguindo a tendência de uma curva normal, indicando que a maior quantidade de mesoporos encontram-se na subclasse de diâmetro médio, ou seja, entre 1,0 μ m e 2,9 μ m.

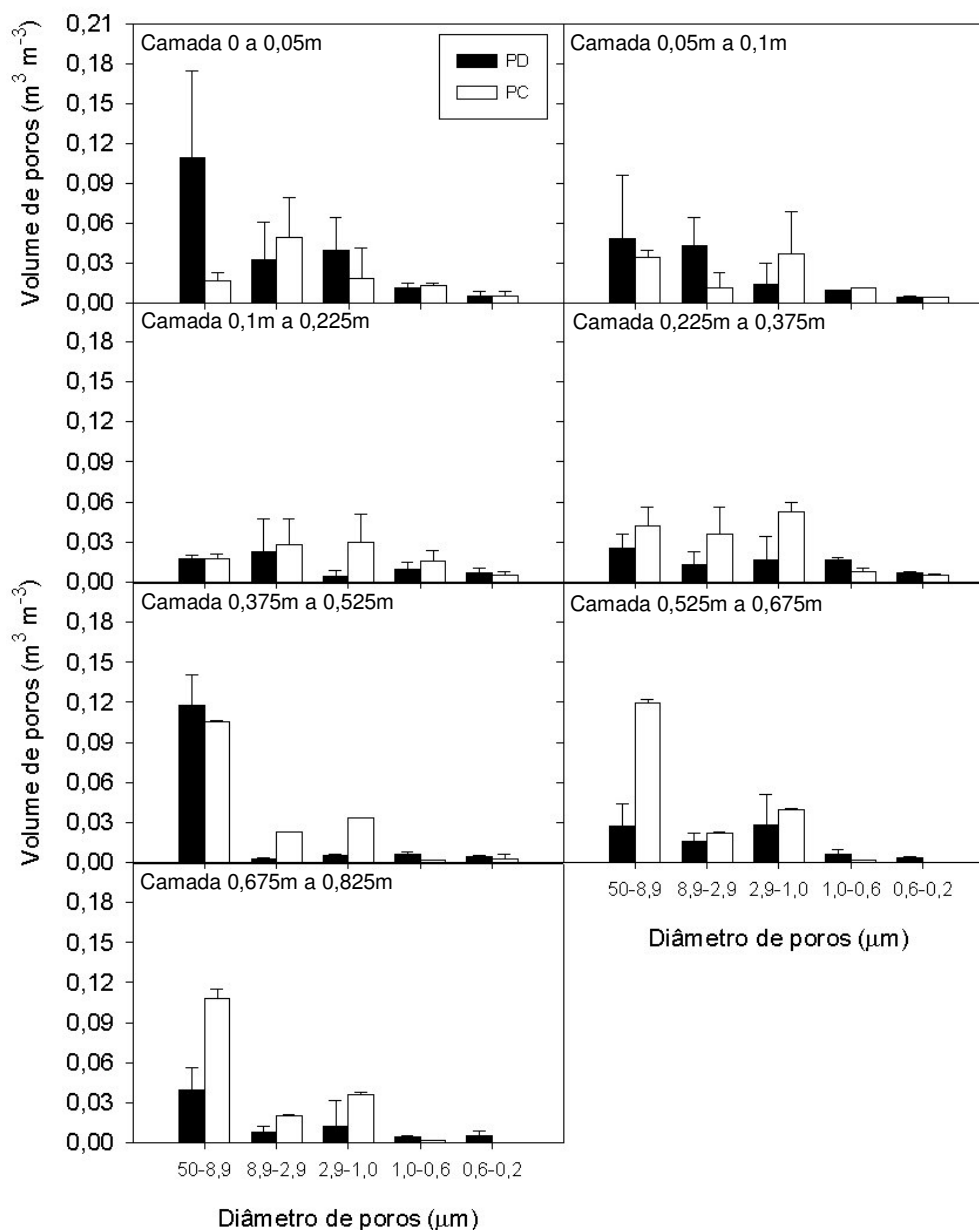


FIGURA 8. Distribuição da mesoporosidade das diferentes camadas de solo, em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes subclasses de diâmetro de mesoporos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Esta variação entre o solo em PD e em PC pode se atribuída, principalmente, ao revolvimento no PC, que afeta a estrutura do solo da camada arável, concentrando a maior quantidade de mesoporos na classe média. Além disso, a concentração de matéria orgânica sobre a superfície em PD, associada ao não revolvimento, à atividade da fauna do solo e do sistema radicular das

plantas, induzem a uma tendência exponencial de distribuição da mesoporosidade entre as subclasses selecionadas, já que um volume mais elevado de poros maiores se origina na presença destas características (Schaefer et al., 2001). Considerando que a maioria dos processos naturais não seguem uma tendência linear, a diminuição dos distúrbios no solo em PD permite esperar a tendência verificada.

Para uma melhor visualização do efeito dos sistemas de manejo, os valores de cada subclasse de distribuição de poros que compõem a mesoporosidade foram agrupados, para a camada de solo entre 0 e 0,375m de profundidade (Figura 9). Nesta camada de solo, que sofre maior impacto do sistema de manejo, ficou mais nítida a tendência de que o PD concentra o maior volume de mesoporos na subclasse de diâmetro mais elevado e, também, que a redução exponencial entre as subclasses se mantém (Figura 9). Quanto ao PC, também ficou salientado que, nas mesmas condições, a distribuição de subclasses da mesoporosidade tende à forma normal, com os valores mais elevados próximos à subclasse média. A mudança na distribuição de mesoporos entre as subclasses repercute em diferença na energia de retenção da água no solo e, portanto, na estratégia de extração da mesma pelas plantas. Considerando o exposto, uma mesma quantidade de água fica retida com mais energia no solo em PC do que no solo em PD.

A tendência observada no solo em PD foi ocasionada, principalmente, por valores encontrados nas camadas 0 a 0,05m e 0,05m a 0,1m, os quais foram cerca de 560% e 41%, respectivamente, mais elevados do que aqueles encontrados no PC (Figura 8). Esses resultados são forte indício de que a mesoporosidade é, realmente, mais afetada pelo PD do que a macro e microporosidade, principalmente, na camada superficial, privilegiando os solos em PD, no sentido de aumentar a capacidade de retenção de água disponível às plantas. Isto, provavelmente, ocorre pelo não revolvimento do solo, associado à adição de matéria orgânica na superfície, a qual reduz a densidade e aumenta a agregação do mesmo na camada superficial, favorecendo a porosidade de retenção de água, juntamente com a atividade biológica.

O maior volume de mesoporos na subclasse mais próximas ao limite da macroporosidade, no solo sob PD, de certa forma, compensa a porosidade de aeração crítica discutida anteriormente. Isso se verifica porque o limite entre os

macro e mesoporos não é rígido, a ponto de impedir que poros entre $8,9\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ não contribuam, de forma eficiente, para a aeração do solo.

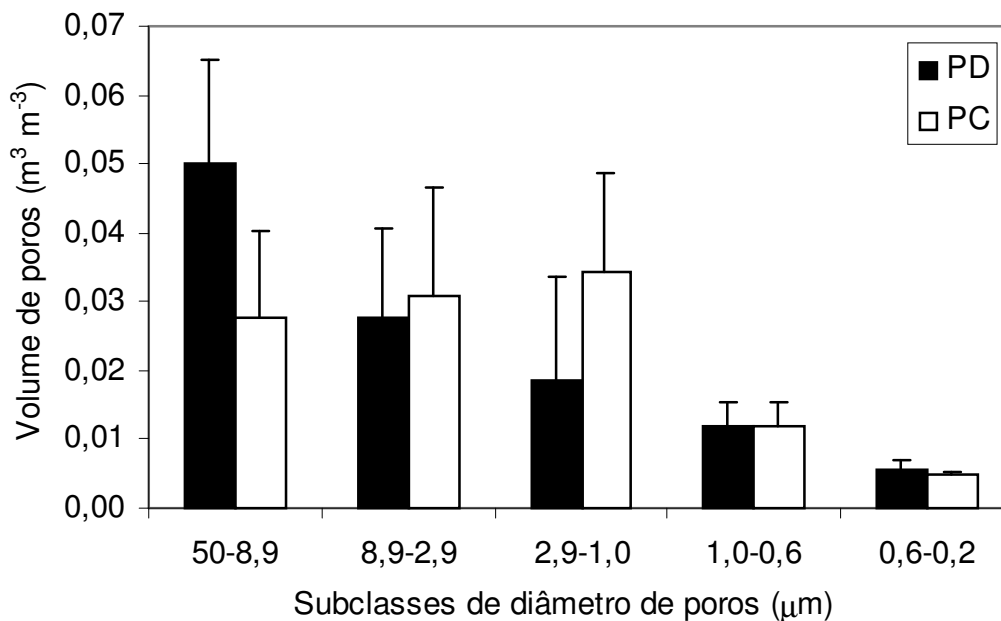


FIGURA 9. Distribuição da mesoporosidade da camada de solo entre 0 a 0,375m de profundidade, em plantio direto (PD) e no preparo convencional (PC), em diferentes subclasses de diâmetro de poros. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

A distribuição da mesoporosidade em PD também evidencia o aspecto de evolução deste sistema, na medida em que os poros se concentram nas subclasses de maior diâmetro. Este fato também configura que houve maior resistência ao colapso provocado pelo tráfego de máquinas, principalmente em condições inadequadas de θ_v no solo, talvez, por causa dos bioporos apresentarem outra configuração e distribuição geométrica, que não aquela dos poros interagregados.

4.3.5 Correlação entre densidade e porosidade do solo

A relação de associação entre a densidade e a porosidade do solo pode ser verificada na Tabela 2, através da análise de correlação. Esta análise foi feita apenas para a camada de solo de 0 a 0,375m de profundidade, a qual é mais afetada pelos sistemas de manejo, especialmente, o PD.

TABELA 2. Correlação entre a densidade e a porosidade do solo em plantio direto e preparo convencional e nível de significância dos coeficientes (entre parênteses), para a camada de solo mais afetada pelos sistemas de manejo: 0 a 0,375m de profundidade. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Propriedades Físicas	Coeficiente de correlação de Pearson ($P>r$)				
	Densidade	Porosidade total	Macro porosidade	Meso porosidade	Micro porosidade
.....Plantio direto.....					
Densidade		-0,57	+0,50	-0,80	+0,54
Porosidade total	(0,067)		+0,12	+0,57	+0,11
Macroporosidade	(0,121)	(0,715)		-0,65	+0,55
Mesoporosidade	(0,003)	(0,054)	(0,022)		-0,66
Microporosidade	(0,089)	(0,744)	(0,063)	(0,019)	
.....Preparo convencional.....					
Densidade		-0,28	-0,43	-0,34	+0,38
Porosidade total	(0,396)		+0,88	+0,52	+0,27
Macroporosidade	(0,180)	(0,001)		+0,29	+0,20
Mesoporosidade	(0,305)	(0,082)	(0,355)		-0,57
Microporosidade	(0,241)	(0,402)	(0,541)	(0,051)	

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, verifica-se que, em geral, a relação de dependência entre as propriedades físicas analisadas se apresenta mais significativa no solo em PD do que naquele em PC. Isso indica uma possível maior homogeneidade da condição física do solo sob aquele sistema de manejo, o que, de certa forma, contraria afirmações feitas por Souza (1992) de que a variabilidade espacial do solo é maior em PD do que em PC, devido ao não revolvimento do mesmo e à maior atividade da fauna.

No solo em PC, praticamente todas as relações seguiram a tendência esperada (Tabela 2). De acordo com os resultados, o aumento da densidade reduz a porosidade total, a macroporosidade e mesoporosidade, e aumenta a microporosidade do solo. O principal efeito foi observado sobre a macroporosidade do solo, com $r = -0,43$ ($P>0,18$), conforme mostram a maioria dos trabalhos na literatura. À medida que aumenta a porosidade total do solo, aumenta mais significativamente a macroporosidade ($r = +0,88$; $P>0,001$), o que está de acordo com o efeito do revolvimento do solo. No entanto, com o aumento da porosidade total, também aumenta a meso e a microporosidade (Tabela 2), por

causa da desagregação do solo no momento do preparo. Já a redução da mesoporosidade do solo promove o aumento da microporosidade, de forma significativa ($P > 0,051$), seguindo a dependência física existente entre ambas variáveis. Portanto, no solo em PC, a relação entre as variáveis apresentadas na Tabela 2 seguiu a ligação física existente entre as mesmas.

No solo em PD nem todas as correlações apresentadas mostraram a dependência física esperada (Tabela 2), conforme verificado na correlação entre a densidade e a macroporosidade do solo. Nesta, não ocorre redução da macroporosidade com o aumento da densidade. Ao contrário do esperado, o coeficiente de correlação foi positivo ($P > 0,121$), o que indica aumento ou redução da macroporosidade com o aumento ou redução da densidade do solo. Em termos físicos isto parece incoerente, mas pode ser explicado pela diferença na dinâmica das relações que ocorrem no solo em PD, em relação àquele sob PC, principalmente, a forte participação de fatores biológicos.

A correlação positiva entre a densidade e a macroporosidade no solo em PD se deve à redução da densidade na camada superficial com o aumento do teor de matéria orgânica e com a atividade da fauna do solo. Esses fatores, juntamente com a decomposição de raízes, mantêm um volume de macroporos no solo em PD, que é pouco afetado pelo aumento da densidade do mesmo. A macroporosidade, oriunda da atividade microbiana ou radicular, apresenta maior resistência ao processo de compactação do que os macroporos formados entre agregados. Além disso, a mesma está em constante renovação, num equilíbrio dinâmico, o que garante maior estabilidade ao longo do tempo. A matéria orgânica também contribui neste sentido por aumentar a estabilidade de agregados (Carpenedo & Mielniczuk, 1990), o que proporciona maior resistência ao colapso dos macroporos pelo processo de compactação do solo.

A relação direta entre a densidade e a macroporosidade também pode estar indicando que o solo sob PD já sofreu um processo de compactação significativo, até o momento de realização destas avaliações, suprimindo quase totalmente os macroporos de formação interagregados. Analisando a evolução temporal da densidade do solo, a partir dos resultados obtidos por Rojas e Van Lier (1999) em relação àqueles obtidos neste trabalho, verifica-se que, realmente, a densidade aumentou em cerca de 5% ao longo dos últimos quatro anos. Com base nisso e na discussão apresentada no parágrafo anterior, um aumento da

densidade do solo por um processo mecânico, como o tráfego de máquinas na superfície do solo, não mais afetaria a macroporosidade do solo, mas sim, a classe dos mesoporos. Esta idéia é reforçada pela correlação inversa entre a densidade e a mesoporosidade do solo em PD ($r = -0,8$), cujo coeficiente de correlação foi significativo a 0,3% de probabilidade. Portanto, um aumento da densidade neste solo afetaria negativamente a porosidade de retenção de água e, conseqüentemente, os processos associados, como os fluxos térmico e hídrico.

Por outro lado, se considerarmos que a densidade do solo pode ser diminuída com o tempo de cultivo em PD, em parte, pela adição de matéria orgânica, pode-se inferir que a mesoporosidade será favorecida muito mais do que macroporosidade do solo. Assim, a adição de matéria orgânica, pelo seu efeito sobre as propriedades físicas e pelas suas características intrínsecas, favorece a retenção de água nas camadas mais próximas à superfície do solo em PD.

A relação entre macro e mesoporosidade ($r = -0,65$) também foi negativa e significativa a 2,2% de probabilidade, demonstrando que os mesoporos no solo em PD podem aumentar pela redução da macroporosidade, evidenciando, de forma clara, o que já foi discutido anteriormente. Considerando que a relação entre densidade e macroporosidade é positiva, o aumento da mesoporosidade pela redução da quantidade de macroporos não ocorreria por um processo de compactação do solo conforme mencionado anteriormente. Neste caso, o fato que, provavelmente, explicaria essa relação de dependência, seria a ocupação dos macroporos pelas raízes da cultura de inverno, já que as medições foram feitas no final do ciclo da mesma. A partir disso, as relações de dependência, observadas na Tabela 2, poderiam não ter sido encontradas se as avaliações tivessem sido feitas em outro momento, embora, todas elas (Tabela 2) apresentem embasamento físico.

4.4 Entrada e movimentação de água no solo

4.4.1 Infiltração de água

A análise de variância não detectou interação significativa entre sistemas de manejo e a evolução temporal da taxa de infiltração (V_i) e da infiltração acumulada (I_a). Isto significa que, em média, ambos sistemas de

manejo de solo afetaram, de forma semelhante, essas variáveis. A V_i e a I_a , ao longo do tempo, estão representadas nas Figuras 10a e 10b, respectivamente.

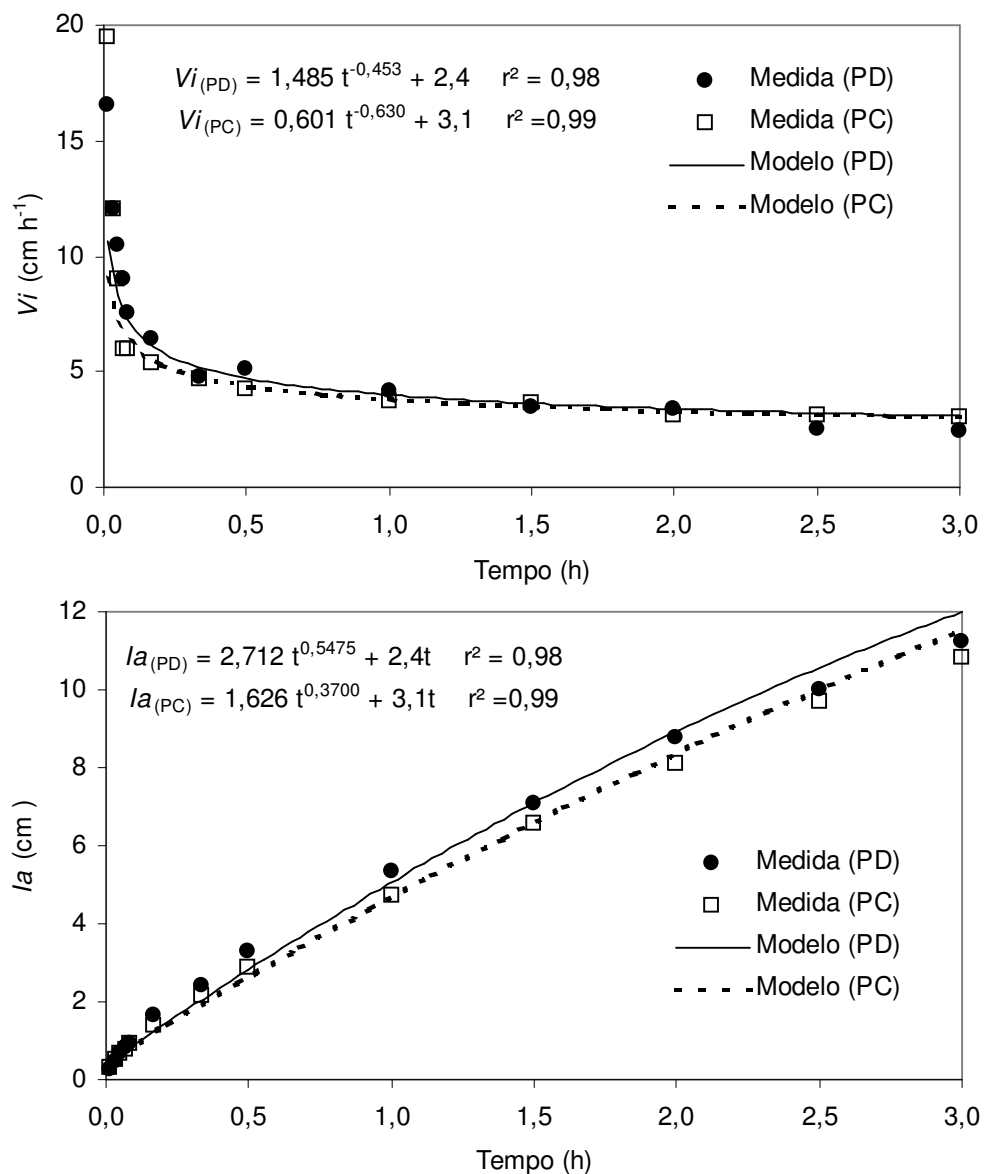


FIGURA 10. Taxa de infiltração (V_i) (a) e infiltração acumulada de água no solo (I_a) (b), em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), com os respectivos ajustes pelo modelo de Kostiakov-Lewis em função do tempo de medição (t). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

A V_i apresentou a maior diferença entre os sistemas de manejo no primeiro tempo, após o início do teste de infiltração, sendo mais elevada no solo em PC que em PD. Normalmente, isto está relacionado à menor θ_v no respectivo solo, no momento da realização dos testes. Entretanto, não foi o caso deste

trabalho, pois a θ_v média foi semelhante no solo em PD (17,8%) e naquele em PC (17,6%). Porém, quando associadas esses valores de θ_v do solo, que são baixos, com a maior macroporosidade do solo em PC (Figura 7a), em parte, se justifica a maior V_i neste sistema de manejo.

Com o passar do tempo, verificou-se que o solo em PD recuperou o atraso inicial na V_i . Um pouco antes da infiltração atingir o equilíbrio, ela foi maior no solo em PD, comparado ao PC, o que determinou uma I_a mais elevada neste sistema de manejo (Figura 10b). A recuperação da V_i no solo em PD, antes de atingir a VIB, pode estar relacionada a um impedimento físico na camada de solo subsuperficial em PC, como a presença de um “pé de arado”. No entanto, esse impedimento não foi detectado na análise física do solo, talvez, pelo caráter pontual da amostragem.

Após a saturação completa do perfil, a infiltração foi limitada pela camada de solo que teve o menor fluxo de água. Esse valor de infiltração é conhecido como a VIB e corresponde à K_o média do perfil. No solo em PD a VIB foi de $2,4\text{cm h}^{-1}$, valor menor daquele no solo em PC, que foi de $3,1\text{cm h}^{-1}$.

Juntamente com os valores medidos são apresentados valores ajustados pelo modelo de Kostiakov-Lewis e as respectivas equações de ajuste (Figuras 10a e 10b). Tanto para o solo em PD quanto para aquele em PC, o modelo escolhido descreveu, adequadamente, a V_i e a I_a , dado o elevado coeficiente de determinação (r^2) do ajuste dos parâmetros (Figuras 10a e 10b). Entretanto, quando são plotados os valores estimados pelos modelos com medições independentes (Apêndice 12), observa-se que apenas o modelo ajustado para descrever a I_a no solo em PD apresenta-se satisfatório, devido aos valores localizados próximos à linha 1:1 e, principalmente, o coeficiente angular do ajuste, não se diferenciando de 1. Para os demais modelos, observa-se um desvio na direção das medidas independentes, sugerindo efeito de algum fator sistemático. Isto pode ter sido causado pelos menores valores de θ_v no solo, no momento em que as medições independentes foram feitas, os quais foram de 14,6% no solo em PD e 16,2% em PC. Além disso, outros fatores podem ter induzido tais variações, conforme mencionado no item específico da revisão de literatura.

4.4.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

Para a condutividade hidráulica saturada (K_o) não houve interação significativa entre os sistemas de manejo e as camadas amostradas, nas duas análises de variância realizadas. A diferença entre PD e PC, em ambas análises, não foi significativa devido à grande variabilidade entre as repetições, representadas pelo coeficiente de variação que chegou a 151%. Considerando todo o perfil, houve diferença significativa entre as camadas amostradas, porém não foi detectada pela análise de variância feita para a camada 0 a 0,375m de profundidade, também devido ao coeficiente de variação elevado, que foi de 271%. A grande variabilidade entre as repetições pode ser observada também pelo desvio padrão apresentado na Figura 11.

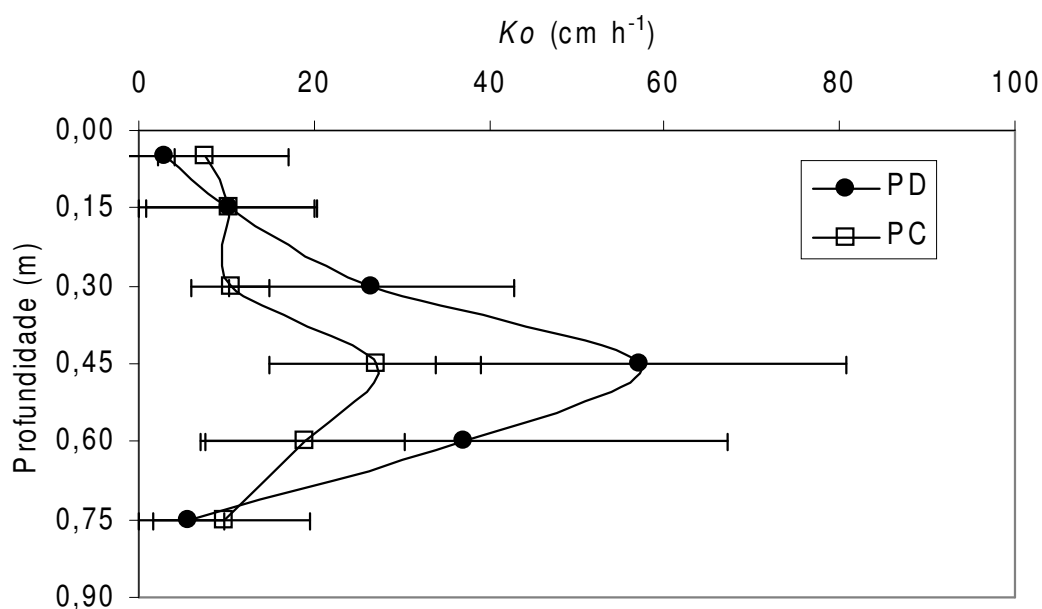


FIGURA 11. Condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades no perfil EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Embora a K_o não tenha apresentado diferenças significativas entre sistemas de manejo, a tendência de variação entre o solo em PD e PC, em cada profundidade no perfil, é importante sob o ponto de vista de avaliação do estado hídrico do solo. A análise fornece informações para avaliação da evolução do sistema PD com o tempo e da interação com outras propriedades físico-hídricas do solo, a fim de descrever a dinâmica da água em cada condição de cultivo. Com

base nisso, a seguir é feita a análise detalhada de K_o em cada profundidade do solo.

A K_o foi menor no solo em PD em relação aquele sob PC, apenas na camada mais próxima à superfície (0 a 0,1m) e na última camada amostrada no perfil (0,675m a 0,825m) (Figura 11). Na camada de 0 a 0,1m a K_o foi de 3,1cm h⁻¹ e 7,7cm h⁻¹, respectivamente, para o PD e PC. Com base nos critérios estabelecidos por Klute & Dirksen (1986) a K_o pode ser caracterizada como alta para ambos sistemas de manejo e em todas as camadas analisadas.

O maior valor de K_o foi observado na camada de 0,375m a 0,525m, em ambos sistemas de manejo de solo (Figura 11). Essa variação pode ser atribuída à mudança do gradiente textural do mesmo, em virtude da transição para o horizonte Bt encontrar-se nesta profundidade (Rojas, 1998), conforme foi discutido anteriormente.

A redução da K_o , observada próxima à superfície, e o aumento da mesma a partir da camada de 0,1m a 0,225m de profundidade no solo em PD, em relação a PC (Figura 11), está relacionada à variação da macroporosidade do solo, a qual também apresentou a mesma tendência (Figura 7a). Esta associação pode ser comprovada através do coeficiente de correlação entre as duas variáveis, que foi de 0,81 ($P < 0,2$) tanto para PD quanto para PC. A relação direta entre as variáveis também indica que a K_o no solo, em ambos sistemas de manejo, é função da macroporosidade do solo, concordando, portanto, com o embasamento físico.

O aumento da K_o , observado a partir da camada de 0,1m a 0,225m de profundidade (Figura 11), mostra que o solo sob PD apresenta drenagem mais rápida do que em PC. Isto é importante, principalmente em períodos com elevada precipitação pluvial ou irrigação, pois permite uma percolação mais rápida da água precipitada e da secagem superficial do solo, antecipando a entrada de máquinas agrícolas para operações, como a colheita. Por outro lado, o aumento da K_o pode se tornar prejudicial ao meio ambiente, principalmente em solos em que são utilizadas grandes quantidades de fertilizantes e defensivos químicos, por elevar o potencial de contaminação de aquíferos através destas substâncias. O aumento na percolação de água no solo em PD foi observado por Rojas (1998) nesta mesma área experimental com três anos de PD.

A menor K_o do perfil de solo, observada na camada mais próxima à superfície, em ambos sistemas de manejo, foi maior que a VIB no dois casos. Enquanto a VIB no solo em PD e PC atingiu $2,40\text{cm h}^{-1}$ e $3,05\text{cm h}^{-1}$, respectivamente, a K_o foi de $3,1\text{cm h}^{-1}$ e $7,7\text{cm h}^{-1}$ em PD e PC, respectivamente. Verifica-se que a tendência entre a VIB e a K_o se mantém, embora a diferença entre as variáveis tenha sido maior em PC. O aumento na diferença entre VIB e K_o no solo em PC, novamente, mostra maior heterogeneidade das variáveis hídricas do solo em relação àquele sob PD. A aparente maior homogeneidade no solo em PD seria garantida pelo não revolvimento do mesmo e pelos bioporos formados pela fauna e pelo sistema radicular que se decompõe, após o encerramento do ciclo das culturas.

4.4.3 Condutividade hidráulica do solo não saturado

No Apêndice 12 são apresentados os parâmetros para estimativa da condutividade hidráulica do solo não saturado ($K(\theta)$), segundo a equação 5 (Van Genuchten, 1980), para todas as profundidades avaliadas, nos dois sistemas de manejo. A aplicação desta equação permite gerar curvas de variação da $K(\theta)$ em função da θ_v , conforme pode ser verificado na Figura 12, para as profundidades mais afetadas pelos sistemas de manejo do solo.

As curvas de $K(\theta)$ seguiram tendência exponencial de variação, mostrando queda da $K(\theta)$ com a redução da θ_v do solo (Figura 12 e Apêndice 14). Esta forma de variação se deve ao tipo de modelo ajustado, que está de acordo com a distribuição log-normal dos valores de $K(\theta)$, normalmente observada no solo (Logsdon & Joynes, 1996).

Considerando as quatro camadas de solo mais próximas à superfície, a $K(\theta)$ foi menor no solo em PD em relação àquele sob PC, apenas na camada 0,225m a 0,375m. Em nenhuma faixa de θ_v , avaliada nesta camada, a diferença entre os sistemas de manejo do solo foi significativa (Figura 12). A $K(\theta)$ mais elevada no solo em PD, nas três camadas mais próximas à superfície, se deve à maior meso e menor microporosidade do solo observada nestas camadas, em relação ao solo em PC (Figuras 7b e 7c). Esta relação direta da $K(\theta)$ com a mesoporosidade e inversa com a microporosidade é mais evidente na camada de 0 a 0,05m, principalmente, no solo em PD.

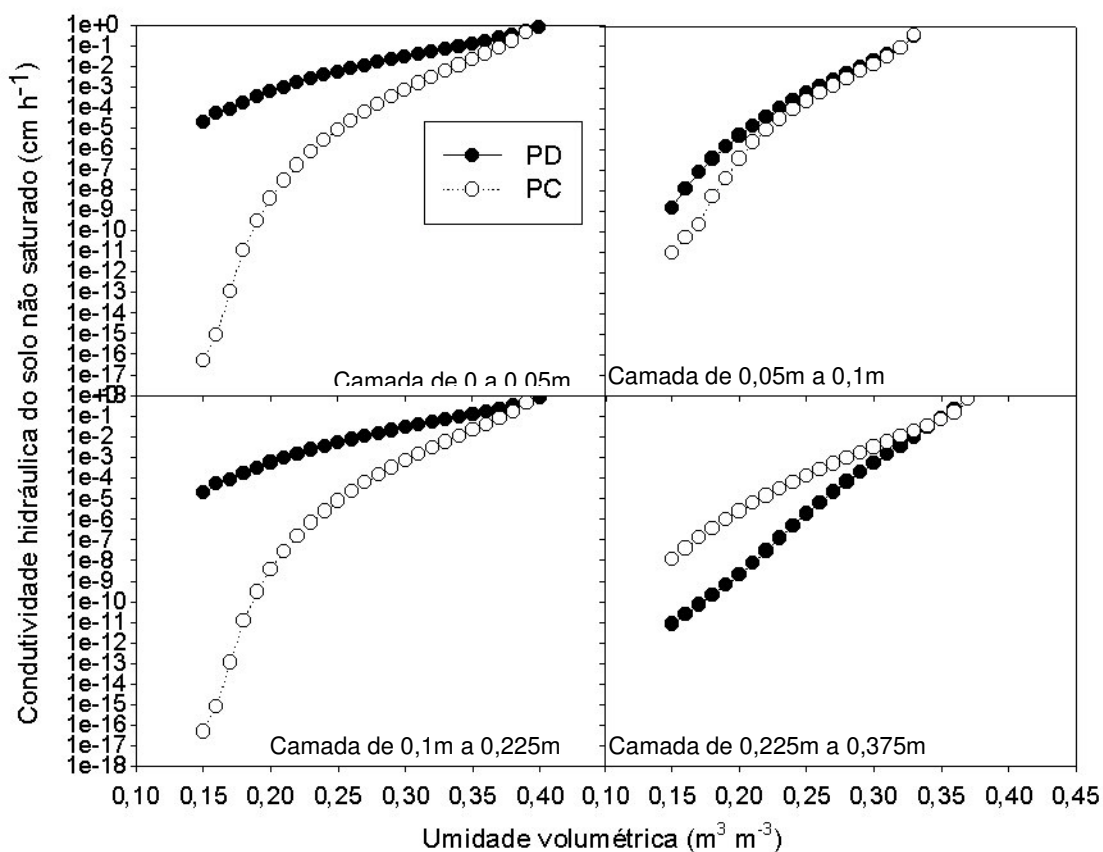


FIGURA 12. Condutividade hidráulica do solo não saturado para quatro camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), estimada em função de diferentes valores de umidade volumétrica. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Na camada de solo mais próxima à superfície, o teor mais elevado de matéria orgânica, proporcionado pelo PD (Apêndice 1), atua de forma indireta sobre a $K(\theta)$. Conforme já foi discutido, a matéria orgânica influencia positivamente e de forma mais acentuada a mesoporosidade, a qual tem relação significativa com a $K(\theta)$. Por outro lado, aliada ao aumento da porosidade de retenção de água, a própria matéria orgânica contribui para aumentar a θ_v do solo, devido à sua elevada capacidade de retenção. Essas condições favorecem a $K(\theta)$, uma vez que a mesma varia exponencialmente (Logsdon & Joynes, 1996) com a variação da θ_v do solo (Figura 12).

A $K(\theta)$ mais elevada em PC, na camada 0,225m a 0,375m de profundidade (Figura 12), também ocorreu, possivelmente, como conseqüência da mesoporosidade mais elevada neste solo, em relação àquele em PD (Figura 7b). Entretanto, a causa direta desta variação pode ser o fato de que o

revolvimento do solo, no momento do preparo, incorporou material orgânico nessa profundidade, o qual aumenta a retenção de água. Isto pode ter influenciado, significativamente, os parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten, (1980), que estimam a $K(\theta)$ nesta profundidade do solo em PC (Apêndice 13). Desta forma, a $K(\theta)$ foi mais elevada em relação PD, para um mesmo valor base de θ_v .

Abaixo da camada 0,225m a 0,375m de profundidade, as diferenças na $K(\theta)$ entre os sistemas de manejo, foram significativas em todas as camadas amostradas nas faixas de θ_v do solo de $0,23\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0,25\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,27\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo a mesma superior no solo em PD, apenas, na camada 0,375m a 0,525m de profundidade (Apêndice 14). A tendência observada nestas camadas, provavelmente, ocorreu em resposta à variabilidade natural e espacial do solo, como a presença do horizonte Bt, mencionada anteriormente.

4.5 Retenção de água no solo

4.5.1 Curvas características de retenção de água

A capacidade de retenção de água pelo solo foi avaliada com base nos valores ajustados pela equação de Van Genuchten (1980) (equação 5), cujos coeficientes de ajuste encontram-se no Apêndice 15. A representação gráfica das curvas características pode ser observada nas Figuras 13 e 14, para as camadas mais afetadas pelos sistemas de manejo (0 a 0,375m).

A comparação dos sistemas de manejo, para cada potencial de pressão aplicado nas distintas camadas amostradas se deve ao fato de que a análise da variância detectou interação significativa entre a camada amostrada, potencial de pressão aplicado e sistema de manejo do solo. A interação foi observada na análise de variância feita considerando todo o perfil de solo amostrado e também para a camada de 0 a 0,375m, que foi a mais afetada pelos sistemas de manejo. Isto indica que o PD, após oito anos de sua implantação, afetou a retenção de água no solo, em relação ao PC, em cada potencial de pressão e nas distintas camadas de solo.

A retenção de água foi mais elevada no solo em PC, em praticamente todos os potenciais de pressão aplicados e na maioria das camadas de solo analisada, condição também verificada por Rojas (1998) no terceiro ano de

implantação destes sistemas de manejo. Apenas nas camadas extremas (0 a 0,05m e 0,675m a 0,825m) a retenção de água foi maior no solo em PD (Figura 13 e Apêndice 16).

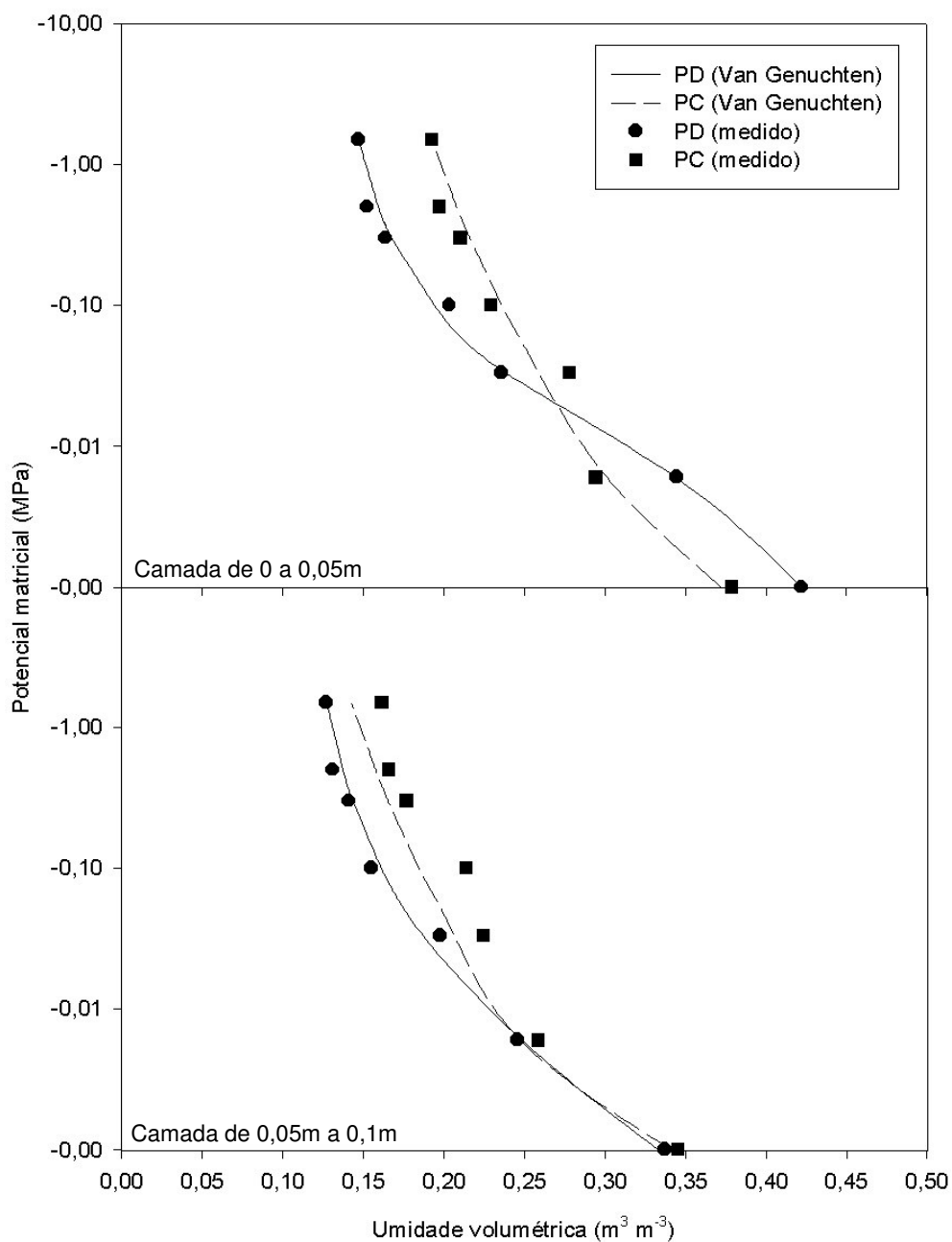


FIGURA 13. Curvas características de retenção de água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), nas camadas de 0 a 0,05m (a) e 0,05m a 0,1m (b), com valores medidos e ajustados pelo modelo de Van Genuchten. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS – 2002.

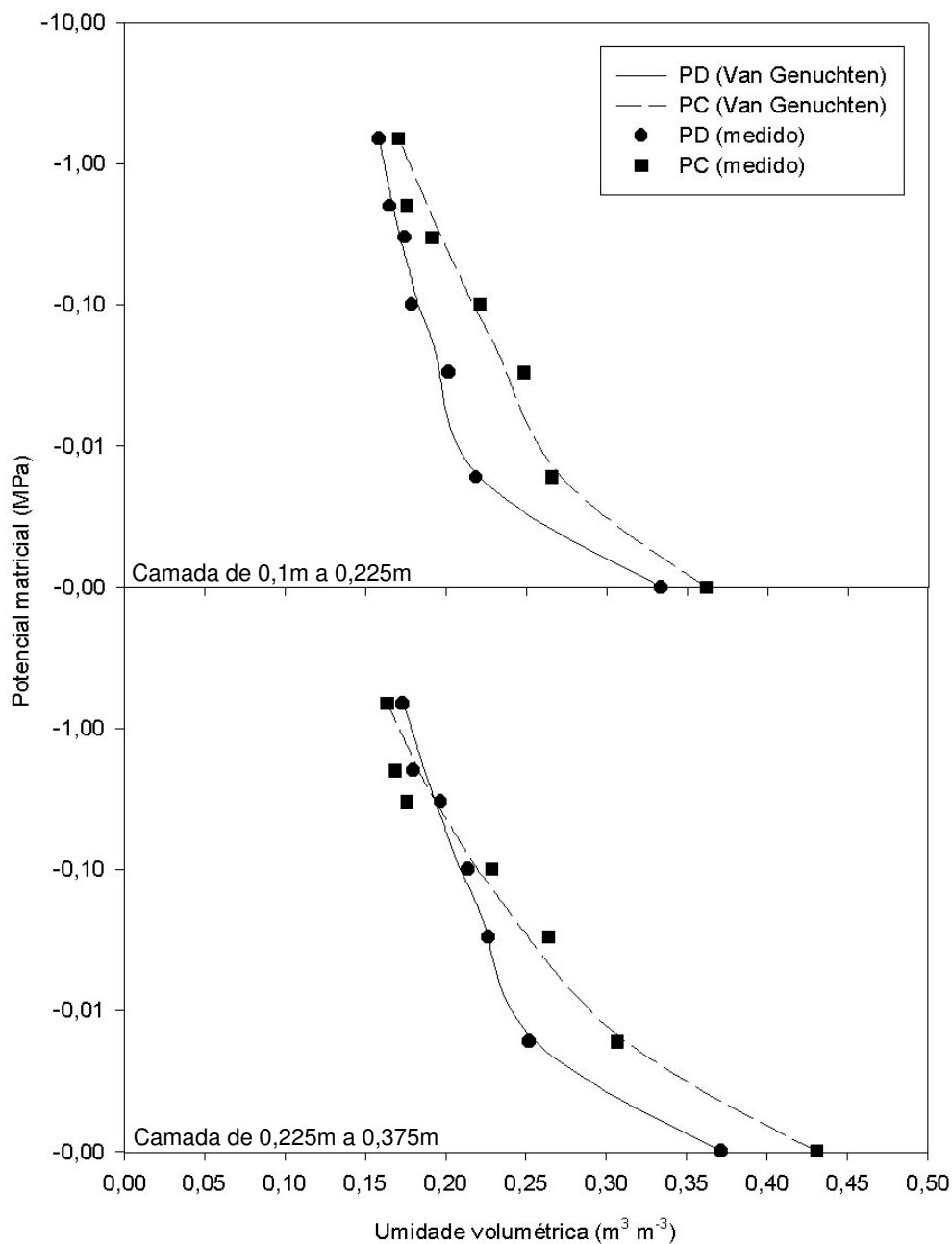


FIGURA 14. Curvas características de retenção de água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) nas camadas de 0,1m a 0,225m (a) e 0,225m a 0,375m (b), com valores medidos e ajustados pelo modelo de Van Genuchten. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS – 2002.

Na camada de 0,675m a 0,825m de profundidade (Apêndice 16), a retenção de água no solo em PD foi maior em todos os Ψ_m , embora em nenhum deles a diferença tenha sido significativa em relação ao PC. Na camada mais próxima à superfície (0 a 0,05m) (Figura 13a) o aumento na retenção de água

pelo solo em PD apenas foi observado no ponto de saturação e no Ψ_m de $-0,006\text{MPa}$ em comparação ao PC. Nos respectivos Ψ_m a diferença entre os sistemas foi de 13% e 17%, sendo que a mesma foi significativa somente no Ψ_m de $-0,006\text{MPa}$. Em ambos casos, o aumento na retenção de água pelo PD está associado às condições físicas do solo mais favoráveis, principalmente, ao aumento da mesoporosidade do solo (Figura 7b), enquanto a maior retenção de água em PC pode ser atribuída aos maiores valores de microporosidade (Sidiras et al., 1983; Zhai et al., 1990; Salton e Mielniczuk, 1995; Rojas e Van Lier, 1999). Na camada logo abaixo da superfície do solo em PD o teor de matéria orgânica mais elevado (Apêndice 4) também pode ter contribuído de forma direta para aumento da retenção de água.

Ao longo do perfil de solo a máxima diferença na retenção de água entre PD e PC foi verificada na camada 0,525m a 0,675m de profundidade, a qual foi da ordem de 29% ($-0,006\text{MPa}$). Na camada mais próxima à superfície (0 a 0,375m) a diferença mais elevada foi da ordem de 19% ($-0,1\text{MPa}$) naquela de 0,1m a 0,225m de profundidade, ambas a favor do PC. Retenção de água mais elevada no solo cultivado em PC também foi constatada por Rojas (1998) e Rojas e Van Lier (1999). Porém, não foram observadas por Hill et al. (1985) e Sidiras et al. (1983), cujas análises das curvas características mostraram maior retenção de água no solo em PD.

Avaliando as demais camadas de solo (Apêndice 16), observa-se que a variação nas curvas características de retenção de água no solo entre PD e PC permanece consistente àquelas descritas acima. As diferenças na retenção de água entre PD e PC foram significativas nos Ψ_m mais elevados, com maior frequência naqueles de $-0,006\text{MPa}$ e $-0,033\text{MPa}$ (Figuras 13 e 14 e Apêndice 16), ao contrário do que foi verificado por Rojas (1998), no terceiro ano de implantação dos sistemas de manejo, cujas diferenças foram significativas, com maior frequência nos Ψ_m mais baixos. Em termos de retenção de água, esta resposta mostra que PD se diferencia do PC, em períodos de alta disponibilidade hídrica, ou seja, quando as precipitações são frequentes ou quando os sistemas são irrigados, conforme observado por Centurion & Demattê (1985). Isto é verdadeiro se considerarmos que o solo em PD apresenta maior espaço de armazenagem de água do que em PC (Lampurlanés et al., 2001). No entanto, tais

evidências também podem contribuir para ampliar as diferenças durante a secagem do solo, conforme verificado por Bragagnolo & Mielniczuk (1990a) e Sauer et al. (1996).

Embora esses resultados sejam justificados, devem ser considerados com cautela, devido à metodologia de amostragem adotada. A coleta de amostras pontuais não permite identificar a situação real existente no campo, principalmente, relacionada à constituição da geometria porosa do solo. A continuidade e a interligação entre os poros não são identificadas, devido ao rompimento dos mesmos. Com isso, zonas com teor mais elevado de θ_v , formadas pela incorporação de matéria orgânica das raízes e atividade da fauna do solo, dificilmente são detectadas nos pequenos volumes de solo amostrado, o que prejudica a avaliação em PD. Por isso, a situação “in loco”, pode ser bem diferente daquela projetada pelas análises de laboratório, principalmente em PD, em que essas características são mais evidentes. Assim, no campo, a θ_v no sistema de PD tende a ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento das plantas do que em PC, conforme evidenciam vários trabalhos na literatura (Sidiras et al., 1983; Norwood, 1994; Salton & Mielniczuk, 1995; Silva et al., 2001b).

O modelo de Van Genuchten apresentou elevado ajuste aos dados medidos em todas as profundidades e nos dois sistemas de manejo, conforme demonstra o coeficiente de determinação (Apêndice 15). Isto indica adequabilidade do modelo na descrição da retenção de água em PD, mesmo com as alterações provocadas na geometria porosa do solo (Sheptukhov et al., 1997) e concentração de matéria orgânica na superfície do mesmo (Carpenedo e Mielniczuk, 1990). A adequação do modelo ocorre porque o princípio da retenção de água se mantém, variando apenas na intensidade e na relação de forças de retenção (capilaridade e adsorção). Além disso, o ajuste dos coeficientes do modelo de Van Genuchten é obtido por um conjunto indefinido de interações até a obtenção do quadrado médio do erro mínimo.

4.5.2 Capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).

Os valores de θ_v do solo na CC, determinados após 72 horas da inundação, e os valores CC e PMP, obtidos em laboratório, são apresentados na

Tabela 3. Os limites obtidos em laboratório podem ser estimados pela aplicação das curvas características de retenção de água no solo (Apêndice 15). Porém, devido ao método de extrapolação adotado no ajuste dos coeficientes, a θ_v , em cada limite (CC ou PMP), poderá não corresponder aos valores medidos em laboratório.

TABELA 3. Umidade do solo na capacidade de campo (CC), medida a campo com respectivo potencial matricial e umidade na CC e ponto de murcha permanente (PMP), obtidos em laboratório, em diferentes camadas no solo em plantio direto e preparo convencional. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Camadas de Solo (m)	Laboratório		Campo	Potencial Matricial (MPa) ¹
	CC (m ³ m ⁻³)	PMP (m ³ m ⁻³)	CC (m ³ m ⁻³)	
.....Plantio direto.....				
0 – 0,05	0,345*	0,147	-	-
0,05 – 0,1	0,246	0,127	0,273 ²	-0,008 ²
0,1 – 0,225	0,219*	0,159	0,234	-0,003
0,225 – 0,375	0,252*	0,174	0,272	-0,003
0,375 – 0,525	0,287	0,149	0,225	-0,012
0,525 – 0,675	0,265*	0,187	0,254	-0,013
0,675 – 0,825	0,341	0,271	0,315	-0,018
.....Preparo convencional.....				
0 – 0,05	0,295*	0,193	-	-
0,05 – 0,1	0,259	0,162	0,284 ²	-0,004 ²
0,1 – 0,225	0,266*	0,171	0,287	-0,003
0,225 – 0,375	0,307*	0,164	0,288	-0,011
0,375 – 0,525	0,328	0,162	0,256	-0,019
0,525 – 0,675	0,387*	0,203	0,266	-0,038
0,675 – 0,825	0,328	0,267	0,321	-0,008

¹ Potencial matricial correspondente à umidade na capacidade de campo medida a campo; ² Valores referentes à profundidade média de 0,05 m (camada 0 - 0,1 m); * Diferenças significativas pelo teste de Tukey (P<0,5) entre PD e PC numa mesma profundidade de solo; (CC = -0,006MPa, PMP = -1,5MPa).

A análise de variância realizada, considerando todo o perfil de solo, detectou interação significativa entre sistemas de manejo e profundidade de amostragem para as medidas da θ_v na CC e PMP obtidas em laboratório. Quando a análise foi aplicada para o mesmo conjunto de dados, porém, considerando somente os valores referentes às camadas de solo até 0,375m de profundidade, a

interação foi significativa apenas para a CC. Para as medidas de CC obtidas na parcela experimental, em nenhuma das análises de variância a interação foi significativa, mostrando que as influências do PD ocorrem de forma semelhante ao PC, quando essa variável foi determinada a campo. Neste caso, foi verificada diferença significativa somente entre as camadas de solo avaliadas considerando todo o perfil. Na camada de 0,675m a 0,825m, foi verificado o valor mais elevado de CC, medida a campo, o qual foi o único que se diferenciou, significativamente, dos demais (Tabela 3).

A θ_v na CC foi menor no solo em PD em relação àquele em PC, tanto na avaliação feita em laboratório, quanto naquela feita a campo. Esta tendência também foi verificada por Rojas (1998) no terceiro ano de implantação dos sistemas de manejo, na mesma área utilizada para este trabalho. A diferença foi observada em quase todas as camadas de solo amostradas, variando de, aproximadamente, 2% até 31% (Tabela 3). Apenas na camada mais próxima à superfície (0 a 0,05m) e naquela mais profunda no perfil (0,675m a 0,825m), a θ_v na CC, medida em laboratório, apresentou tendência contrária, ou seja, foi maior no solo em PD.

Na camada de 0,652m a 0,825m de profundidade o valor mais elevado de θ_v na CC, para o solo em PD, parece estar associado à variabilidade espacial do solo, já que o efeito de sistema praticamente não é percebido nesta profundidade. A diferença em relação ao PC foi pequena, próxima a 4% (Tabela 3).

Na camada mais próxima à superfície, cuja diferença foi maior (17%), a elevação da θ_v na CC no solo em PD se deve à maior mesoporosidade apresentada pelo mesmo neste sistema de manejo (Figura 7b), bem como ao teor mais elevado de matéria orgânica presente na mesma, que atua, tanto no aumento da retenção de água, quanto na melhoria das condições físicas do solo, principalmente, na sua estrutura (Carpenedo & Mielniczuk, 1990). Já a superioridade do PC, como regra geral nas demais camadas, pode ser explicada pelo fato dos poros em PD apresentarem maior continuidade e ligação entre os mesmos, facilitando a drenagem do solo, enquanto em PC predominam poros tortuosos, menos contínuos e localizados de forma mais horizontal no perfil (Schaefer et al., 2001), o que dificulta a percolação da água e mantém o solo mais

úmido, além da maior mesoporosidade em PC. Os poros em PD apresentam maior interligação vertical do que em PC, formando uma rede bem mais distribuída, facilitando a percolação da água, enquanto que em PC os poros são mais paralelos à superfície do solo (Schaefer et al., 2001).

Analisando os resultados quanto às duas formas de medida da θ_v na CC (Tabela 3), observa-se que os valores medidos em laboratório são maiores daqueles medidos na parcela experimental, em todas as camadas de solo abaixo de 0,375m de profundidade. A diferença entre as duas formas de determinação da CC foi significativa somente nas camadas 0,375m a 0,525m e 0,525m a 0,675m de profundidade no PC. Na camada em que a influência do sistema de manejo, teoricamente, é maior (0 a 0,375m), assim como na maioria das camadas avaliadas dentro da mesma, a θ_v na CC medida na parcela experimental também foi mais elevada em relação àquela obtida no laboratório nos dois sistemas de manejo de solo. A discrepância entre valores de CC obtidos em laboratório com aqueles de campo é um dos argumentos manifestados pelos críticos à utilização deste parâmetro na caracterização do limite superior de disponibilidade de água no solo às plantas (Ritchie, 1981; Ratcliff et al., 1983; Reid et al., 1984).

A superioridade das medições de laboratório, em relação às aquelas de CC obtidas no campo, nas camadas de solo mais profundas, pode ter ocorrido em consequência da saturação incompleta do perfil, em função do limite do horizonte Bt estar localizado, aproximadamente, entre 0,3m e 0,45m de profundidade. A presença deste horizonte faz com que a água, ao atingir sua superfície, se desloque horizontalmente dentro do solo. Isto pode ter dificultado a infiltração da mesma para as camadas mais abaixo, apesar de ter sido respeitado o tempo de 72 horas entre a saturação do solo e a coleta das amostras. Por outro lado, as medidas de laboratório foram feitas em amostras com pequeno volume de solo, o qual satura mais facilmente, contribuindo para aumentar a θ_v na CC e as diferenças em relação às medidas na parcela experimental. No entanto, outras causas também podem ter contribuído para a variação observada, como volume insuficiente de água para saturar completamente o solo, o baixo número de repetições e o pequeno volume de solo coletado, além da menor K_0 e $K(\theta)$ das camadas entre 0 a 0,375m (Figuras 11 e 12), que favoreceram CC mais elevada na parcela experimental em relação às medidas de laboratório.

Em PC a relação entre as duas formas de medição não foi significativa. O coeficiente de correlação foi baixo ($r = -0,1$) e apresentou tendência inversa entre ambas variáveis. Em PD a relação foi direta e significativa, com coeficiente de correlação bem mais elevado do que em PC, ficando na ordem de 0,55. A correspondência entre os valores de θ_v na CC, entre as formas de medida, evidencia tendência de maior homogeneidade de parâmetros hídricos no solo em PD, em comparação a PC, conforme mencionado anteriormente.

Apesar das diferenças entre os métodos de medição, mesmo que não significativas, o Ψ_m correspondente à θ_v na CC, na camada 0 a 0,375m de profundidade, ficou próximo do limite teórico utilizado em laboratório que foi de $-0,006\text{MPa}$. Nesta camada, o mesmo variou de $-0,003\text{MPa}$ a $-0,011\text{MPa}$, considerando os dois sistemas de manejo, com média de $-0,005\text{MPa}$ em PD e $-0,006\text{MPa}$ em PC. Assim, estes resultados estão de acordo com o limite teórico adotado para a CC na avaliação da mesma em laboratório ($-0,006\text{MPa}$), tanto para o solo em PD, quanto para aquele em PC. O Ψ_m de $-0,006\text{MPa}$, também foi utilizado por Tormena et al. (1998b) e Rojas & Van Lier (1999), como limite para a CC, e é sugerido como tal por Reichardt (1988). Porém, este autor lembra que a CC é o resultado de um comportamento dinâmico da água no perfil do solo, e não uma característica intrínseca da sua matriz.

A θ_v no PMP foi maior em PD, em relação ao PC, apenas nas camadas de 0,225m a 0,375m e 0,675m a 0,825m de profundidade (Tabela 3). A diferença em relação ao PC foi significativa somente na camada de solo mais profunda (0,675m a 0,825m), a qual foi de 1,4%. Na camada mais afetada pelos sistemas de manejo (0 a 0,375m) o PMP foi, em média, 12% menor em PD em relação a PC, sendo que a diferença, dentro de cada camada de solo, foi mais elevada próximo à superfície (23,8%). Esta variação pode ser explicada pela distribuição dos poros de retenção de água, em que, no PD, a maior quantidade se concentrou próximo ao limite superior da faixa de água disponível, enquanto que, no PC, ela seguiu uma curva de distribuição normal, com concentração na subclasse de diâmetro médio (Figuras 8 e 9). No terceiro ano após a implantação dos respectivos sistemas de manejo, Rojas (1998) observou maior θ_v no PMP em todas as profundidades até 0,71m, em relação ao PC.

Os menores valores de θ_v no PMP no solo em PD compensa, em parte, os valores mais reduzidos na CC, que foram de 5,6%, em média. Isto demonstra que o ganho em termos de retenção de água disponível no PD ocorre por conta do deslocamento do valor de θ_v no PMP, mais do que a contribuição pelo aumento da θ_v na CC, pelo menos, quando considerada a camada de solo de 0 a 0,375m de profundidade.

4.6 Água disponível às plantas

4.6.1 Total de água disponível no perfil de solo

A disponibilidade de água às plantas, normalmente, é estimada a partir da diferença entre a θ_v na CC e no PMP. Apesar das críticas de alguns estudos (Ritchie, 1981; Ratcliff et al., 1983; Reid et al., 1984) esses limites são úteis sob o ponto de vista prático (Reichardt, 1988), principalmente, para estudos agroclimáticos (Bergamaschi et al., 1992). Neste trabalho, o limite superior (CC) e inferior (PMP) da água disponível, correspondem àqueles adotados para determinação da mesoporosidade do solo, apresentada na Figura 7b. Portanto, as variações entre sistemas, observadas na análise da variável mesoporosidade, correspondem à θ_v na faixa de água disponível.

Considerando-se essa igualdade, verificou-se que o solo em PD apresentou maior conteúdo de água disponível do que em PC nas duas camadas mais próximas à superfície (0 a 0,05m e 0,05m a 0,1m), com aumento mais significativo na camada 0 a 0,05m de profundidade. A partir da camada 0,1m a 0,225m de profundidade, o conteúdo de água disponível foi maior no solo em PC, em todas as camadas analisadas. O aumento da θ_v no solo em PD, entre os limites de CC e PMP, foi constatado por vários estudos (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990a; Fortin, 1993; Sauer et al., 1996), inclusive pelo trabalho realizado por Rojas & Van Lier (1999), na mesma área de realização do presente trabalho, no terceiro ano de implantação dos sistemas de manejo.

O aumento na retenção de água em PD tem como causa principal o teor mais elevado de matéria orgânica, a qual exerce influência na estruturação do solo (Carpenedo & Mielniczuk, 1990) e formação da mesoporosidade, também atuando diretamente no aumento da retenção de água no solo. No caso do PC, a maior θ_v observada principalmente na camada de solo 0,1m a 0,225m, também

pode estar associada à influência da matéria orgânica que é incorporada no revolvimento do mesmo. Em todas as situações o aumento na retenção de água está estritamente associado ao aumento da mesoporosidade (Figura 7b).

Embora a representação da disponibilidade de água, em termos de θ_v ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), seja muito utilizada, há dificuldade de entendimento de forma prática, pela necessidade de associá-la à espessura de uma determinada camada de solo. Por isso, a apresentação da água disponível em termos de lâmina de água (mm) estabelece uma ordem de grandeza mais adequada, no sentido de comparar diferenças entre sistemas de manejo. Além disso, possibilita avaliar a contribuição das diferentes camadas de solo, para fins de comparação posterior com variáveis agrometeorológicas, como a evapotranspiração e/ou transpiração e a evaporação da água na superfície do mesmo.

Os resultados organizados desta forma são apresentados na Figura 15, enquanto que os valores relativos entre sistemas, dentro de cada camada de solo, são mostrados na Figura 16. Para a elaboração dos valores relativos, considerou-se o PC como padrão e, por isso, ele correspondeu ao valor 100% de água disponível em todas as camadas.

Analisando a Figura 15, verifica-se que o PD foi mais eficiente quanto à disponibilidade de água às plantas, nas camadas mais próximas à superfície. Na primeira camada, a água disponível em PD foi de 10 mm, aproximadamente, enquanto no PC ela não atingiu 5,5mm, nas mesmas condições. Isto correspondeu a uma diferença de mais de 80% a favor do PD, conforme pode ser observado na Figura 16. Por conta disso, nesta camada, o PD apresentou a maior retenção de água por centímetro de profundidade de solo, que foi de 1,97mm, enquanto em PC o valor máximo foi de 1,81mm, na camada 0,525m a 0,675m de profundidade (Figura 17).

Na camada de solo de 0,05m a 0,1m a disponibilidade de água também foi maior em PD (Figura 15), mas a diferença em relação ao PC diminuiu para cerca de 20% (Figura 16), correspondendo à cerca de 6mm e 5mm de água disponível, respectivamente. A mesma tendência seguiu a retenção de água por centímetro de profundidade de solo, que ficou em 1,21mm e 1mm em PD e PC, respectivamente (Figura 17).

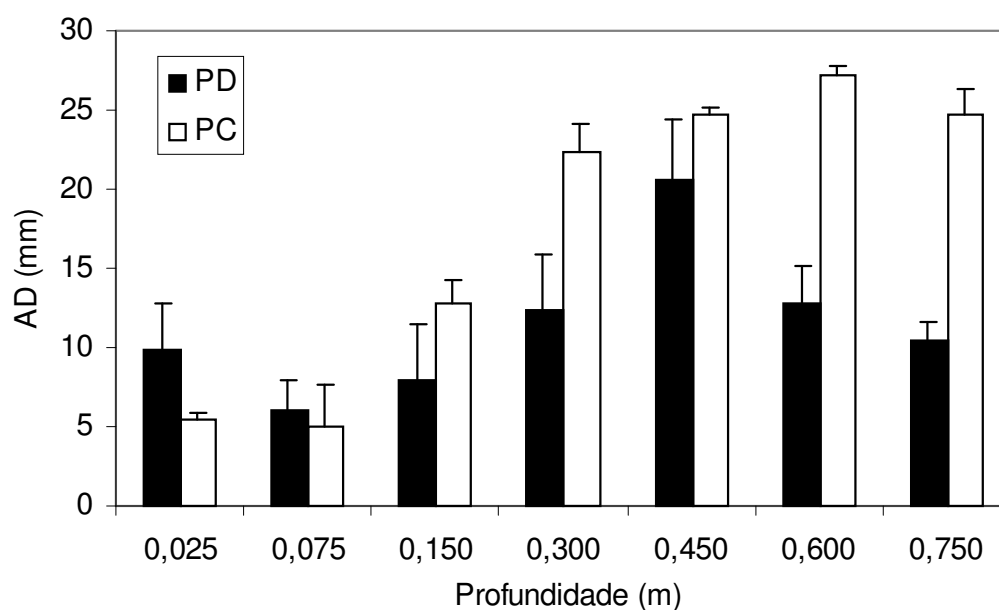


FIGURA 15. Água disponível (AD) entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente obtidos em laboratório, em diferentes camadas no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

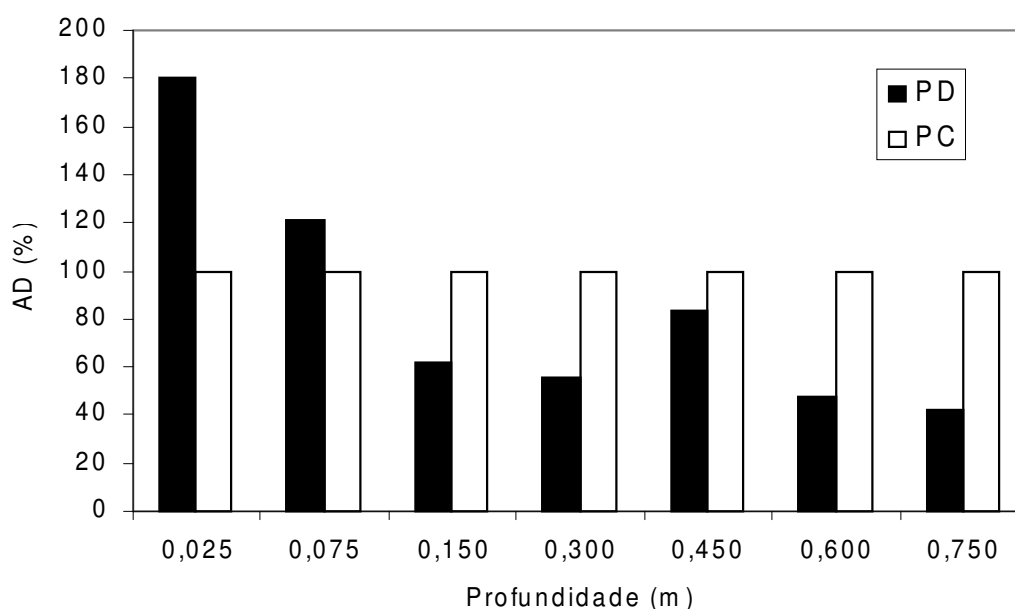


FIGURA 16. Disponibilidade relativa de água (AD) a partir dos limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, obtidos em laboratório, em diferentes camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

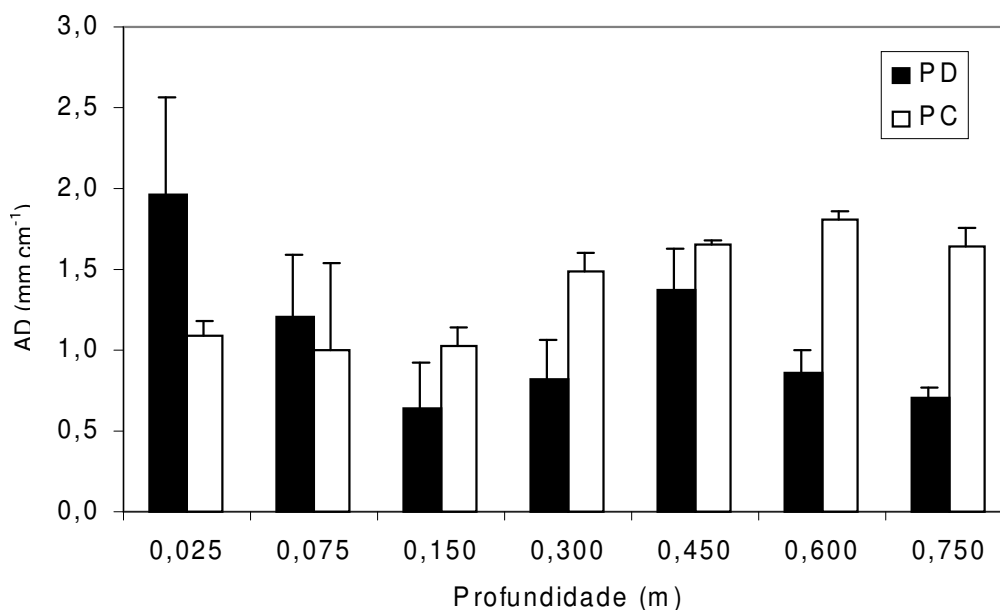


FIGURA 17. Água disponível (AD) por centímetro de profundidade de solo, em diferentes camadas no perfil, em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pelas profundidades média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

A maior eficiência do PD em proporcionar uma disponibilidade de água mais elevada às plantas, em relação ao PC, na camada de solo de 0 a 0,05m de profundidade ocorreu por causa do aumento da θ_v na CC, mais do que a redução da θ_v no PMP (Tabela 3). Isso está de acordo com a tendência das curvas características de retenção de água entre ambos sistemas de manejo, para a respectiva camada de solo. Por outro lado, na camada de 0,05m a 0,1m a tendência verificada nas curvas de retenção não se confirmou em disponibilidade de água. Nesta camada, mesmo o PD apresentando uma menor retenção de água ao longo de todos os potenciais de pressão aplicados, a disponibilidade de água foi maior do que em PC, concordando com as evidências de Van Ouwerkerk & Boone (1970) e Tollner et al. (1984) de que uma maior retenção de água não garante maior disponibilidade da mesma às plantas.

O aumento da água disponível no solo em PD, na camada de 0,05m a 0,1 m de profundidade, ocorreu devido à redução concomitante, da θ_v na CC e no PMP (Tabela 3). Entretanto, o aumento da disponibilidade de água no solo é explicado pela melhoria das propriedades físicas, como redução da densidade (Figura 5) e aumento da porosidade de retenção (Figura 7b), que, por sua vez,

são influenciadas pela matéria orgânica mais elevada, próximo à superfície (Centurion & Demattê, 1985; Salton & Mielniczuk, 1995, Lampurlanés et al., 2001).

A partir da camada 0,1m a 0,225m de profundidade, o solo em PD apresentou menor disponibilidade de água do que aquele em PC, em todas as camadas amostradas (Figuras 15 e 16). A diferença máxima ocorreu na camada de 0,525m a 0,675m de profundidade, e foi de 14,3mm. Em PD a máxima disponibilidade de água foi observada na camada 0,375m a 0,525m de profundidade, correspondendo a, aproximadamente, 75% daquela apresentada pelo PC (Figura 16). O aumento na disponibilidade de água nas camadas 0,1m a 0,225m e 0,225m a 0,375m de profundidade no solo em PC, pode ser atribuído à matéria orgânica incorporada no momento da aração, melhorando as condições físicas de armazenagem da mesma em relação ao PD (Figura 7b).

Nos dois sistemas de manejo houve aumento da água disponível das primeiras camadas em direção às aquelas mais profundas no perfil. A água disponível foi maior no solo em PC e ocorreu devido à elevação da θ_v na CC, como conseqüência dos teores de argila mais elevados, observados nas maiores profundidades (Apêndice1). A argila aumenta a retenção de água devido à maior superfície específica e a maior quantidade de cargas presentes na sua superfície. Também, proporciona maior agregação do solo, devido à sua ação cimentante, o que favorece a porosidade, especialmente a mesoporosidade do solo e, por conseqüência, a capacidade de retenção e disponibilidade de água. Assim, as diferenças entre os sistemas de manejo, nas profundidades de solo mais elevadas no perfil, decorrem muito mais da variabilidade natural do mesmo do que do efeito dos sistemas de manejo, conforme já discutido anteriormente, além da variação aleatória associada aos procedimentos metodológicos.

Na Figura 16 observa-se que houve tendência de redução exponencial da água disponível no solo em PD, em relação àquele em PC. A partir da camada de solo de 0,1m a 0,225m de profundidade, a diferença se estabilizou em torno de 45%, o que significa que a contribuição dessas camadas de solo para o total de água disponível a uma cultura é de, aproximadamente, 45% daquela verificada em PC. A redução exponencial na disponibilidade de água com a profundidade do solo, obviamente, seguiu a distribuição média da mesoporosidade do solo, observada nas Figuras 8 e 9.

As diferenças de disponibilidade de água entre o solo em PC e aquele em PD podem ser observadas, de forma mais detalhada, na Figura 18, considerando todo o perfil (0 a 0,825m) e apenas a camada mais afetada pelos sistemas de manejo (0 a 0,375m).

Apesar dos baixos coeficientes de determinação, devido aos modelos terem sido ajustados com todas as repetições, os mesmos foram significativos ($P < 0,05$) quando as variáveis foram linearizadas, o que significa validade na sua aplicação prática, uma vez que a determinação dos parâmetros atendeu todos os pressupostos envolvidos na análise de regressão. As equações apresentadas na Figura 18 integram os efeitos dos fatores que determinaram as diferenças entre os sistemas de manejo, razão pela qual podem ser utilizadas para estimar diferenças de disponibilidade de água entre o solo em PD e PC ou ajustar funções já conhecidas e elaboradas para o PC.

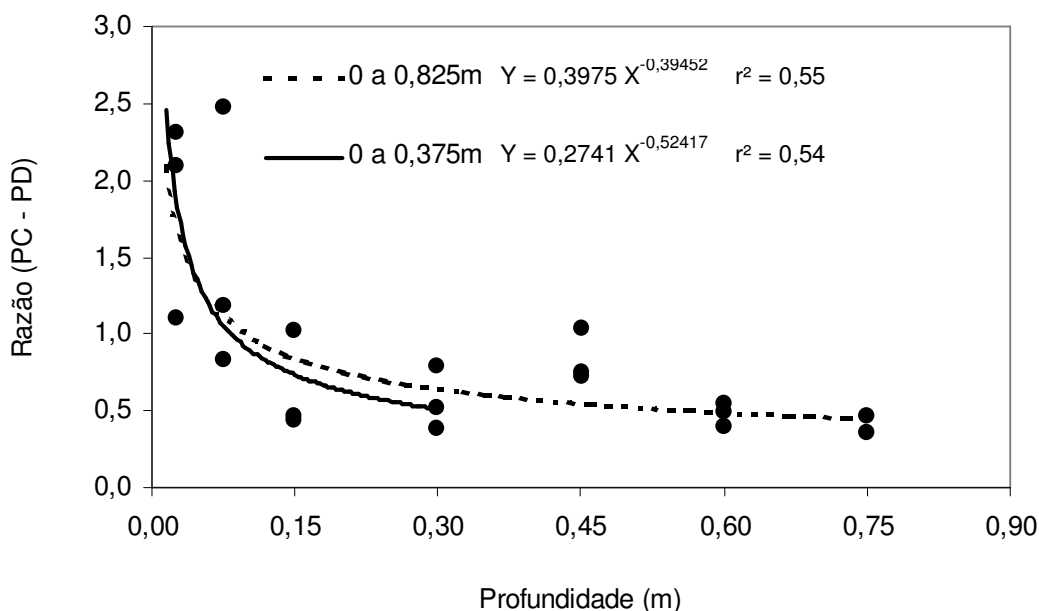


FIGURA 18. Diferença na disponibilidade de água entre o solo em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) para todo o perfil (0 a 0,825m) e para a camada mais afetada pelos sistemas de manejo (0 a 0,375m), utilizando a CC e o PMP obtidos em laboratório. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

A aplicação das equações (Figura 18) permite identificar exatamente a profundidade em que o solo em PC passou a apresentar maior disponibilidade de água do que em PD. Para o caso específico, verificou-se que o PD apenas reteve

mais água disponível do que em PC até a profundidade de 0,09m, muito próximo do limite inferior da segunda camada de solo que foi 0,1m.

Considerando apenas a camada mais afetada pelos sistemas de manejo do solo (0 a 0,375m) e somando a contribuição de cada camada dentro desta, observa-se que em PC apresenta, aproximadamente, 20% mais água disponível do que o PD, até a profundidade de 0,375m (Figura 19). Esta superioridade do PC foi ocasionada, principalmente, pela contribuição da camada de solo de 0,225m a 0,375m de profundidade (Figura 15), a qual é influenciada pela matéria orgânica incorporada no preparo do solo. A influência desta camada de solo em PC ficou evidente quando foi contabilizada a água disponível nas três primeiras camadas de solo em ambos sistemas de manejo. O somatório da água disponível nessas três camadas mostra que o PD apresentou cerca de 2,5% mais água disponível do que o PC (Figura 19). A superioridade do PD, neste caso, é garantida pelas duas camadas de solo mais próximas à superfície (Figura 19) que, proporcionaram cerca de 16mm de água disponível, enquanto no solo em PC foi de, aproximadamente, 10mm. As duas camadas iniciais são as mais influenciadas pela matéria orgânica adicionada à superfície em PD.

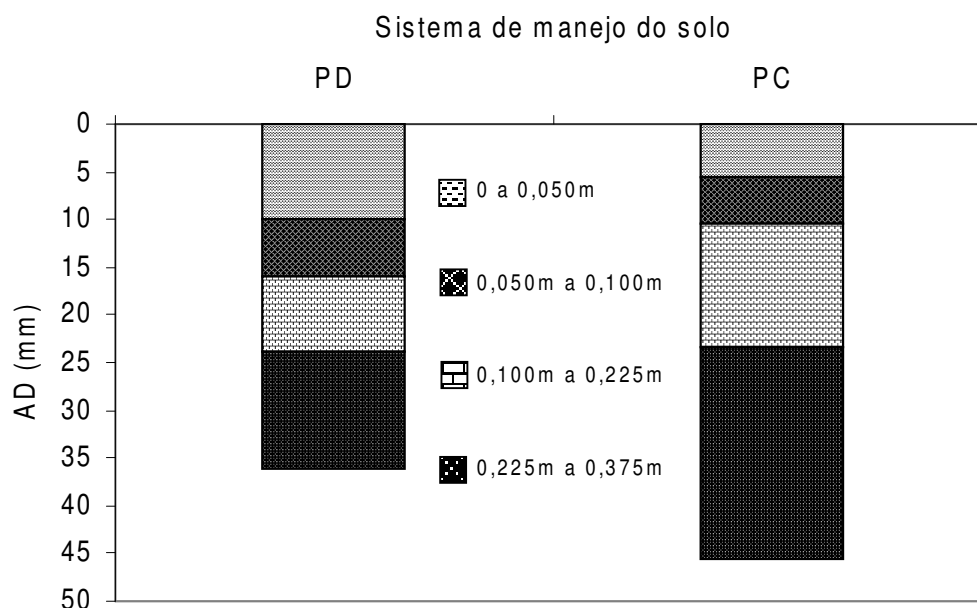


FIGURA 19. Água disponível (AD) no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), nas quatro camadas próximas à superfície, calculada a partir da CC e PMP obtidos em laboratório. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Com base no total de água disponível, apresentado na camada de 0 a 0,375m de profundidade, o PD apresentou em média, uma disponibilidade de 0,97mm de água por centímetro de profundidade de solo, enquanto que o PC reteve em torno de 1,28mm centímetro de profundidade de solo (Figura 17).

4.6.1 Estado potencial da água no solo disponível às plantas

A quantidade máxima de água que o solo consegue disponibilizar às plantas é um importante parâmetro no estudo das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera. Contudo, é necessário conhecer a energia com que essa água se encontra retida no mesmo para avaliar com que facilidade as plantas conseguem extraí-la. A relação entre a disponibilidade de água e a energia de retenção é apresentada nas Figuras 20 e 21, para Ψ_m até $-0,08\text{MPa}$ e $-0,1\text{MPa}$, respectivamente. Nas mesmas Figuras verifica-se, além do total de água disponível, a disponibilidade relativa, em relação à máxima, observada em cada camada de solo e apresentada na Figura 15.

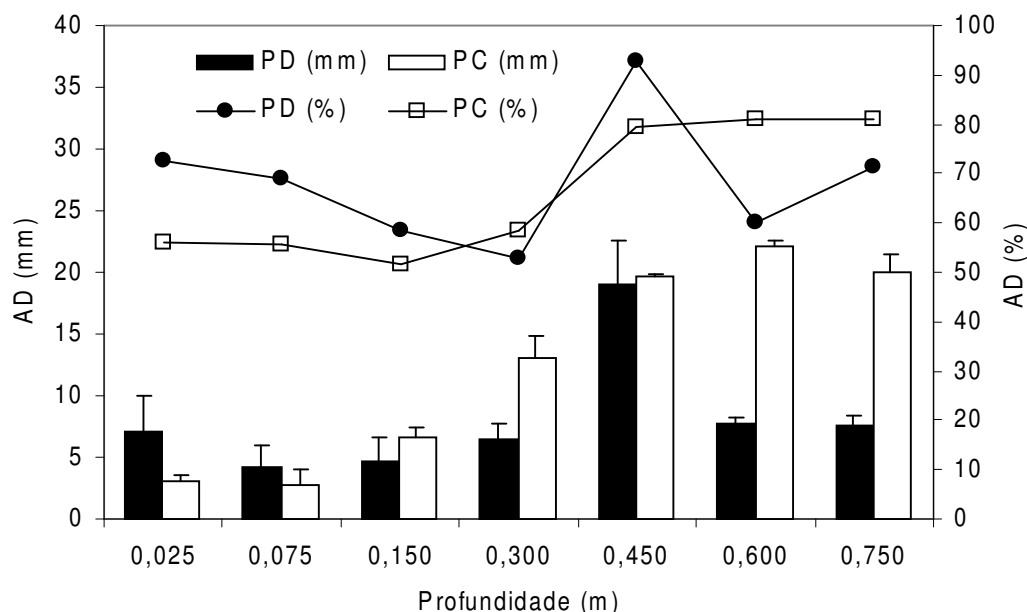


FIGURA 20. Água disponível (AD) no solo até o potencial matricial de $-0,08\text{MPa}$ (mm) e valor relativo da mesma à capacidade máxima (%), para diferentes camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Na Figura 20, verifica-se que, nas três primeiras camadas do solo em PD, cerca de 70% do total de água disponível às plantas, encontram-se armazenados até o limite teórico máximo de funcionamento dos tensiômetros, que é de $-0,08\text{MPa}$. Em PC o volume armazenado atingiu pouco mais de 50%, nas mesmas condições.

Para a camada mais afetada pelo sistema de manejo (0 a $0,375\text{m}$), o solo em PD também apresentou maior retenção de água que o PC até o limite de $-0,08\text{MPa}$, considerando o valor acumulado. Entretanto, a diferença entre sistemas diminuiu em relação as três primeiras camadas, uma vez que o volume de água armazenado foi 62% no PD e de 56% no solo em PC.

Contabilizando-se a quantidade de água disponível até $-0,08\text{MPa}$, na camada de solo de 0 a $0,525\text{m}$ de profundidade, volume de solo em que se encontra localizada a maior parte do sistema radicular do milho (Bassoi et al., 1994), o solo em PD ainda apresentou maior armazenagem de água do que o PC, até esse limite, ficando em torno de 73% e 64%, respectivamente. A tendência de queda das diferenças entre sistemas, em profundidade, é selada à medida que se considera todo o perfil, pois, nesta condição, ambos sistemas de manejo mostraram em torno de 70% de água armazenada até o Ψ_m de $-0,08\text{MPa}$ em relação à quantidade máxima.

A mesma tendência foi verificada para a água armazenada entre a CC e o Ψ_m de $-0,1\text{MPa}$ (Figura 21). O aumento na armazenagem de água foi, em média, de apenas 3,6 pontos percentuais em relação ao Ψ_m de $-0,08\text{MPa}$, o que corresponde, na média do perfil, a um incremento de apenas $0,5\text{mm}$. (Figura 21). Tal diferença é explicada pela distribuição do tamanho de poros dentro da classe dos mesoporos, em que, no PD, a mesma tem a forma logarítmica, concentrando a maior quantidade na subclasse de maior diâmetro ($50\mu\text{m} - 8,9\mu\text{m}$), enquanto no PC a distribuição tem a forma normal, concentrando a maior quantidade na subclasse de diâmetro médio ($2,9\mu\text{m} - 1,0\mu\text{m}$) (Figuras 8 e 9).

Em síntese, a análise apresentada acima mostra que, embora o solo em PD tenha apresentado menor quantidade total de água disponível ao longo do perfil, esta se encontrava retida com menor energia, neste sistema de manejo. Isso significa que as plantas cultivadas em PD, absorvem água do solo com maior facilidade em relação àquelas em PC, principalmente numa condição de alta

demanda evaporativa da atmosfera. A maior facilidade em absorver água proporciona um estado hídrico mais favorável às plantas em PD, conforme foi observado por Bianchi (2004) no mesmo experimento.

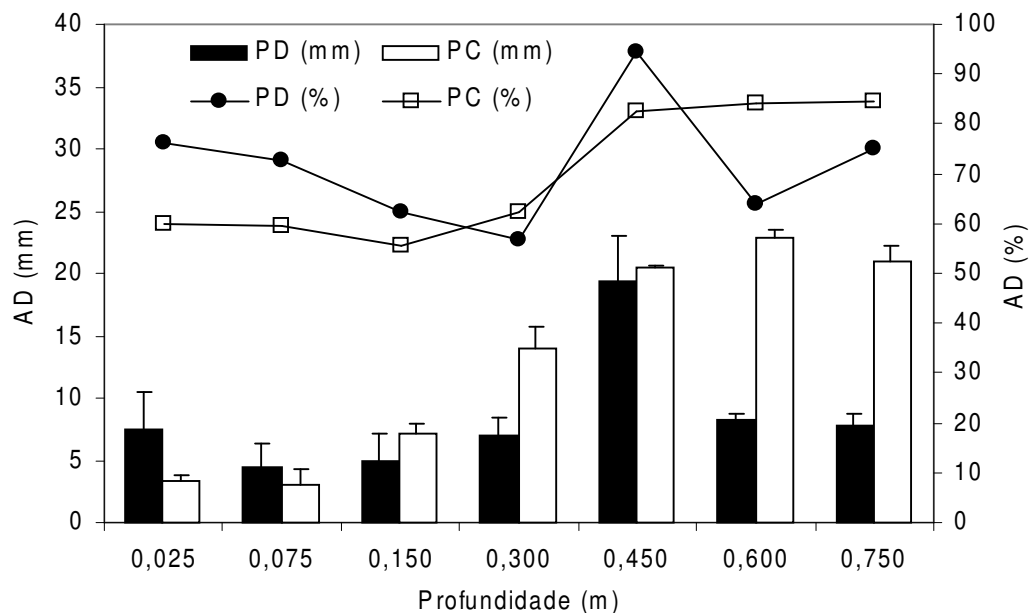


FIGURA 21. Água disponível (AD) no solo até o potencial matricial de $-0,1\text{MPa}$ (mm) e valor relativo da mesma à capacidade máxima (%), para diferentes camadas de solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), representadas pela profundidade média. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

A interação entre a demanda evaporativa da atmosfera e as espécies cultivadas, na extração da água disponível no solo, remete para a análise do limite crítico de água no solo, estabelecido por Doorenbos e Kassan (1979) e conhecido como fração “p”. A fração “p” é a água disponível na faixa dentro da qual a cultura não entra em déficit hídrico. Acima deste limite a transpiração é função da demanda evaporativa da atmosfera e, abaixo, ela é limitada pela disponibilidade de água no solo (Bergamaschi et al., 1992).

O valor da fração “p” depende da cultura, da magnitude da evapotranspiração máxima e do solo (Doorenbos e Kassan, 1994), mais especificamente, da capacidade máxima de retenção de água. Assim, considerando-se uma cultura qualquer e uma dada condição de demanda evaporativa atmosférica (evapotranspiração máxima), os percentuais observados

nas Figuras 20 e 21, podem ser considerados como aproximações da fração “p” de água disponível. Então, com base nisso, à medida que o PD garante maior disponibilidade de água, por exemplo, até limite de funcionamento do tensiômetro, amplia a fração “p” de água disponível. Isso significa que as plantas em PD retardam sua entrada em déficit hídrico, quando comparado ao PC. Tais evidências foram verificadas por Bianchi (2004), avaliando indicadores do estado hídrico do milho durante o experimento de 2002/03. Em termos práticos, isso pode proporcionar a garantia de altos rendimentos da cultura, caso um déficit hídrico curto se estabelecer durante o período crítico da mesma, que abrange o pendoamento/espigamento.

4.7 Dinâmica da água no solo: Efeito dos sistemas de manejo

4.7.1 Evolução do potencial matricial durante ciclos de secagem do solo

A partir deste item, as diferenças entre os sistemas de manejo do solo serão avaliadas considerando o efeito do fator tempo. A influência dos sistemas de manejo do solo na dinâmica da água no mesmo foi avaliada numa área sem a presença de plantas, durante ciclos de secagem do solo nos experimentos de 2001/02 e 2002/03. Embora, até este item a análise dos resultados referentes à parte hídrica do solo tenha sido feita em base de θ_v , a avaliação a seguir será feita com base na variação do Ψ_m .

A opção pela utilização do Ψ_m , como variável de análise do estado hídrico do mesmo, foi feita pelo fato do potencial da água ter um significado físico mais consistente e relacionado ao estado energético da água na planta e na atmosfera (Bergamaschi et al., 1992). Além disso, esse conceito elimina critérios arbitrários pelos quais a água do solo tem sido classicamente subdividida (como água gravitacional, capilar e higroscópica), considerando que toda a água do solo é afetada pelo campo de gravidade da terra (Reichardt, 1996). Ainda, as leis da capilaridade não explicam por completo o fenômeno da retenção da água no solo, uma vez que parte da água se encontra retida pelo fenômeno de adsorção. Assim, a água é a mesma em qualquer posição dentro do solo, não diferindo na “forma”, mas apenas, em seu estado energético (Reichardt, 1996).

A evolução do Ψm durante os experimentos de 2001/02 e 2002/03, na área que não foi irrigada, pode ser visualizada nas Figuras 22 e 23, respectivamente. De maneira geral, em ambos experimentos, o Ψm diminuiu mais intensamente em PC do que naquele em PD, durante o TSS. Entre os sistemas de manejo, a diferença de Ψm foi mais acentuada próximo à superfície, principalmente, a 0,075m e 0,15m de profundidade. Na profundidade de 0,45m, praticamente, não houve variação de Ψm ao longo dos períodos de avaliação (Figuras 22 e 23), o que resultou em diferenças insignificantes entre o solo em PD e PC. Condições de θv mais favoráveis próximas à superfície, no solo em PD, também foram observadas por Bragagnolo & Mielniczuk (1990a), Fortin (1993) e Sauer et al. (1996), entre outros.

Na área irrigada a tendência do Ψm foi semelhante à área não irrigada, porém, as diferenças entre os sistemas foram menores em decorrência do suprimento de água que foi feito ao solo durante o período experimental (Apêndice 17).

O Ψm foi mais elevado no PD e as diferenças entre sistemas foram mais acentuadas próximo à superfície, pelo fato do solo em PD ter apresentado maior capacidade de armazenagem de água nas primeiras camadas de solo, até o limite de funcionamento do tensiômetro (Figura 20). Esta maior capacidade de armazenagem de água, conforme já foi discutido anteriormente, se deve às melhorias nas condições físicas do solo, principalmente, redução da densidade (Figura 5), aumento da porosidade total (Figura 6), e da mesoporosidade (Figura 7b) e distribuição de poros com maior quantidade nas classes de maior diâmetro (Figuras 8 e 9). Em síntese, houve modificação da geometria porosa do solo em plantio direto (Lindstrom et al., 1984; Tollner et al., 1984; Bragagnolo & Mielniczuk, 1990a), que resultou em condições mais favoráveis de armazenagem de água.

Além do exposto acima, o Ψm mais elevado em PD, em relação a PC, pode estar relacionado, também, à maior $K(\theta)$ neste sistema de manejo (Figura 12), que também é função da melhoria das condições físicas do mesmo. A $K(\theta)$ mais elevada significa maior capacidade de movimentação da água no solo em PD e, portanto, condições de atendimento ao gradiente do potencial total da água, que se forma, por exemplo, com a evaporação da água na superfície.

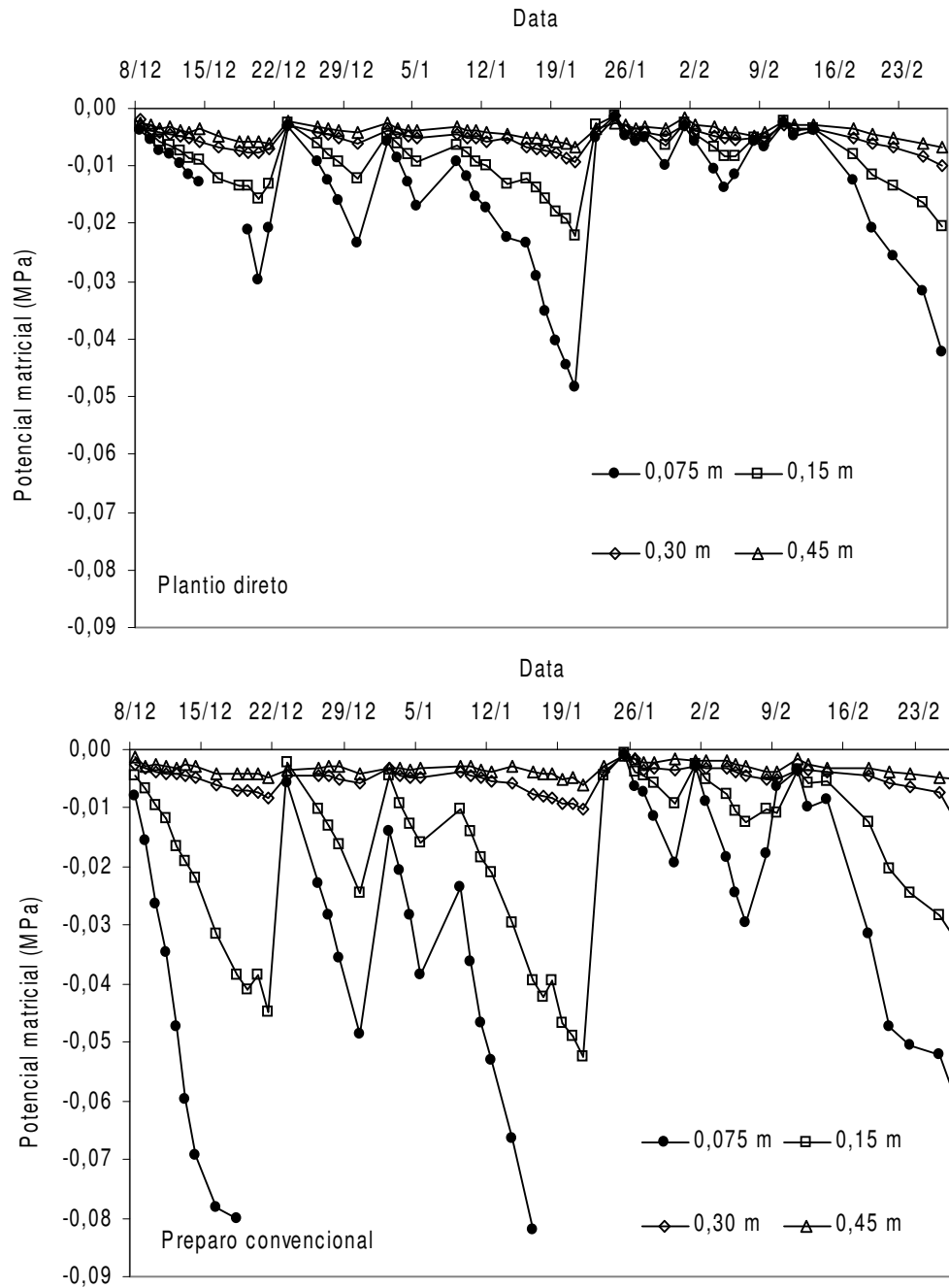


FIGURA 22. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional, em quatro profundidades, em área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

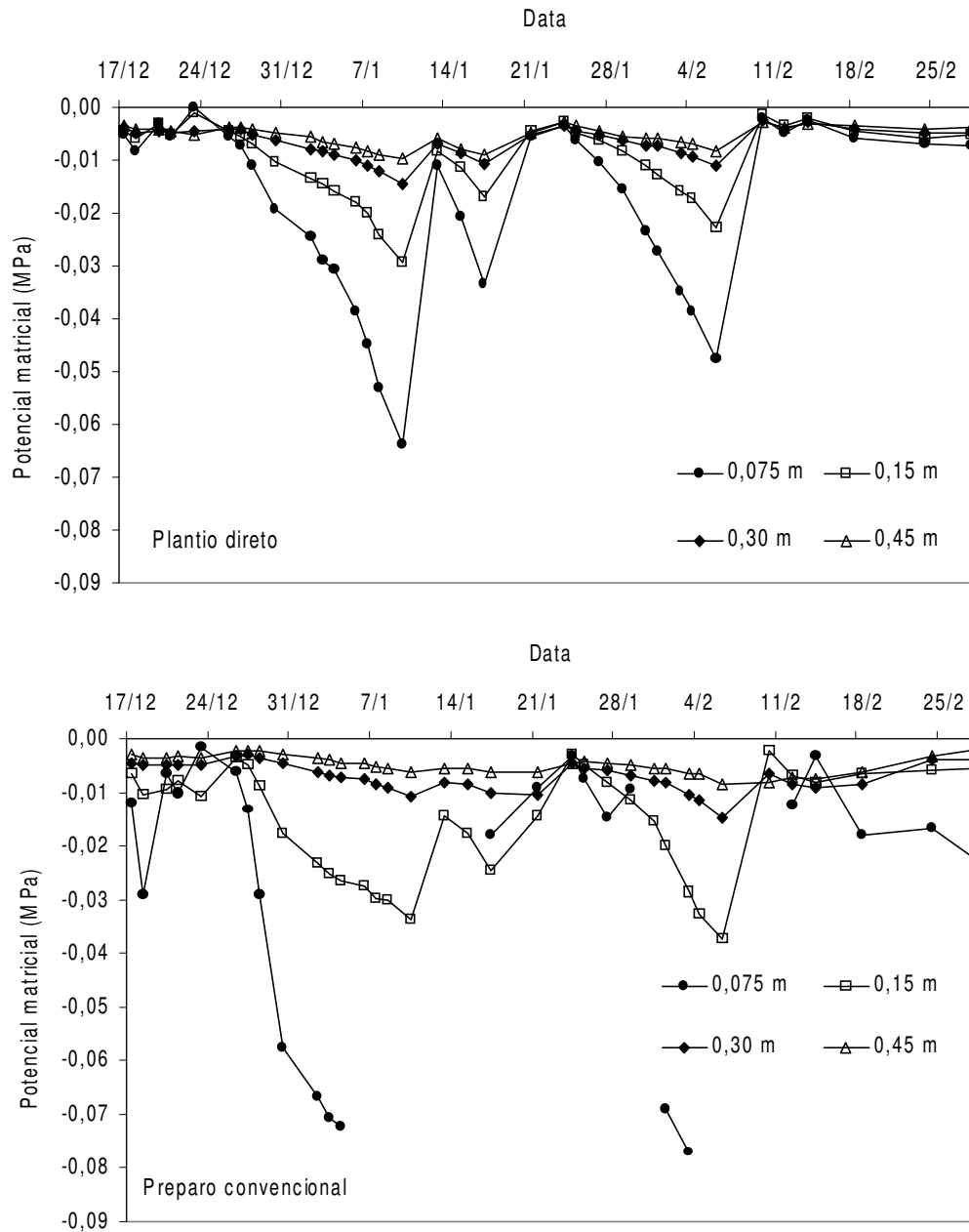


FIGURA 23. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional, em quatro profundidades, em área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

As diferenças de Ψ_m entre o PD e o PC, em geral, foram mais acentuadas no experimento de 2002/03 (Figura 23) em relação à 2001/02 (Figura 22). Isto é evidente, principalmente, pelo maior tempo em que o tensiômetro na profundidade de 0,075m esteve desativado no solo em PC em relação a 2001/02. O aumento das diferenças entre o PD e o PC, em 2002/03, se deve à maior concentração da precipitação neste experimento (Figura 2), em relação àquele de 2001/02 (Figura 1), apesar da quantidade de precipitação ter sido maior em 2002/03.

A evolução temporal do Ψ_m da água no solo (Figuras 22 e 23), além de mostrar o efeito do fator tempo, confirmou as tendências verificadas nas avaliações feitas em laboratório. Isso confere confiabilidade nas metodologias adotadas, bem como representatividade dos resultados alcançados, principalmente, no sentido de mostrar a superioridade na disponibilidade hídrica do solo em PD, em relação àquele em PC.

Numa análise mais detalhada poderia ser visualizado que, a campo, o PD se mostrou ainda mais superior na condição hídrica do solo do que o PC. Esta hipótese é suportada pela maior variabilidade do Ψ_m no solo em PC em todas as profundidades, em função da menor retenção de água. Devido à maior quantidade de água armazenada no solo em PD, principalmente, próximo à superfície, as oscilações se mantiveram mais estáveis com as oscilações das condições meteorológicas. Assim, constata-se que, apesar da menor variabilidade espacial nas propriedades físicas e químicas (Souza, 1992), o PC apresenta maior variabilidade temporal das condições hídricas do que o solo em PD.

A superioridade na disponibilidade hídrica do solo em PD, provavelmente, é maior do que as análises de laboratório conseguem mostrar. Isto ocorre pelo fato de que as amostragens do solo, para estudos em laboratório, impedem a detecção da real situação presente no campo. As coletas pontuais de solo não permitem identificar a continuidade e a conexão dos poros e, tampouco, a presença de áreas mais úmidas, que são fatores importantes na dinâmica hídrica do solo. Ao contrário, o Ψ_m medido a campo integra esses fatores e responde, satisfatoriamente, a qualquer interferência no estado energético da água. Por isso, a menor variabilidade do Ψ_m configura também, melhor interconexão da porosidade, concordando com as afirmações e evidências de que

o PD altera a configuração porosa do solo (Lindstrom et al., 1984; Tollner et al., 1984; Hill et al., 1985; Shaefer et al., 2001).

4.7.2 Estudo de casos de secagem do solo

Para melhor visualizar as diferenças na dinâmica da água entre o solo em PD e aquele em PC, foram obtidos seis períodos de secagem, com base na variação do Ψ_m apresentado nas Figuras 22 e 23. Os ciclos de secagem do solo, com o respectivo número de dias dos mesmos, o total de precipitação ocorrida em dias imediatamente anteriores ao início dos ciclos de secagem, assim como o número de medições de Ψ_m realizadas em cada ciclo, podem ser observados na Tabela 4. O critério de seleção dos ciclos de secagem foi a existência de, pelo menos, quatro dias de medição do Ψ_m .

TABELA 4. Ciclos de secagem do solo, em diferentes períodos, com o respectivo número de medições e total de precipitação ocorrida nos dias imediatamente anteriores ao início de cada ciclo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

Ciclos de secagem do solo	Período de avaliação	Nº de medições	Total de precipitação (mm)
1º	08/12/2001 a 19/12/2001	09	28,9
2º	23/12/2001 a 30/12/2001	05	36,0
3º	06/01/2002 a 21/01/2002	11	43,8
4º	14/02/2002 a 22/02/2002	04	37,2
5º	26/12/2002 a 08/01/2003	10	36,5
6º	24/01/2003 a 04/02/2003	08	45,7
TOTAL		47	

Dos seis ciclos de secagem apresentados na Tabela 4, foram selecionados três para a avaliação do avanço da frente de secagem do solo, uma vez que as tendências foram semelhantes entre todos os ciclos de secagem do solo. Os ciclos escolhidos foram o primeiro, quinto e o sexto, os quais podem ser visualizados, também, nas Figuras 22 e 23. Dentro destes períodos foi selecionada uma seqüência de quatro dias para mostrar a evolução do processo de secagem do solo. A representação gráfica dos mesmos pode ser observada nas Figuras 24, 25 e 26.

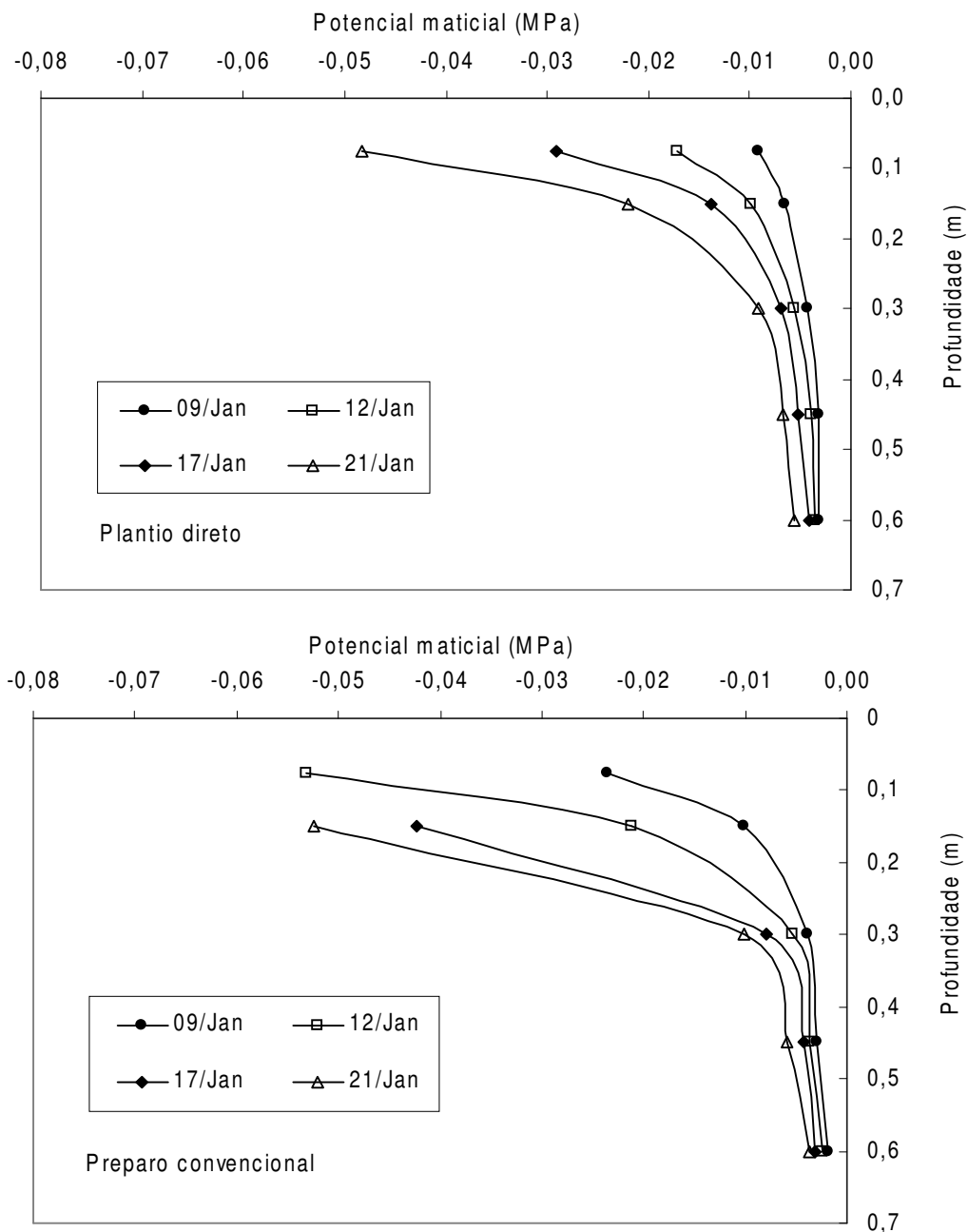


FIGURA 24. Evolução da secagem do solo em plantio direto e preparo convencional, com base na variação do potencial matricial da água no solo em diferentes profundidades, no período de 09 a 21 de janeiro. Área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

O padrão de secagem foi semelhante entre o solo em PD e PC, nos três períodos selecionados, conforme verificado anteriormente nas Figuras 22 e 23. A perda de água do solo ocorreu, inicialmente, na camada mais próxima à

superfície, conforme esperado (Bergamaschi, 1984), evoluindo para as camadas de solo mais profundas, à medida que se intensificou a secagem do mesmo ou com a continuação do ciclo de secagem. Entre o solo em PD e PC observou-se diferença na velocidade da frente de secagem do solo. A frente avançou de forma mais rápida no solo sob PC, comparado àquele sob PD, em todos os períodos avaliados (Figuras 24, 25 e 26), inclusive nos demais ciclos de secagem (Tabela 3).

A diferença no avanço da frente de secagem entre o PD e o PC, pode ser identificada acompanhando a evolução do Ψ_m em profundidade, ao longo da seqüência de dias selecionados em cada ciclo. Por exemplo, na Figura 24 verifica-se que, nos dias 17 e 21 de janeiro de 2002, o tensiômetro a 0,075m de profundidade já havia deixado de funcionar no PC, ou seja, havia ultrapassado o limite de $-0,08\text{MPa}$. Nos mesmos dias, no solo em PD e na mesma profundidade o tensiômetro ainda não havia chegado a acusar $-0,05\text{MPa}$, indicando maior quantidade de água neste solo. Esta mesma situação foi verificada também no segundo ciclo (Figura 25) e, mais intensamente, no terceiro período de avaliação (Figura 26). A tendência de maior θ_v no solo em PD, observada a campo, corresponde às evidências mostradas pelas análises físicas feitas em laboratório (Figuras 20 e 21) e estão de acordo com trabalhos da literatura que também mostram resultados semelhantes (Sidiras et al., 1983; Bragagnolo & Mielniczuk, 1990b; Drury et al., 1999; Lampurlanés et al., 2001). A semelhança na evolução do Ψ_m em PD e PC, durante os seis ciclos de secagem (Tabela 4), tem significativa importância por vários motivos. Primeiro mostra que a evolução esperada do Ψ_m , tanto no solo em PD quanto naquele em PC, é aquela observada nas Figuras 24, 25 e 26, uma vez que as mesmas tendências se mantiveram em ciclo após ciclo de secagem. O segundo aspecto é que a semelhança observada atesta confiança nos procedimentos adotadas na avaliação do Ψ_m , principalmente, na utilização de tensiômetros como sensores identificadores da variação de θ_v . A importância é ressaltada se considerarmos que os resultados foram obtidos em situação de campo em que, naturalmente, as fontes de variação são maiores, como a variabilidade espacial do solo. Terceiro, a semelhança entre as medições a campo e laboratório, indicando maior disponibilidade hídrica em PD, do que em PC, demonstra que o número de

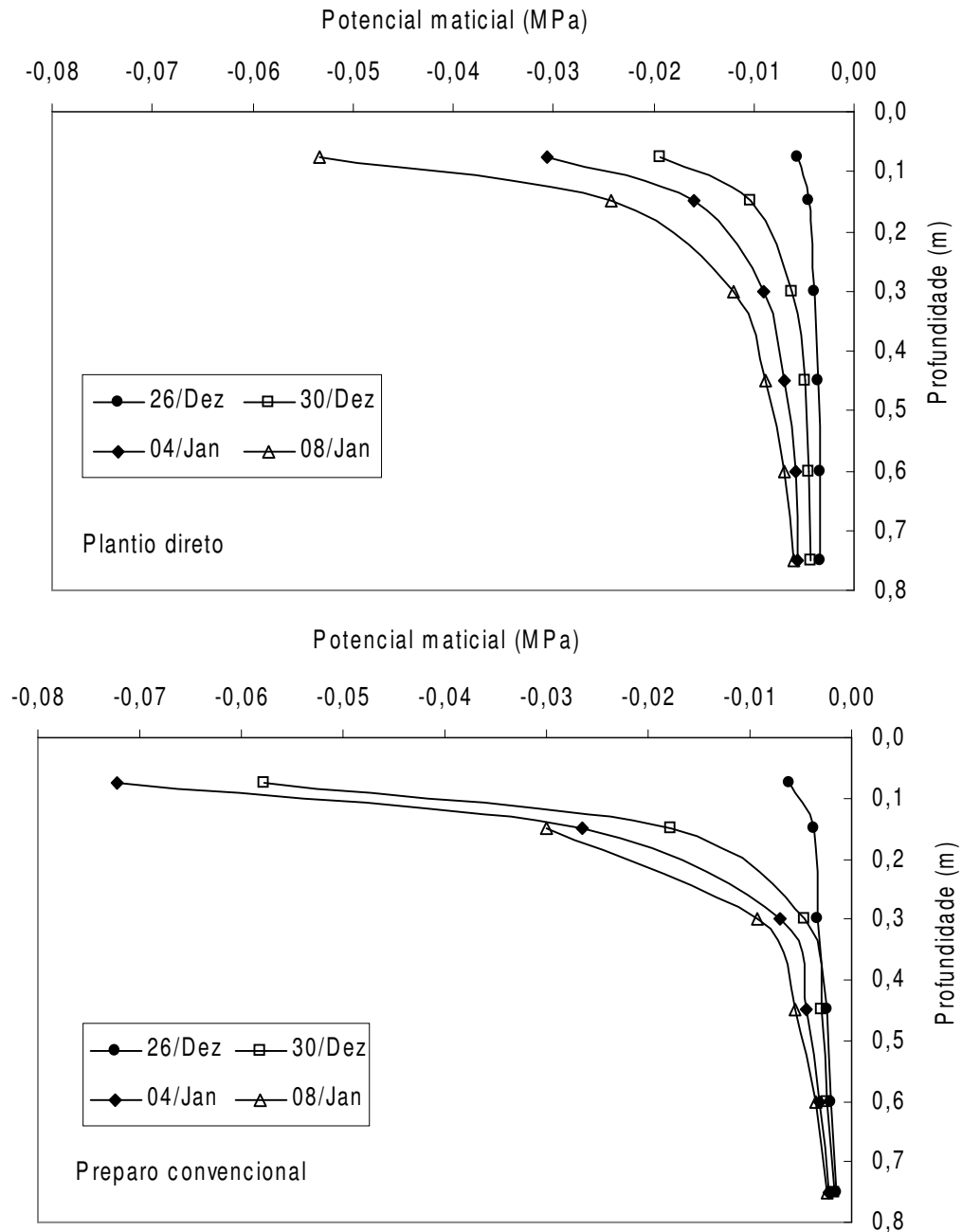


FIGURA 25. Evolução da secagem do solo em plantio direto e preparo convencional, com base na variação do potencial matricial da água no solo em diferentes profundidades, no período de 26 de dezembro a 08 de janeiro. Área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

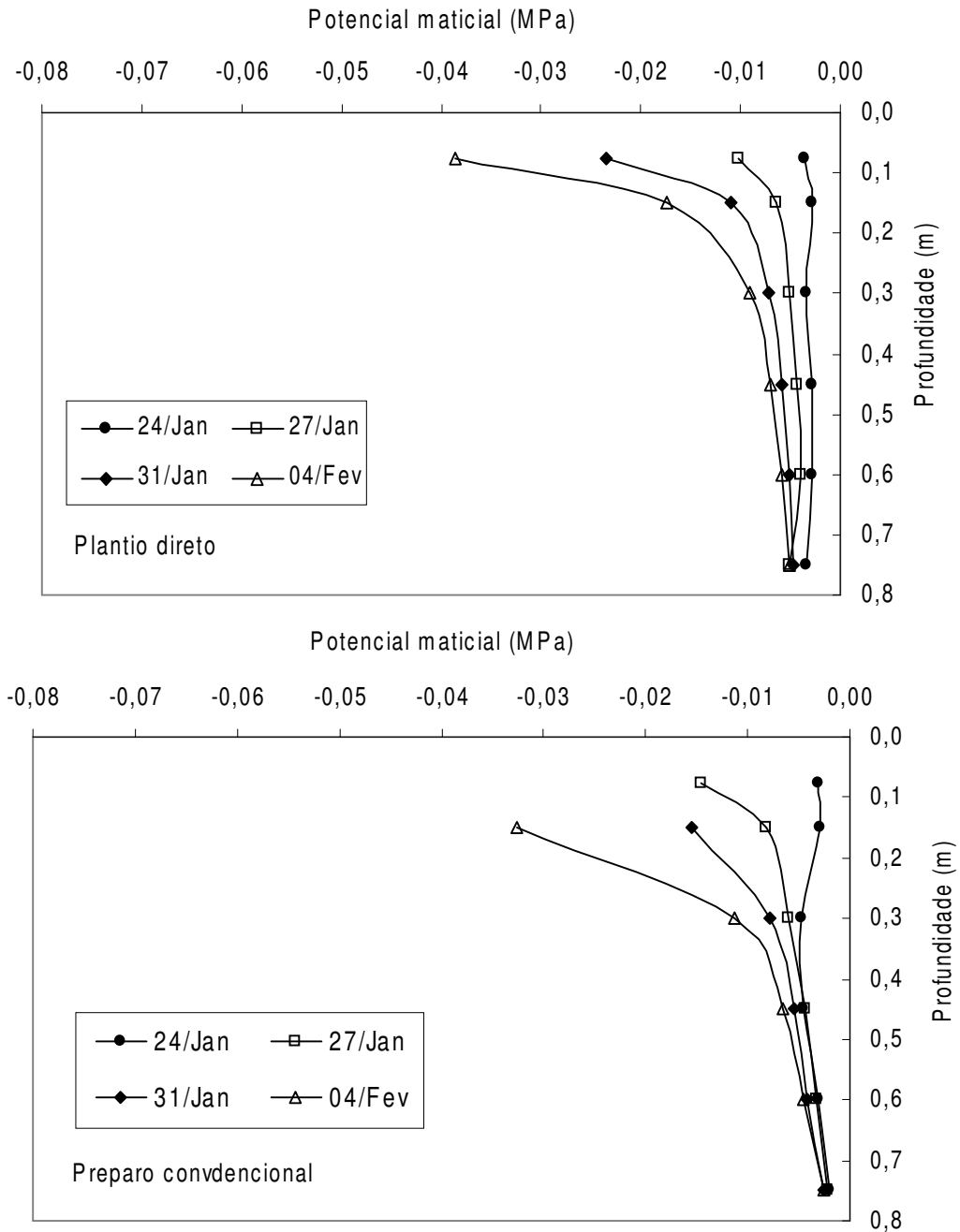


FIGURA 26. Evolução da secagem do solo em plantio direto e preparo convencional, com base na variação do potencial matricial da água no solo em diferentes profundidades, no período de 24 de janeiro a 04 de fevereiro. Área sem plantas e sem aplicação de irrigação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2003.

amostras de solo coletadas para avaliação das propriedades físicas em laboratório foi suficiente para identificar as tendências representativas da diferença entre o PD e o PC. Em outras palavras, os valores relativos às propriedades físicas apresentadas neste trabalho são indicadores confiáveis da condição média presente no solo e mantém coerência física entre si, convergindo para as evidências observadas a campo.

A maior θ_v no solo em PD, representada pelos Ψ_m mais elevados em relação a PC, ocorreu devido à maior capacidade de armazenagem de água, conforme mostrado nas Figuras 20 e 21. Entretanto, a redução da velocidade da frente de secagem do solo em PD pode estar indicando contribuição significativa da $K(\theta)$, conforme mencionado anteriormente, a qual foi maior neste sistema de manejo, principalmente, nas camadas mais próximas à superfície (Figura 12).

A contribuição da $K(\theta)$ é verificada, quando é analisada a diferença que separa as curvas diárias de Ψ_m nas profundidades maiores. Nos casos apresentados (Figuras 24, 25 e 26) a distância entre as mesmas é maior em PD do que em PC, até 0,6m de profundidade. Esta variação distinta pode ser considerada como evidência da contribuição da $K(\theta)$ no suprimento de água às camadas mais próximas à superfície, garantindo, assim, redução da velocidade da frente de secagem do solo em PD.

No solo em PC o afastamento das curvas de Ψ_m foi menor entre os dias avaliados (Figuras 24, 25 e 26), o que indicaria menor contribuição da $K(\theta)$, uma vez que esta também foi menor, comparada a $K(\theta)$ em PD (Figura 12). A redução da contribuição da $K(\theta)$ no solo em PC, também se deve à menor θ_v do solo sob este sistema de manejo, já que a $K(\theta)$ varia de forma logarítmica com a θ_v do solo (Logsdon & Joynes, 1996).

As tendências apresentadas acima foram percebidas, também, em períodos mais curtos de secagem do solo e, inclusive, na área irrigada. Nos dois casos, as diferenças no avanço da frente de secagem do mesmo foram menores entre os sistemas de manejo, perdendo importância no sentido de avaliar o efeito dos sistemas de manejo em si. Em períodos de elevadas precipitações ou de irrigações freqüentes, tanto PD quanto PC, mantiveram maior armazenagem de água no solo não sendo de grande importância o destaque de um sistema de manejo sobre o outro, no ponto específico da disponibilidade hídrica. Entretanto,

os benefícios da utilização do PD, como meio de reduzir riscos e manter a sustentabilidade do sistema, se mantém em outros aspectos, como redução da erosão, reciclagem de nutrientes e manutenção da vida no solo, entre outros.

Baseado nos resultados acima, a importância da diferença na disponibilidade de água entre o PD e o PC é maior no momento em que ocorre déficit hídrico. Nesta condição, pequenos aumentos na disponibilidade de água no solo proporcionam a manutenção de um melhor estado hídrico das plantas em PD, em relação ao PC como verificou Bianchi (2004). Isto é especialmente importante para espécies como o milho, que apresentam período crítico bem definido.

4.7.3 Estimativa da secagem do solo

Para estabelecer um parâmetro numérico de diferenciação da dinâmica hídrica, entre o PD e PC e, também, buscando um detalhamento das evidências apresentadas, foi feita uma análise do modelo que descreve a secagem ao longo do tempo, para cada profundidade de solo. O mesmo foi elaborado englobando os seis ciclos de secagem descritos na Tabela 4. A representação da evolução do Ψ_m ao longo do tempo, após o início dos ciclos de secagem, para as três primeiras camadas próximas à superfície, pode ser verificada nas Figuras 27, 28 e 29, respectivamente. Os modelos que descrevem a evolução do Ψ_m , para cada sistema de manejo de solo e para as três profundidades que apresentaram maior variação de θ_v são apresentados na Tabela 5.

Na área sem plantas (Apêndice 2), a secagem do solo ao longo do tempo foi descrita por diferentes modelos, tanto entre as profundidades quanto entre os sistemas PD e PC (Tabela 5). Nas camadas mais próximas à superfície (0,075m e 0,15m) (Figuras 27 e 28), a queda do Ψ_m com o TSS seguiu tendência não linear, devido à redução mais intensa da θ_v nas mesmas. Na profundidade de 0,3m (Figura 29), como a secagem do solo foi menos intensa, a variação do Ψ_m também foi pequena e, por isso, o modelo que melhor explicou o decaimento do Ψ_m com o TSS , foi o linear, tanto PD quanto em PC. Em todas as profundidades avaliadas, nos dois sistemas de manejo, os modelos selecionados apresentaram alto grau de ajuste aos dados, conforme evidenciam os elevados coeficientes de determinação na Tabela 5.

TABELA 5. Modelos de estimativa da evolução do potencial matricial da água no solo (Ψm , MPa) em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em diferentes profundidades (z , m), em função do tempo de secagem do solo (TSS , dias), com respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação (R^2_{ajis}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

Sistema de manejo	z (m)	Modelos	Parâmetros	R^2_{ajis}
PD	0,075	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = 0,0058$ $b = 0,1403$	0,86
PD	0,15	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = 0,0042$ $b = 0,1065$	0,90
PD	0,3	$\Psi m = -a - bTSS$	$a = 0,0026$ $b = 0,0004$	0,82
PC	0,075	$\Psi m = \Psi m_o + \frac{a}{1 + e^{\frac{TSS - TSS_o}{b}}}$	$a = 0,1101$ $b = -3,1955$ $TSS_o = 5,9759$ $\Psi m_o = -0,0939$	0,96
PC	0,15	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = 0,0064$ $b = 0,1351$	0,88
PC	0,3	$\Psi m = -a - bTSS$	$a = 0,0016$ $b = 0,0005$	0,94

OBS: R^2_{ajis} = coeficiente de determinação ajustado ao número de observações e parâmetros do modelo; a e b são coeficientes empíricos de ajuste dos modelos; TSS_o e Ψm_o são o tempo de secagem do solo inicial e o potencial matricial no primeiro dias do início do ciclo de secagem do solo, respectivamente.

Nas profundidades de 0,075m e 0,15m, o modelo que melhor explicou a redução do Ψm em PD foi exponencial (Tabela 5). O mesmo modelo também se mostrou adequado para explicar a variação do Ψm a 0,15m de profundidade no solo em PC, mas não se ajustou bem aos valores de Ψm na profundidade de 0,075m. Nesta profundidade, em PC, o modelo com melhor ajuste foi o sigmóide, o qual descreve de forma diferenciada, em relação ao exponencial, a variação do Ψm , principalmente, no tempo intermediário de secagem do solo (Tabela 5). A diferença entre os modelos que explicam o decaimento do Ψm com o TSS entre profundidades e, numa mesma profundidade, entre os sistemas de manejo, se deve, basicamente, à baixa intensidade de secagem do solo nos períodos

avaliados, aliado à diferença na capacidade de armazenagem de água observada entre em PD e o PC (Figuras 20 e 21).

Para ciclos de secagem mais prolongados ou em períodos de secagem mais intensa do solo, a evolução do Ψ_m tende a se aproximar da forma sigmóide, que geralmente é a mesma assumida pelas curvas características de retenção de água. Desta forma, a diferença verificada na profundidade de 0,075m, entre os modelos que melhor descreveram a secagem do solo, não significa que a secagem seja distinta entre o solo sob PD e PC. O que ocorreu, neste caso, foi um deslocamento, no tempo, da curva que explica a variação do Ψ_m em PD, em função do mesmo apresentar maior retenção de θ_v até o limite de funcionamento do tensiômetro (Figura 20), quando comparado àquele em PC. Em função desta característica, o ajuste do Ψ_m no solo em PD ocorreu apenas na parte inicial do modelo sigmóide, descrevendo adequadamente a redução exponencial do Ψ_m .

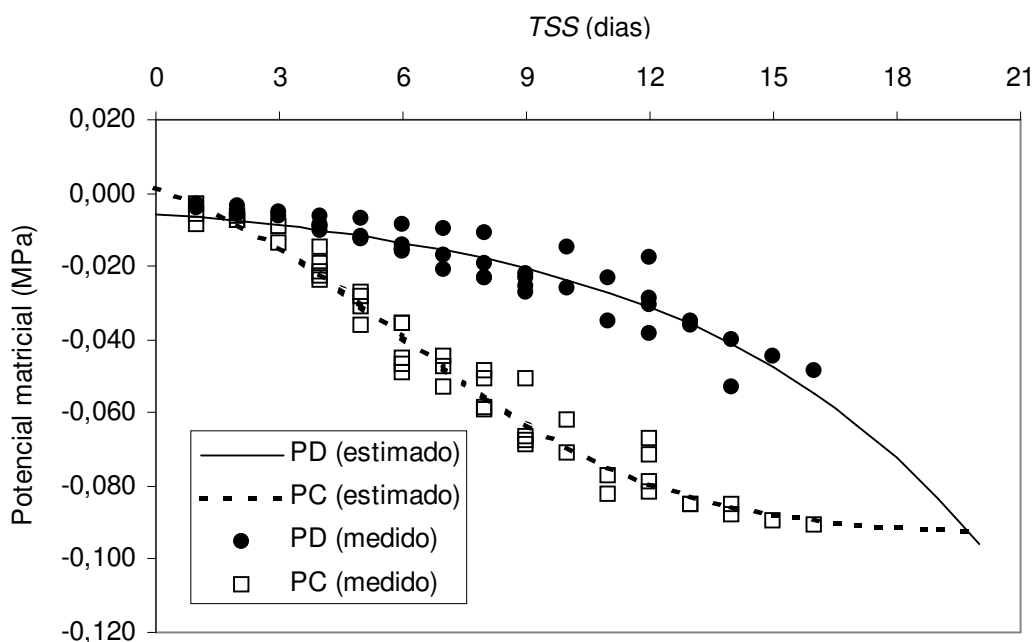


FIGURA 27. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0,075m, medido e estimado em função do tempo de secagem do solo (TSS) (modelo da Tabela 5). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

A tendência distinta na redução do Ψ_m com o TSS , entre o PD e o PC, nas profundidades de 0,075m e 0,15m, confirma que a água esteve mais fortemente retida no solo em PC do que no solo em PD, até o limite de

rompimento da coluna de mercúrio do tensiômetro (Figura 20). Ao mesmo tempo, explica porque o Ψ_m caiu mais lentamente no solo em PD, levando mais tempo para atingir um mesmo valor que no solo em PC (Tabela 6).

A diferença de tempo para que o mesmo Ψ_m da água no solo em PC fosse registrado naquele em PD foi, em média, de 7,6 dias considerando o Ψ_m de $-0,05\text{MPa}$, e de 5,6 dias para $-0,08\text{MPa}$ (Tabela 6). Isto foi verificado para as três primeiras profundidades, que foram as mais afetadas pela secagem do solo. Para a maioria das profundidades e para os dois Ψ_m , a diferença entre sistemas de manejo foi significativa (Tabela 6), demonstrando, nitidamente, a maior disponibilidade hídrica em PD, quando o fator tempo é considerado. As diferenças significativas, em relação ao PC, ocorreram devido à maior variação da θ_v proporcionada pela secagem nas primeiras camadas de solo neste sistema de manejo e à maior retenção de água nas mesmas em PD (Figuras 15 e 20).

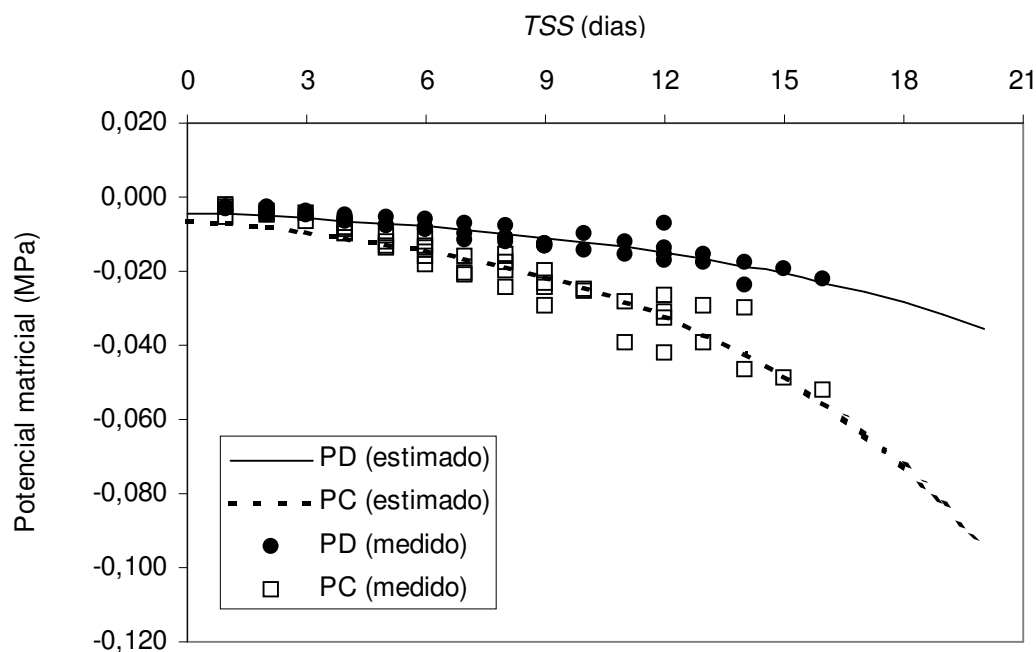


FIGURA 28. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0,15m, medido e estimado em função do tempo de secagem do solo (TSS) (modelo da Tabela 5). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

A redução do tempo de 7,6 dias para 5,6 dias, com a diminuição do Ψ_m de $-0,05\text{MPa}$ para $-0,08\text{MPa}$, pode ser um indicativo de que a condição hídrica

do solo em PD se aproxima daquela em PC, à medida que aumenta o TSS , como em períodos de déficit hídrico elevado. Entretanto, tais índices não podem ser extrapolados para condições de menor Ψ_m , ou tomados como parâmetros fixos em qualquer tipo de solo, pois dependem da geometria porosa do meio, principalmente, da conexão, continuidade e prolongamento dos poros e da formação de zonas mais úmidas no perfil.

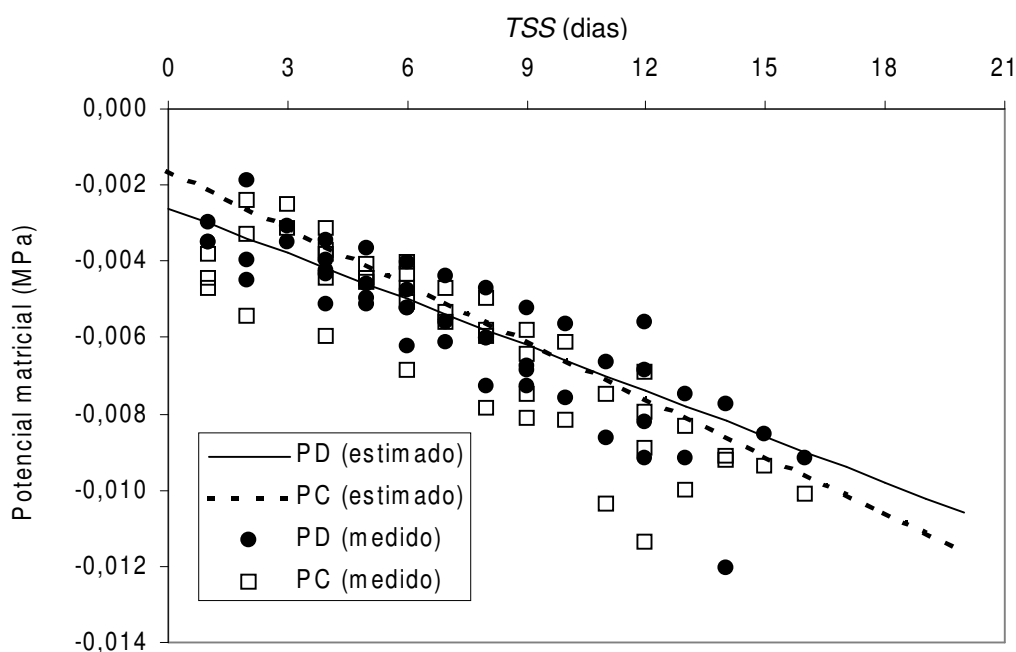


FIGURA 29. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) na profundidade de 0,3m, medido e estimado em função do tempo de secagem do solo (TSS) (modelo da Tabela 5). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

A extrapolação da curva ajustada pelo modelo na profundidade de 0,075m (Figura 27) permite estimar o tempo, após o início do ciclo de secagem, em que o Ψ_m seria igual no solo em PD e PC. No caso desta profundidade, a intersecção em as curvas nos dois sistemas de manejo ocorreria, cerca de 20 dias após o início do ciclo de secagem. O valor de Ψ_m em que a intersecção foi verificada foi de $-0,096\text{MPa}$.

Tomando a profundidade de 0,075m como sendo a mais afetada pelo sistema de PD, pode-se inferir que este sistema proporciona melhor disponibilidade hídrica no solo por cerca de 20 dias, comparado ao PC. Entretanto, isto não garante melhor condição hídrica às plantas, uma vez que a

TABELA 6. Número de dias necessários para que o potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), atingisse os limites de $-0,05\text{MPa}$ e $-0,08\text{MPa}$, em diferentes profundidades (z), durante seis ciclos de secagem do solo (Tabela 4). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

Ciclos de Secagem do solo	Potencial matricial da água no solo						Potencial matricial da água no solo					
	$-0,05\text{MPa}$						$-0,08\text{MPa}$					
	z (m)						z (m)					
	0,075		0,15		0,3		0,075		0,15		0,3	
	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC
1	19	8	36	15	35	33	23	19	42	18	40	38
2	11	8	16	11	30	41	13	10	19	13	35	48
3	16	6	26	16	44	37	20	12	31	42	51	43
4	12	8	19	13	28	43	14	11	22	15	33	51
5	14	7	20	-	30	-	17	11	24	-	35	-
6	13	7	20	14	31	33	16	12	23	17	37	39
Média	14 a	7 b	22 a	13 b	33 a	37 a	17 a	13 b	25 a	19 a	39 a	43 a

OBS: Média dos tratamentos seguidas pela mesma letra, numa determinada profundidade, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

mesma depende do volume de solo explorado pelo sistema radicular e da capacidade de extração da água. Portanto, a avaliação deste indicador é mais adequada se for realizada com a presença de plantas em crescimento.

Nas profundidades de 0,15m (Figura 28) e de 0,3m (Figura 29), a intersecção entre a linha que representa os valores simulados de Ψ_m para o PD e PC não esteve associada ao tipo de modelo ajustado. Os modelos exponencial e linear, respectivamente, descreveram apenas a parte inicial da curva teórica de secagem de solo que, fisicamente, segue a forma aproximada de uma curva sigmóide. Evidência disso é o aumento da dispersão dos pontos a 0,3m de profundidade no solo em PC, à medida que avança o tempo, sugerindo a ocorrência do primeiro ponto de inflexão da reta, o que mudaria a forma do modelo a ser ajustado. Portanto, a forma do modelo que explica a secagem do solo, considerando apenas o efeito do sistema de manejo do mesmo, depende das condições físicas, da profundidade do solo e do *TSS*. Entre esses fatores, o tempo parece ser o fator que permite identificar melhor as diferenças mais importantes entre o solo sob PD e aquele em PC.

A redução da velocidade de secagem do solo em PD ou, ao contrário, a presença de maior quantidade de água neste sistema de manejo é apontada por muitos autores, como consequência da redução da evaporação da mesma na superfície, ocasionada pela palha presente sobre o solo. Embora esse efeito tenha respaldo físico, há evidências que mostram que a maior contribuição para a elevação da θ_v no solo em PD é consequência do aumento do “reservatório” responsável pela armazenagem de água no mesmo, sendo pouco relacionada à redução da evaporação na superfície em PD. Conforme resultados apresentados por Dalmago et al. (2003b) a quantidade de água evaporada entre o solo sob PD e convencional não difere com a evolução da secagem do mesmo, sendo até maior no PD do que no PC. Resultados mais detalhados sobre o processo de evaporação da água em PD e PC serão discutidos no item evaporação da água na superfície do solo.

4.7.4 Verificação dos modelos de secagem do solo

A capacidade preditiva dos modelos apresentados na Tabela 5 foi testada com dados independentes de Ψ_m , medidos em outros ciclos de secagem

de menor duração, e com valores de Ψm medidos durante a secagem do solo após as irrigações, em ambos sistemas de manejo. Neste caso a irrigação foi considerada como tendo o mesmo efeito de um evento de precipitação e, portanto, o dia seguinte à realização da mesma foi considerado como início da contagem do *TSS*.

A verificação dos modelos da Tabela 5 para PD (Figura 30a) e PC (Figura 30b), mostra, num primeiro momento, tendências diferente entre os mesmos. Em PD observa-se alta aderência dos valores de Ψm em torno da linha de regressão e da linha 1:1, conforme indicam o r^2 elevado e os coeficientes linear e angular, próximos de zero e 1, respectivamente. Em PC, embora a aderência à curva de regressão também tenha sido significativa ($r^2 = 0,84$), a dispersão em torno da linha 1:1 foi mais elevada, com tendência de aumento da mesma em Ψm menores. Entretanto, quando foi analisada a significância estatística dos respectivos coeficientes angulares pelo teste t, observou-se que ambos são diferentes de 1, o que indica baixa capacidade preditiva dos mesmos. O valor de t para o PD foi de 2,42 e para o PC foi de 8,94, enquanto o valor de t tabelado foi de 1,96.

A falta de aderência à linha 1:1 nos dois sistemas de manejo, provavelmente, está relacionada ao fato de que os ciclos de secagem do solo utilizados para verificar os modelos foram menores do que aqueles para o ajuste. Além disso a, utilização de ciclos de secagem iniciados após a irrigação pode ter aumentado a variabilidade entre os valores medidos e estimados de Ψm , uma vez que, dificilmente, a irrigação torna a θv do solo tão homogênea, como uma precipitação. Em PD, o fato deste sistema reter maior quantidade de água contribuiu para melhorar a performance dos modelos quanto à aderência à linha 1:1, conforme mostrado pelo menor valor de t calculado (2,42), embora não sendo significativo.

A capacidade preditiva também foi testada através da análise do quadrado médio do erro no ajuste do modelo, e o quadrado médio do erro entre valores estimados e medidos de Ψm (Neter et al., 1996). Este critério também identificou diferenças entre os modelos de PD e PC, observadas na Figura 30.

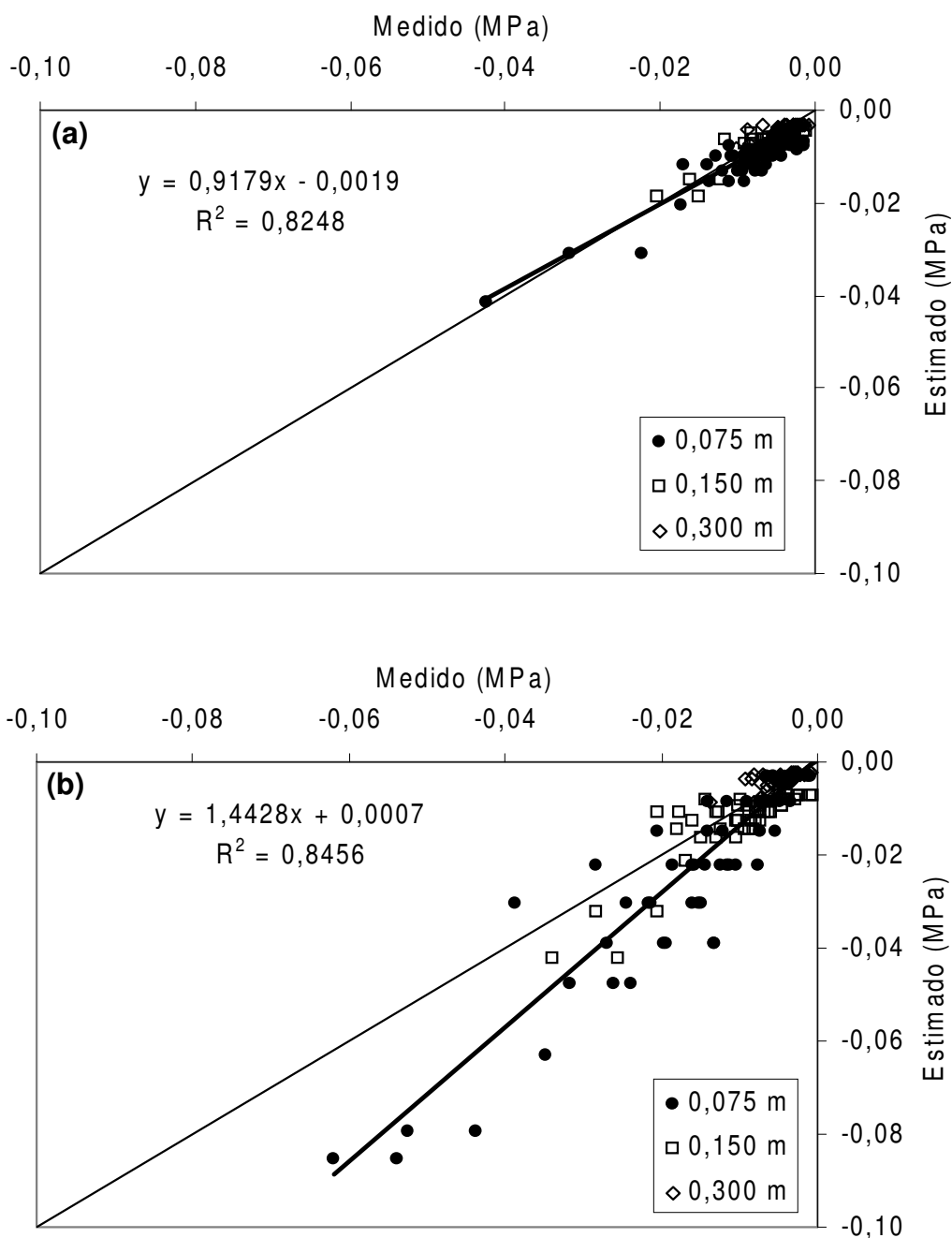


FIGURA 30. Potencial matricial da água no solo em plântio direto (a) e em preparo convencional (PC) (b) em três profundidades (m), medido com tensiômetros e estimado a partir dos modelos da Tabela 5. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

O quadrado médio do erro entre os valores medidos e estimados foi cerca de 10% menor daquele do ajuste do modelo, no caso do PD. Em PC, porém, o mesmo foi mais de 200% superior àquele do ajuste do modelo. De acordo com Neter et al. (1996), Estas são evidências de que os modelos

selecionados em PD têm capacidade preditiva e apresentarão comportamento futuro semelhante dentro do limite que foram ajustados, mas para PC essa afirmação não pode ser feita com total segurança. Por outro lado, para ambos sistemas de manejo a capacidade preditiva dos modelos deve ser testada com ciclos de secagem do solo mais prolongados, em experimentos futuros, devido à discordância entre os índices de avaliação.

4.7.5 Aspectos gerais relacionados à secagem do solo

Neste item, a discussão será centralizada num ponto de grande importância, que é a performance dos modelos ajustados em PD e PC (Tabela 5), no dia de ocorrência da precipitação ou de realização da irrigação, que dá início à contagem do *TSS*. Como pode ser observado para as profundidades de 0,075m (Figura 27) e 0,15m (Figura 28), os modelos que descrevem a secagem do solo indicam a ocorrência de potenciais de pressão no solo em PC, quando o tempo após a precipitação é zero, ou seja, no dia que ocorreu a precipitação ou foi feita a irrigação. Em PD, no tempo zero o solo apresentou Ψ_m . Isto indica maior capacidade de infiltração de água em PD, em relação ao PC.

A presença de potencial de pressão no PC, além de indicar deficiência de drenagem ou, pelo menos, um retardamento da infiltração, mostra maior suscetibilidade à erosão do solo deste tipo de preparo apresenta, principalmente, em áreas com declives.

O retardamento da infiltração da água no solo em PC não foi verificado nas medidas de infiltração realizadas a campo (Figura 10), provavelmente, por que a macroporosidade do solo foi ocupada pelas raízes da aveia em final de ciclo, conforme mencionado anteriormente. No entanto, no momento da realização da irrigação observou-se, visualmente, a formação de poças d'água na superfície do solo em PC. Isso ocorreu mesmo com maior gradiente de Ψ_m , em virtude da menor θ_v que este solo apresentou na camada superficial, em relação àquele em PD (Figura 15).

A presença de potencial de pressão em PC, no dia de ocorrência de precipitação, pode ser explicada, basicamente, por dois fenômenos. O primeiro é a formação de uma camada compactada subsuperficial em PC, que dificulta a infiltração de água. Entretanto, esta camada não foi identificada pelas análises

físicas, como em densidade (Figura 5) e porosidade do solo (Figura 6), provavelmente, devido ao caráter pontual de coleta das amostras. Mas, ela pode ocorrer em solos manejados de forma convencional.

O outro fator que pode ter retardado a infiltração foi o chamado “selamento” superficial, ocasionado pelo impacto da gota de água na superfície do solo descoberto. Este fenômeno obstrui poros importantes para a entrada de água devido à desagregação do solo, o que retarda a infiltração. De qualquer forma, o que deve ser ressaltado é que os modelos que descrevem a secagem do solo conseguiram prever, com exatidão, as observações feitas visualmente no campo, na área em PC, no momento da realização das irrigações. Por isso, e pelos demais indicadores apresentados anteriormente, é esperada sua adequabilidade para os respectivos sistemas de manejo neste tipo de solo, apesar da necessidade de serem testados, em condições semelhantes às aquelas do seu ajuste, considerando o método de medida, uma vez que o mesmo induz grande variabilidade às medidas

4.8 Dinâmica da água no solo: Extração de água pelas plantas

4.8.1 Variação do potencial matricial durante o ciclo do milho

A variação da água armazenada no solo também depende da presença de plantas crescendo sobre a superfície. Cada espécie imprime uma dinâmica distinta, devido às diferenças na área foliar e crescimento radicular, à medida que crescem e interagem com as condições variáveis de demanda evaporativa da atmosfera. Portanto, do início do crescimento de uma cultura até o fechamento do ciclo, a dinâmica da água no solo é constantemente alterada, tanto em PD quanto em PC, em função das interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera.

As medições do Ψ_m que descrevem a interação entre a cultura e os sistemas de manejo foram feitas nos mesmos dias em que foram realizadas na área sem plantas (Figura 22 e 23). Devido à presença da cultura, crescendo e extraíndo água do solo, a escala de tempo foi alterada para GD_{acm} por esta variável estar associada ao crescimento e desenvolvimento da cultura do milho e incorporar, em parte, o efeito da demanda evaporativa da atmosfera. A correspondência entre GD_{acm} e DAE encontra-se no Apêndice 18.

A evolução do Ψ_m nos dois experimentos (2001/02 e 2002/03), em todas as condições de cultivo e profundidades monitoradas, pode ser verificada

nas Figuras 31, 32, 33 e 34. De uma maneira geral, a variação do Ψ_m foi maior daquela verificada na área sem plantas (Figuras 22 e 23), obviamente, devido à presença da cultura que extraiu água ao longo do período de avaliação. Porém, a tendência de evolução do Ψ_m , entre PD e PC, se manteve semelhante àquela da área sem plantas.

Na grande maioria dos dias avaliados, o Ψ_m foi maior no solo em PD (Figuras 31a, 32a, 33a e 34a) do que naquele em PC (Figuras 31b, 32b, 33b e 34b), em consequência da maior armazenagem de água em PD. As diferenças entre os sistemas se intensificaram com a evolução do ciclo da cultura e do TSS, condição provocada, principalmente, pela demanda hídrica da cultura e distribuição do sistema radicular, associada à maior disponibilidade de água no solo em PD, em relação a PC.

As diferenças entre PD e PC foram menores no tratamento com irrigação do que sem irrigação, em consequência do suprimento constante de água, o qual reduziu o efeito dos sistemas de manejo. Entretanto, esta variação também confirma a maior disponibilidade de água às plantas em PD, que foi verificada anteriormente (Figuras 20 e 21). Por outro lado, esses resultados mostram que, numa condição de adequado suprimento hídrico, as diferenças entre PD e PC se reduzem, não havendo superioridade significativa de um em relação ao outro sistema de manejo (Fortin, 1993; Sauer et al., 1996).

No caso da área irrigada as diferenças entre os dois sistemas de manejo ocorreram pelo fato da irrigação ter sido controlada através da variação do Ψ_m em PD, ou seja, o limite de Ψ_m para iniciar a irrigação foi dado pelo valor do mesmo em PD. Isto penalizou o PC, em relação a PD, o que justifica, em parte, as diferenças ocorridas.

Comparando a variação do Ψ_m entre os dois experimentos na condição do milho não irrigado (I0), verificou-se que as quedas no Ψ_m foram maiores no primeiro experimento (2001/02) (Figura 31) do que no segundo (2002/03) (Figura 32), tanto em PD quanto em PC. Como, nos dois experimentos o milho foi semeado, aproximadamente, na mesma época e a diferença em IAF não foi significativa (Figuras 3 e 4), o aumento na velocidade de redução do Ψ_m , pode ser explicado, principalmente, pela diferença das condições meteorológicas entre os dois períodos.

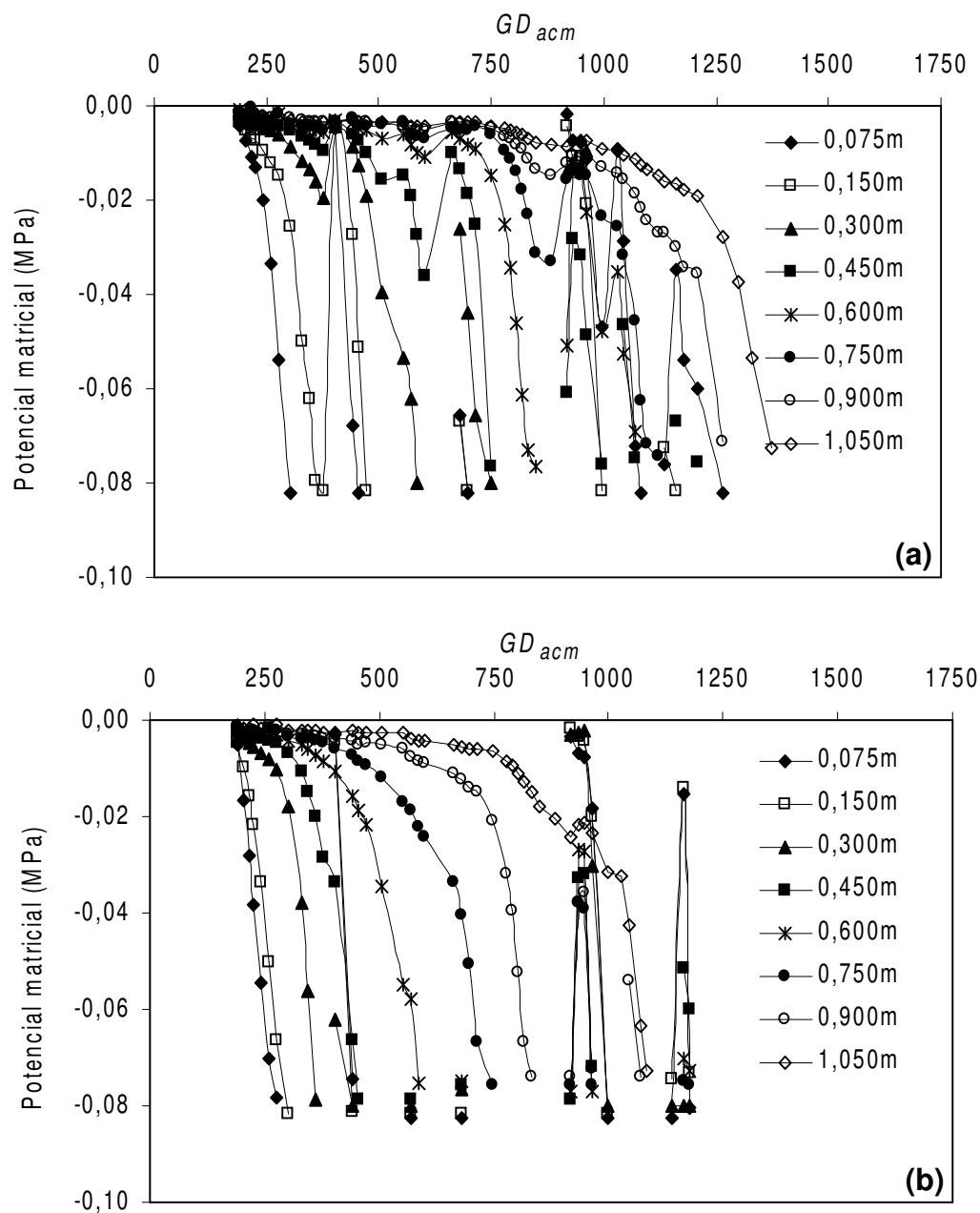


FIGURA 31. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho não irrigado, em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

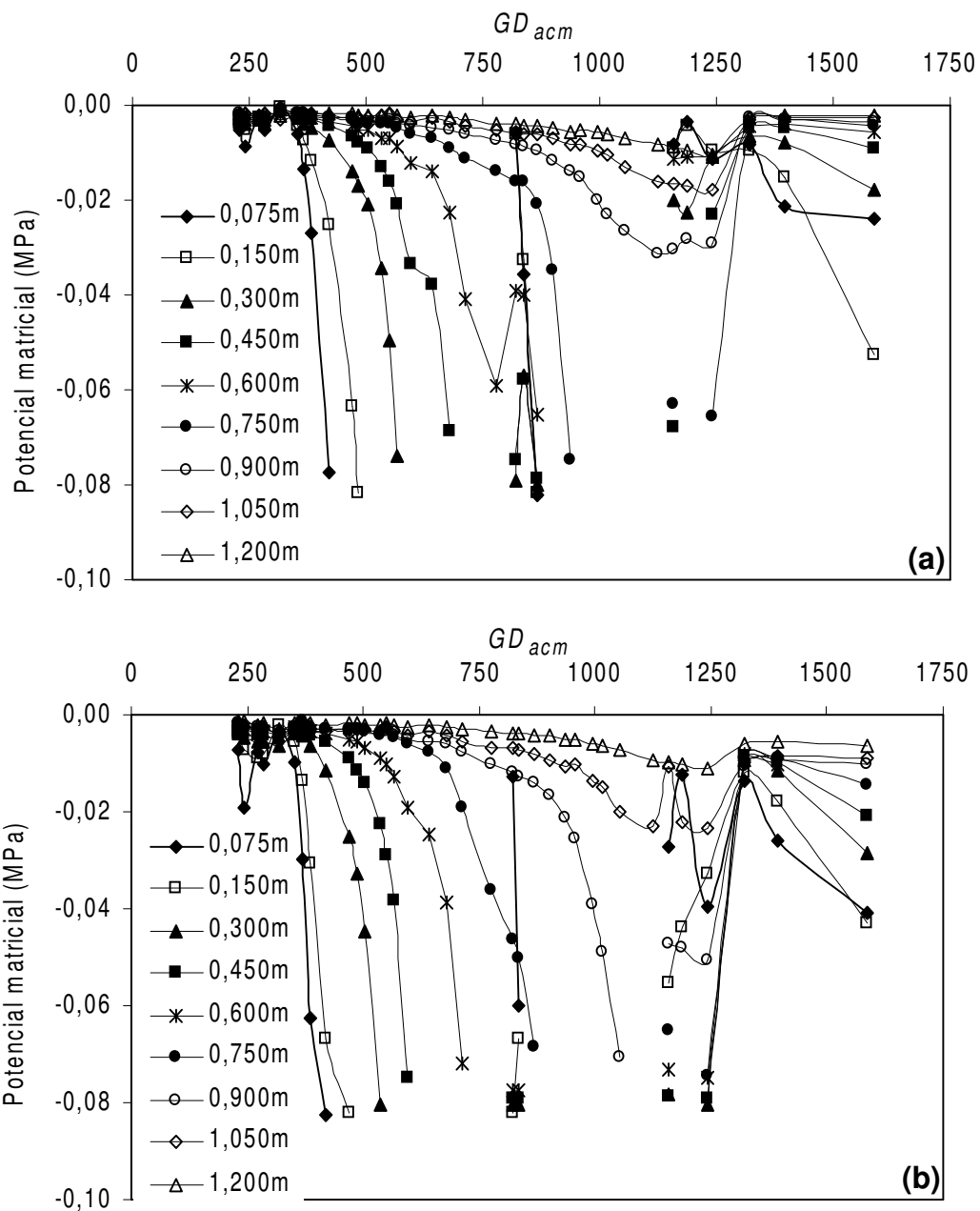


FIGURA 32. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho não irrigado (I0), em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

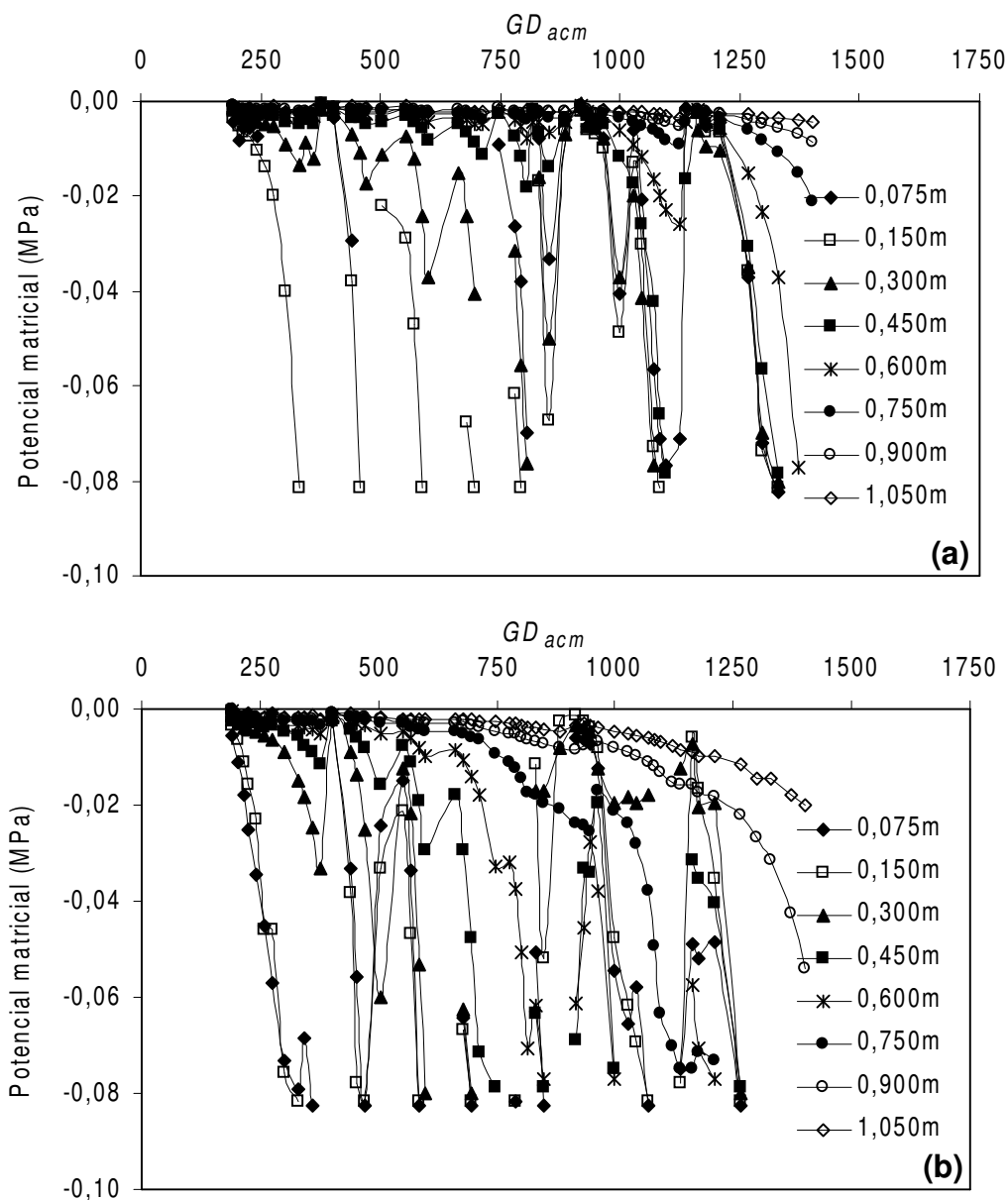


FIGURA 33. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho irrigado (I4), em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

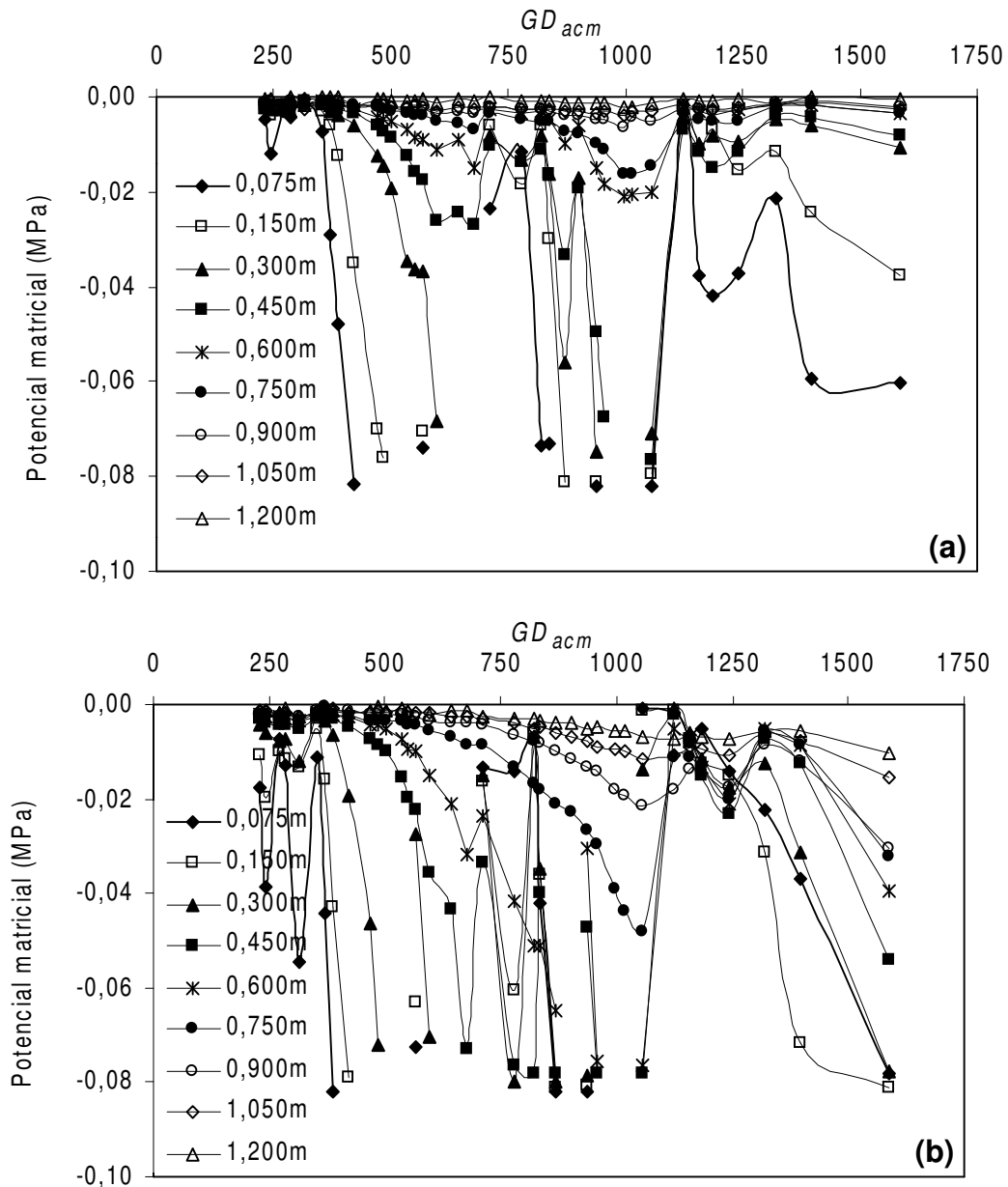


FIGURA 34. Potencial matricial da água do solo sob plantio direto (a) e preparo convencional (b) de milho irrigado (I4), em sete profundidades (m), em função de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

A ETo foi maior no experimento de 2001/02 (Figura 1) e as precipitações foram mais concentradas do que em 2002/03 (Figura 2). Isto explica porque as quedas em Ψ_m foram maiores em 2001/02, na condição não irrigada (Figura 31). Já, na condição irrigada (I4), o suprimento de água interferiu no efeito do sistema, impossibilitando a análise neste sentido.

Outro aspecto interessante a ser observado é a evolução do Ψ_m nas maiores profundidades monitoradas (1,05m e 1,2m) (Figuras 32 e 34). Principalmente no experimento de 2001/02, o Ψ_m na profundidade de 1,05m continuou em queda ao longo do tempo, tanto na condição irrigada quanto na não irrigada (Figuras 32 e 34), mostrando que as precipitações e irrigações não foram suficientes para umedecer o solo até aquelas profundidades. A queda contínua do Ψ_m permite inferir que houve extração de água pelo milho até as profundidades de solo referidas, com maior intensidade em PC (Figuras 32b e 34b).

A movimentação de água nas profundidades maiores não significa, necessariamente, que as raízes atingiram essas camadas de solo. Provavelmente, a variação do Ψ_m , foi conseqüência do movimento ascendente de água, proporcionada por gradientes de Ψ_m e pela elevada condutividade hidráulica nestas profundidades, em função da θ_v do solo também ter sido elevada (Figura 12 e Apêndice 14). A movimentação de água na profundidade de 1,2m também foi verificada no experimento de 2002/03, porém, com menor intensidade do que no experimento de 2001/02. Mesmo assim, a manutenção da tendência é importante para comprovar variações verificadas em 2001/02.

4.8.2 Estudo de casos: Ciclos de extração de água

Apesar das evidências de maior disponibilidade hídrica do solo em PD, quando relacionado a PC (Figuras 31, 32, 33 e 34), faz-se necessário um detalhamento desta variação, ao longo de ciclos específicos de secagem do solo. Tal análise suporta a idéia de que o fator tempo é uma variável mais significativa nos processos em PD do que em PC. Para explorar de forma mais adequada o fator tempo, neste item, as avaliações envolveram, principalmente, resultados da área não irrigada, pois os ciclos de secagem do solo foram mais longos e o efeito dos sistemas de manejo não foi mascarado pela irrigação.

Esta análise foi feita de forma idêntica àquela da área que foi mantida sem plantas. Foram selecionados ciclos de secagem do solo em cada experimento, em diferentes períodos de crescimento e desenvolvimento do milho, para integrar o efeito de distintas condições de disponibilidade de água no solo, condições meteorológicas, de crescimento da área foliar e radicular. Na Tabela 7 são apresentados os períodos em que foi avaliada a extração de água do solo ao longo do tempo, com base na evolução do Ψ_m , e a caracterização dos respectivos estádios do milho.

TABELA 7. Períodos selecionados para avaliação da extração de água do solo pelo milho ao longo do tempo e caracterização da cultura nos dois experimentos realizados. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Período de Avaliação	Média do período		Condição Fenológica
	DAE	GD_{acm} (°C)	
.....Experimento 2001/02.....			
08/12/01 a 19/12/02	20	259	Crescimento vegetativo
23/12/01 a 04/01/02	36	499	Crescimento vegetativo
06/01/02 a 20/01/02	51	728	Pendoamento/espigamento
25/01/02 a 30/01/02	66	940	Enchimento de grãos
.....Experimento 2002/03.....			
26/12/02 a 08/01/03	31	477	Crescimento vegetativo
13/01/03 a 21/01/03	46	711	Crescimento vegetativo
24/01/03 a 06/02/03	60	933	Pendoamento/espigamento
12/02/03 a 28/02/03	80	1269	Enchimento de grãos

DAE = dias após a emergência do milho; GD_{acm} = graus-dia acumulados após a emergência do milho.

A evolução do Ψ_m pode ser verificada nas Figuras 35, 36 e 37. Observa-se que o padrão de extração de água pelo milho foi semelhante entre o solo em PD e em PC, num mesmo estágio da cultura, mas foi diferente entre estádios, principalmente, no enchimento de grãos em relação ao demais.

No início do crescimento vegetativo (Figura 35), houve uma redução gradual do Ψ_m em profundidade, à medida que a água das camadas mais próximas à superfície foi extraída. A redução foi mais acentuada no solo em PC do que naquele em PD, nos dois experimentos. Isto pode ser verificado pela

antecipação da quebra de continuidade da coluna dos tensiômetros no solo em PC, em relação ao PD.

No dia 19 de dezembro de 2001, enquanto o Ψ_m no PD foi próximo a $-0,060\text{MPa}$ a $0,15\text{m}$ de profundidade (Figura 35a), no PC o tensiômetro já havia ultrapassado o limite de funcionamento nesta profundidade. Nesta data, o mesmo valor de Ψ_m medido a $0,15\text{m}$ em PD foi registrado a $0,3\text{m}$ de profundidade em PC, indicando menor disponibilidade de água no sistema de manejo em PC, já que as plantas extraíram água de uma camada mais profunda do solo. O aumento da disponibilidade de água no solo em PD, representado pelos Ψ_m mais elevados, ratifica resultados obtidos nas análises de laboratório (Figuras 20 e 21) e na área sem plantas (Figuras 24, 25 e 26). Ao mesmo tempo, suportam os resultados obtidos por Bianchi (2004), no experimento de 2002/03, que identificou melhor condição hídrica das plantas de milho em PD, em relação aquelas em PC.

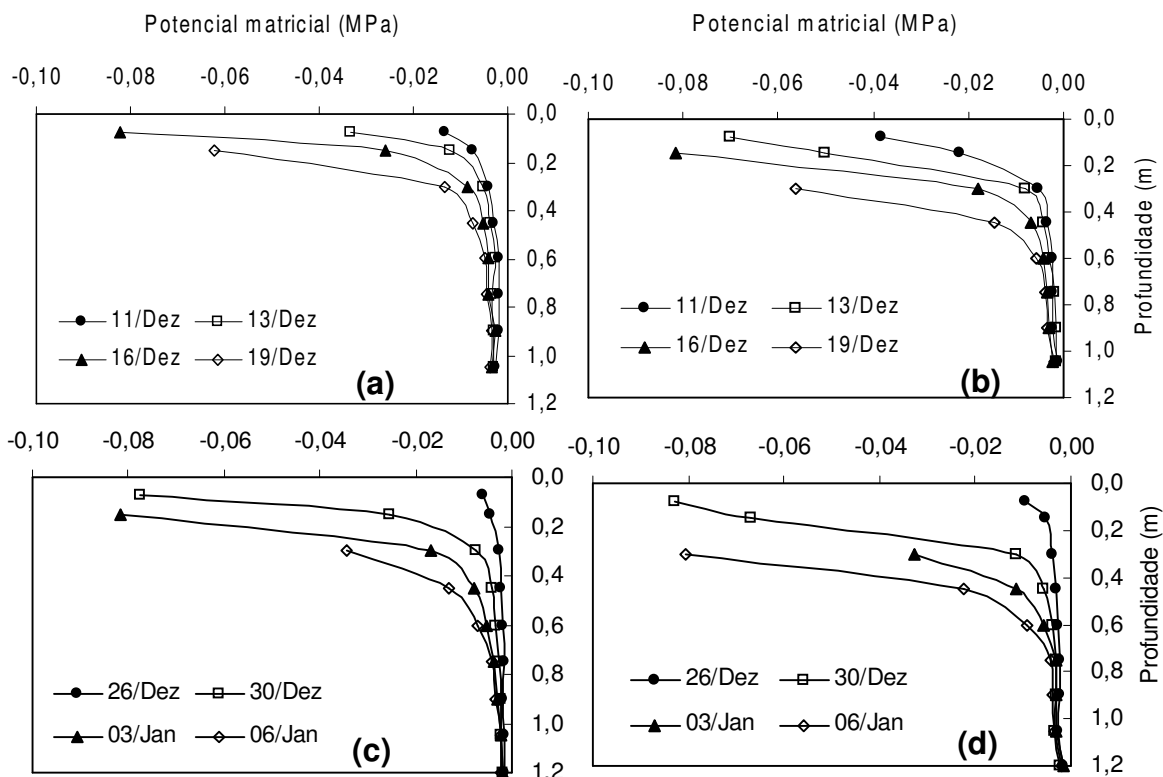


FIGURA 35. Potencial matricial da água do solo em plantio direto [(a) e (c)] e preparo convencional [(b) e (d)] cultivado com milho não irrigado (I0), em diferentes profundidades, durante o crescimento vegetativo no primeiro [(a) e (b)] e segundo [(c) e (d)] experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

As evidências contidas nos resultados apresentados até o momento indicam que a redução mais acentuada do Ψ_m no solo em PC ocorreu, principalmente, em virtude da menor disponibilidade de água armazenada no solo deste sistema de manejo (Figuras 20 e 21). Entretanto, existe outro fator que pode penalizar o solo em PC, no período inicial de crescimento do milho, que é a diferença na evolução da área foliar, em relação às plantas no PD.

Em PC as plantas de milho tendem a apresentar um crescimento mais rápido até o estabelecimento da cultura (30 DAE), por causa da liberação antecipada de nitrogênio proveniente da mineralização da matéria orgânica (Amado, 1997). Por outro lado, em PD grande parte do nitrogênio fica, inicialmente, imobilizado pelos microorganismos, que o utilizam para decomposição dos resíduos deixados na superfície, reduzindo sua disponibilidade para absorção pelas plantas. Assim, o crescimento mais rápido das plantas em PC possibilita maior extração de água do solo que em PD, o que reduz mais intensamente, o Ψ_m . Nos dois experimentos, essa condição não foi detectada no IAF, devido à pequena diferença de população de plantas (Apêndice 3).

No período de pendramento/espigamento as diferenças na extração de água pelo milho entre o solo em PD e PC se intensificaram e apresentaram maior variação entre os experimentos do que durante o crescimento vegetativo, conforme mostra a evolução do Ψ_m (Figura 36). Neste estágio, a frente de extração também avançou mais rapidamente no solo em PC em relação a PD, bem como em relação ao crescimento vegetativo (Figura 35).

No primeiro experimento, o milho extraiu água de forma mais significativa até 0,9m de profundidade no solo em PC, determinando redução do Ψ_m até 1,05m, em consequência da movimentação de água desta camada. No mesmo período, a extração de água do solo em PD ocorreu até a profundidade de 0,6m, sendo esta mais significativa próximo à superfície (0,15m e 0,3m).

No segundo experimento a queda do Ψ_m foi menos significativa no solo em PC, atingindo até 0,75m de profundidade, enquanto no solo em PD a mesma foi mais expressiva até 0,6m de profundidade. A redução da profundidade de extração, em relação a 2001/02, pode ser explicada pelas diferenças nas condições meteorológicas (Figuras 1 e 2), cujas influências serão discutidas mais adiante.

O aumento da profundidade de extração de água do solo por uma cultura tem implicações importantes sobre o processo de crescimento das plantas. Além de requerer maior gasto de energia para o crescimento radicular, a fim de conseguir explorar maior volume de solo, a planta necessita uma redução maior do potencial da água, a fim de absorver a água armazenada nas camadas mais profundas do perfil. Isto penalizou o milho em PC, alterando o estado hídrico das plantas para uma condição menos favorável do que em PD (Bianchi, 2004), o que, provavelmente, influenciou outros processos associados, como a fotossíntese.

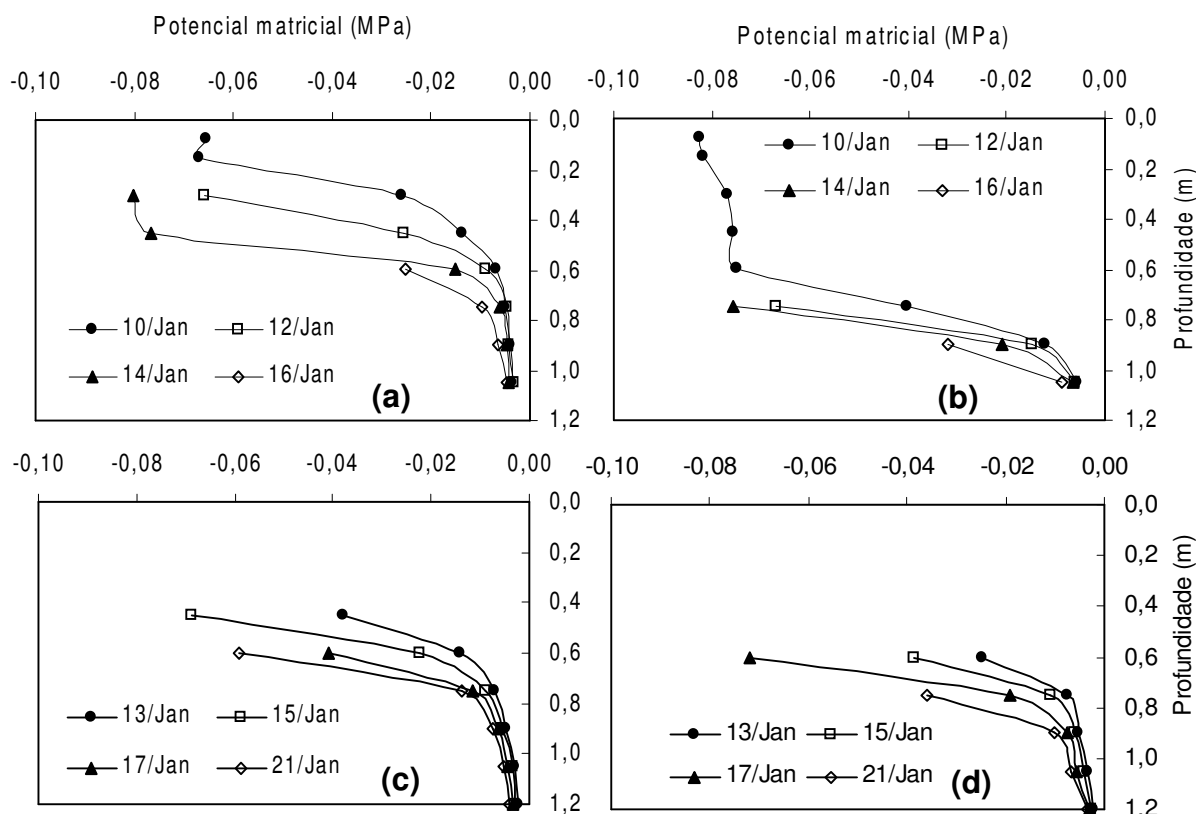


FIGURA 36. Potencial matricial da água do solo em plantio direto [(a) e (c)] e preparo convencional [(b) e (d)] de milho não irrigado (I0), em diferentes profundidades, próximo ao pendoamento/ espigamento do milho, no primeiro [(a) e (b)] e segundo [(c) e (d)] experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

A intensificação nas diferenças entre PD e PC no pendoamento/espigamento, em relação ao crescimento vegetativo, ocorreu devido à menor disponibilidade de água no solo durante o florescimento. Isto foi

conseqüência da diminuição das precipitações (Figuras 1 e 2), mas também da extração de água ocorrida durante o crescimento vegetativo. Assim, as diferenças observadas no pendoamento/espigamento, em parte, refletem uma situação passada, a qual foi ampliada, em relação ao início do ciclo da cultura, pelo crescimento da área foliar. Esses resultados reforçam a necessidade da avaliação integrada do sistema solo-planta-atmosfera, associando-a ao fator tempo, e mostram a importância das avaliações seqüenciais e integradas de variáveis de todo o sistema.

Durante o enchimento de grãos, o padrão de extração de água foi alterado em relação aos estádios anteriores, tanto no solo em PD quanto naquele em PC (Figura 37). Ao contrário do que foi verificado no crescimento vegetativo e no pendoamento/espigamento, o Ψ_m não apresentou tendência de decaimento com o tempo, a partir da superfície do solo.

No primeiro experimento (Figuras 37a e 37b), a redução do Ψ_m no solo em PD foi mais significativa a 0,45m de profundidade, enquanto no PC a queda mais expressiva ocorreu na camada entre 0,3m e 0,9m de profundidade. Próximo à superfície, foi observada a ocorrência de uma camada de solo mais úmida no início dos períodos de avaliação, com o Ψ_m não ultrapassando $-0,02\text{MPa}$, enquanto nas profundidades de máxima extração de água o Ψ_m médio se aproximou de $-0,08\text{MPa}$ (limite de funcionamento do tensiômetro), nos dois sistemas (Figura 37). Isto mostra que a maior extração de água ocorreu em maiores profundidades com manutenção das diferenças entre PD e PC, observadas durante o pendoamento/espigamento.

No segundo experimento essa tendência também prevaleceu (Figuras 37c e 37d), mas houve alteração na camada de máxima extração de água em PC. Enquanto no solo em PD a queda mais significativa do Ψ_m foi detectada a 0,45m de profundidade, em PC ela ocorreu, de forma mais expressiva, na camada de solo de 0,15m a 0,75m. O Ψ_m também atingiu $-0,08\text{MPa}$ na camada de maior extração de água e não superou $-0,02\text{MPa}$ próximo à superfície. A camada de maior extração de água, nos dois experimentos, pode ser considerada uma aproximação da concentração do sistema radicular do milho, que, portanto, foi diferente entre o solo em PD e em PC.

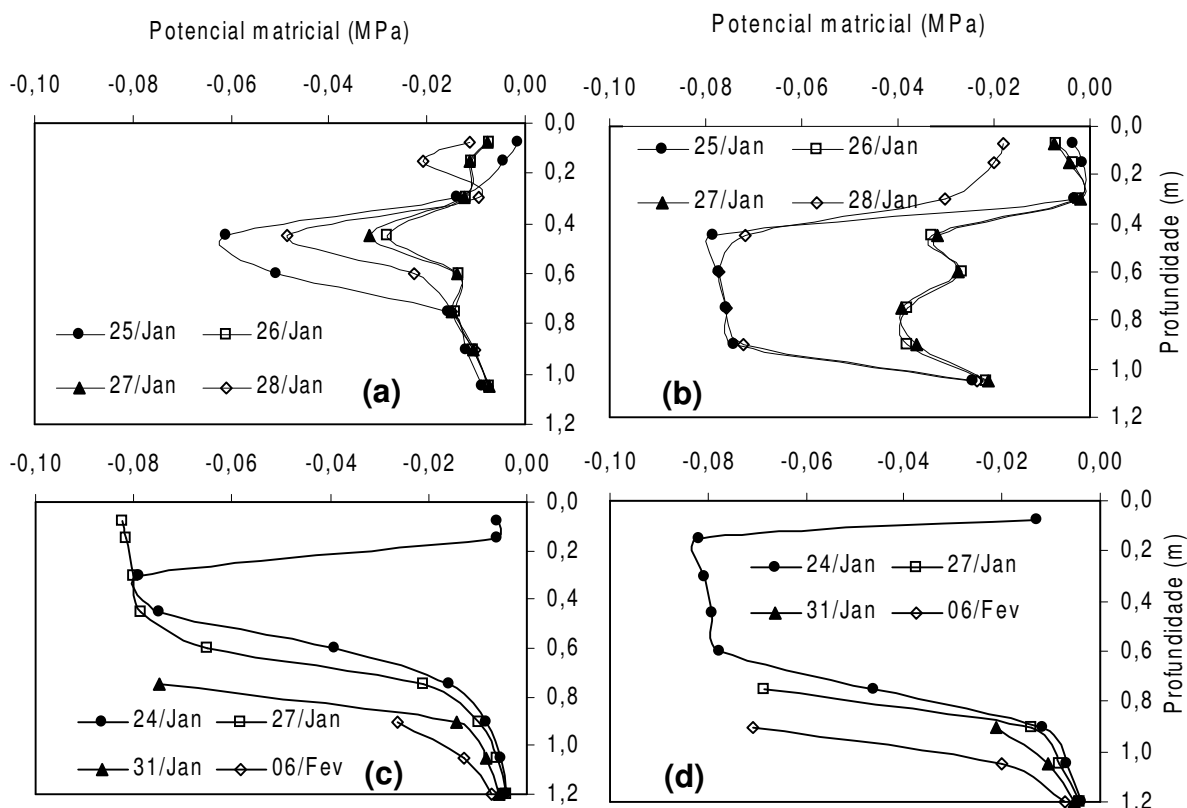


FIGURA 37. Potencial matricial da água do solo em plantio direto [(a) e (c)] e preparo convencional [(b) e (d)], cultivado com milho não irrigado (I0), em diferentes profundidades, no pendoamento/espigamento do milho, durante o primeiro [(a) e (b)] e segundo [(c) e (d)] experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

A modificação do padrão de extração de água pelo milho, após o pendoamento, se deve ao fato de que o sistema radicular estabiliza o crescimento próximo a este estágio, em função do aumento da força de dreno promovida pelos grãos. Ao mesmo tempo, muda a eficiência de absorção de água ao longo da arquitetura radicular, a qual é, gradativamente, deslocada da base da planta, rente à superfície do solo, para camadas mais profundas, em decorrência das raízes serem mais jovens e, portanto, mais eficientes (Basso et al., 1994). Já a diferença de concentração radicular do milho entre os sistemas PD e PC, pode ser atribuída às condições nutricionais mais favoráveis próximo à superfície do solo em PD, por causa do maior teor de matéria orgânica e da própria adubação

química na semeadura, que é realizada na camada superficial do solo (Muzilli, 1983; Bouder et al., 1985; Mello Ivo & Mielniczuk, 1999).

O efeito do sistema radicular na extração de água pode ser melhor visualizado analisando a evolução diária do Ψ_m , na Figura 37. Observa-se que, do dia 25 para o dia 26 de janeiro (experimento 2001/02), ocorreu um aumento significativo do Ψ_m na profundidade de máxima extração de água, em decorrência da infiltração da água precipitada entre 21 e 24 de janeiro (63,6mm). Após manter-se praticamente constante, em 27 de janeiro, em consequência da baixa R_g neste dia ($8,04\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$), o Ψ_m voltou a diminuir, praticamente, até os mesmos níveis de 25 de janeiro. Essa redução em apenas um dia foi ocasionada, exclusivamente, pela absorção radicular de água, devido à concentração de raízes nesta camada, já que o Ψ_m das camadas inferiores não aumentou. Assim, justifica-se, em parte, a concentração do sistema radicular nestas camadas e, conseqüentemente, a maior extração de água por decorrência deste fato.

Outro aspecto interessante, relacionado à ação do sistema radicular, também pode ser visualizado na Figura 37. Analisando a variação das curvas de extração de água, observa-se um deslocamento das mesmas na camada mais próxima à superfície (0 a 0,3m), entre os dias 25 e 28 de janeiro. Isto foi verificado tanto em PD quanto em PC, mas com maior intensidade em PC. A extração de água nesta camada pode ser atribuída à ação das raízes adventícias, que se formam na base do colmo do milho e penetraram no solo para dar maior sustentação às plantas e complementar a absorção de água das demais raízes.

4.8.3 Considerações gerais sobre a extração de água do solo pelas plantas

Este item aborda alguns aspectos referentes à extração de água, nos diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento da cultura do milho, e, também, reforça alguns pontos abordados anteriormente, quanto às diferenças entre sistemas de manejo e experimentos realizados.

Em todos os períodos avaliados foi observado que a quebra da continuidade da coluna dos tensiômetros, momento em que o tensiômetro deve ser desconectado, sempre ocorreu antes no solo em PC do que naquele em PD. Conforme já relatado, isso corresponde aos resultados obtidos em laboratório e a

campo na área sem plantas, que também mostraram superioridade na armazenagem de água do solo em PD, inclusive em menor estado energético, em relação a PC (Figuras 20 e 21). No entanto, quando a planta está presente no sistema, a resposta da mesma não é exclusiva à condição hídrica do solo, mas sim, integradora de todos os fatores do sistema contínuo solo-planta-atmosfera que influenciam a extração de água. Por isso, a presença e o crescimento das plantas ampliaram as diferenças entre experimentos e estádios da cultura do milho, através do incremento de outros fatores que influenciam na extração de água do solo.

Neste sentido, as diferenças na extração de água entre o milho cultivado em PD e aquele em PC poderiam ter ocorrido em função de distintos *IAF*. No entanto, isto não foi observado em ambos experimentos, pois, não houve variação significativa entre o *IAF* do milho em PD e PC (Figuras 3 e 4) que pudesse influenciar, significativamente, as diferenças de extração de água do solo.

Outro fator que pode ter influenciado o avanço da frente de extração de água do solo pelo milho, além das diferenças na disponibilidade e energia de retenção de água no solo (Figuras 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21), pode ser as diferenças na interceptação de *RFA*. Resultados paralelos, apresentados por Bergamaschi et al. (2004), obtidos nos mesmos experimentos mostram que o milho cultivado no solo em PC no experimento de 2002/03, apresentou cerca de 32% mais *RFA* interceptada até o máximo *IAF*, para um mesmo valor de *IAF*. Esta mesma tendência foi verificada também no experimento de 2001/02 na cultura não irrigada (Apêndice 19), sendo a interceptação de *RFA* cerca de 13% maior no milho em PC, comparado ao milho cultivado no PD. Segundo Bergamaschi et al. (2004), o aumento na interceptação de *RFA* pelo milho no PC, para um mesmo *IAF* que no PD, se deve a uma provável alteração no ângulo de inclinação foliar do milho cultivado no solo em PC.

O aumento na interceptação de radiação solar significa aumento na quantidade de energia absorvida pelas folhas, que deve ser gasta nos vários processos que envolvem o crescimento e desenvolvimento do milho, sobretudo na evapotranspiração. O aumento na evapotranspiração da cultura, em consequência da maior interceptação de *RFA*, exige maior extração de água do solo. Desta forma, o milho em PC esgotou mais rapidamente as reservas de

água, em relação ao PD, somando-se ao fato de que o solo em PC apresentou menor armazenagem de água (Figuras 20 e 21). Com isso, a extração de água do solo em PC foi acelerada, atingindo mais rapidamente camadas mais profundas no perfil e/ou Ψ_m mais negativos.

O aumento na transpiração do milho cultivado em PC, em relação àquele em PD, foi identificado por Dalmago et al. (2003c) no experimento de 2002/03. Segundo os autores, o milho cultivado em PC apresentou transpiração mais elevada do que em PD, em todos os períodos avaliados durante o crescimento vegetativo, justamente no subperíodo de maior interceptação de *RFA* pela cultura em PC. Já, durante o pendoamento/espigamento e enchimento de grãos, quando a interceptação de *RFA* foi equivalente entre o milho cultivado em PD e PC, a transpiração passou a ser maior nas plantas cultivadas em PD, pois o solo apresentava maior armazenagem de água (Dalmago et al., 2003c). Assim, fica evidente que o avanço mais rápido da frente de extração de água do solo pelo milho cultivado em PC se deve, também, ao efeito da maior interceptação de *RFA*, combinada com a menor armazenagem de água no mesmo na camada superficial e maior energia de retenção da mesma.

Outra consideração a respeito dos resultados apresentados nas Figuras 35, 36 e 37 é a variação interanual da extração de água, ocorrida, principalmente no pendoamento/espigamento e durante o enchimento de grãos. Analisando detalhadamente, é possível identificar que há um padrão de extração de água diferenciado de um ano para outro. Esta mudança se deve, em parte, também a pequenas diferenças de ciclo, mas sobretudo, pode ser atribuída às distintas condições meteorológicas verificadas entre os dois experimentos, principalmente, à distribuição da precipitação pluvial.

No experimento de 2001/02, as precipitações foram mais distribuídas (Figura 1), o que favoreceu o aprofundamento do sistema radicular do milho, em relação à condição do experimento de 2002/03 (Figura 2), em que grande quantidade de precipitação esteve concentrada no início do ciclo. Na falta de θ_v no solo próximo à superfície em 2001/02, o milho aprofundou o sistema radicular para buscar água em camadas mais profundas no perfil, em ambos sistemas de manejo, ao contrário do que foi verificado em 2002/03, em que não houve essa necessidade. O maior aprofundamento do sistema radicular explica o

deslocamento do padrão de extração de água de um experimento para outro, durante o período de enchimento de grãos, principalmente em PC, (Figura 37).

No experimento de 2002/03 houve um rebaixamento de todo o perfil de extração de água durante o pendoamento/espigamento (Figuras 36c e 36d), nos dois sistemas de manejo, reduzindo as diferenças entre PD e PC, em relação a 2001/02 (Figuras 36a e 36b). Esta variação, em parte, foi provocada pelo crescimento distinto do sistema radicular, mencionado anteriormente. Porém, certamente, foi ampliada pelo período de alta demanda evaporativa da atmosfera que se iniciou um pouco antes desse estágio e se prolongou após (Figura 2). As menores diferenças na extração de água entre o milho em PD e em PC, em 2002/03, ajudam a entender a afirmação feita por Dalmago et al. (2003b) de que, em períodos prolongados de alta demanda evaporativa da atmosfera e baixas precipitações, é pequeno o efeito da manutenção da palha sobre o solo em PD.

Embora tenha havido diferenças de caráter pontual entre os dois anos, em geral, houve muito mais semelhanças no avanço da frente de extração de água de um experimento para outro é evidente. Isto mostra que a metodologia adotada foi eficiente na descrição do padrão de extração de água pelo milho, integrando a variabilidade espacial do solo e as variações na demanda da cultura. Ao mesmo tempo, tais evidências conferem confiabilidade e segurança às afirmações feitas, como, por exemplo, de que o PD proporcionar uma melhor condição hídrica às plantas de milho, reduzindo o déficit hídrico (Bianchi, 2004).

As evidências observadas no milho não irrigado também foram verificadas na condição de cultivo irrigado. Neste caso, as diferenças na extração de água pelo milho, entre PD e PC, foram menores, devido ao contínuo suprimento hídrico. Novamente, ratifica-se a afirmação feita de que, em condições extremas, os sistemas se diferenciam muito pouco (Dalmago et al., 2003b). O padrão de extração de água nos mesmos períodos analisados acima (Figuras 35, 36 e 37), para a cultura irrigada, pode ser verificado nos Apêndices 20 e 21.

4.8.4 Estimativa da extração de água pelo milho

A extração de água é um processo que resulta da interação de diversos fatores do sistema solo-planta-atmosfera. Por isso, separar a contribuição de cada componente do conjunto é muito difícil, pois, além de atuarem ao mesmo tempo, são interdependentes em maior ou menor grau, de

acordo com a escala de variação de um ou de outro fator (Ritchie, 1981). Entretanto, o estudo de alguns fatores em separado pode ser o ponto de partida para a concepção do sistema integrado e dinâmico ao longo do tempo.

No solo, a disponibilidade e a energia de retenção da água limitam a maior parte da extração de água pelas plantas. O volume de água disponível pode ser ampliado ou reduzido de acordo com as condições oferecidas para o crescimento radicular, como disponibilidade de oxigênio (Van Lier, 2001) e resistência do solo à penetração das raízes (Nesmith, 1987). Tanto a disponibilidade de oxigênio quanto a resistência do solo à penetração radicular dependem da θ_v do solo, que apresenta variação ao longo do tempo (Boone et al., 1987). As variações da aeração, resistência à penetração e θ_v do solo, podem ser integradas num conceito de intervalo hídrico ótimo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998b), o qual é variável com o tempo.

A planta determina a velocidade de extração de água do solo, a qual também é variável com o tempo, função do crescimento da área foliar e da expansão do sistema radicular. O aumento da área foliar permite maior interceptação de radiação (Bergamaschi et al., 2004), elevando a demanda de água pela cultura e, por conseguinte, a extração de água do solo. Já o crescimento radicular contribui no avanço da frente de extração, à medida que aumenta o volume de solo explorado e desloca a maior eficiência de absorção ao longo da arquitetura radicular (Basso et al., 1994), com o avanço do estresse.

O controle da taxa de extração é feito pela demanda evaporativa da atmosfera, que é função das condições meteorológicas, as quais apresentam grande variabilidade espaço-temporal. Em altas demandas atmosféricas a retirada de água é mais elevada do que em baixas, mas nestas, a planta consegue extrair água retida em Ψ_m menores do que em elevadas demandas, conforme foi demonstrado por Denmead & Shaw (1962). A resposta integradora deste processo é, portanto, resultado da interação dos efeitos de cada parte do sistema solo-planta-atmosfera no tempo.

4.8.4.1 Efeito dos ciclos de secagem do solo

Uma tentativa para descrever o processo de extração de água foi feita para as diferentes camadas do solo em PD e PC. Na análise foram considerados

dois subperíodos do ciclo da cultura do milho, sendo o primeiro no início do crescimento vegetativo e o segundo no final do crescimento vegetativo até o pendoamento/espigamento. No segundo período a disponibilidade de dados foi menor devido ao rápido rompimento da coluna de mercúrio dos tensiômetros, em consequência da extração mais rápida de água do solo.

Na Tabela 8 são apresentadas as principais características relacionadas à cultura do milho e condições meteorológicas, nos períodos em que foram ajustados os modelos apresentados na Tabela 9. As variáveis apresentadas referem-se ao início dos respectivos ciclos de secagem do solo de 2001/02 e 2002/03.

TABELA 8. Ciclos de extração de água do solo, com a respectiva duração, índice de área foliar do milho (*IAF*), graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}), evapotranspiração de referência média (*ETo*) e precipitação imediatamente anterior ao início da secagem do solo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Ciclo de Secagem	Data	Nº dias	GD_{acm} (°C)	<i>IAF</i> ($m^2 m^{-2}$)	<i>ETo</i> (mm dia ⁻¹)	Precipitação (mm)
1º	08/12/01 a 20/12/01	11	192	0,3	4,2	29
2º	23/12/02 a 21/01/03	28	317	1,0	4,8	37

Na Tabela 9 são apresentados os modelos que melhor se ajustaram aos dados de Ψ_m medidos, a campo, para cada profundidade do solo em PD e PC, nos experimentos de 2001/02 e 2002/03. Nas duas profundidades mais próximas à superfície (0,075m e 0,15m), em ambos sistemas de manejo de solo e experimentos, o modelo sigmóide foi o que melhor se ajustou à relação *TSS* x Ψ_m , apresentando elevado coeficiente de determinação. Nas demais profundidades, independentemente do sistema de manejo e experimento, o modelo exponencial foi o mais adequado para explicar a redução do Ψ_m com a evolução do *TSS*. Também para este modelo os coeficientes de determinação foram elevados e significativos, conforme pode ser observado na Tabela 9.

A mudança no tipo de modelo que descreve a evolução do Ψ_m em profundidade se deve, principalmente, às distintas condições de secagem do solo que ocorreram entre as profundidades. A semelhança com os modelos que melhor descreveram a secagem do solo na área sem plantas (Tabela 5) é um

indicador da adequabilidade dos respectivos modelos e da representatividade das medições de Ψm feitas a campo com tensiômetros, já que as mesmas foram realizadas em locais distintos dentro da área experimental. Ao mesmo tempo, a concordância de resultados entre a área com plantas e aquela sem plantas, no aspecto de secagem do solo, ratifica a hipótese levantada anteriormente, de que o modelo que melhor explica a retirada de água é o sigmoidal, quando o TSS for prolongado ou a secagem for intensa.

TABELA 9. Modelos de estimativa da evolução do potencial matricial da água no solo (Ψm , MPa) em plantio direto e preparo convencional em diferentes profundidades (z), em função do tempo de secagem do solo (TSS , dias), com respectivos parâmetros ajustados e coeficientes de determinação ($R^2_{ajs.}$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

z (m)	Modelo	Experimento 2001/02		Experimento 2002/03	
		Parâmetros	$R^2_{ajs.}$	Parâmetros	$R^2_{ajs.}$
.....Plantio direto.....					
0,075	$\Psi m = \Psi m_o + \frac{a}{1 + e^{-\frac{TSS - TSS_o}{b}}}$	$a = 0,1252$ $b = -2,2643^{ns}$ $TSS_o = 9,5620$ $\Psi m_o = -0,1252$	0,99	$a = 0,1015$ $b = -1,0882$ $TSS_o = 6,4998$ $\Psi m_o = -0,1004$	0,93
0,15	$\Psi m = \Psi m_o + \frac{a}{1 + e^{-\frac{TSS - TSS_o}{b}}}$	$a = 0,2398^{ns}$ $b = -2,7794$ $TSS_o = 17,1248$ $\Psi m_o = -0,2436^{ns}$	0,99	$a = 0,1015$ $b = -1,8705$ $TSS_o = 9,6246$ $\Psi m_o = -0,1007$	0,99
0,3	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = -0,0020$ $b = 0,1358$	0,99	$a = -0,0009$ $b = 0,2435$	0,99
0,45	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = 0,0019$ $b = 0,0936$	0,97	$a = -0,0009$ $b = 0,1801$	0,99
0,6	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = 0,0015$ $b = 0,0799$	0,77	$a = -0,0010$ $b = 0,1308$	0,95
0,75	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	-	-	$a = -0,0012$ $b = 0,0840$	0,97
0,9	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	-	-	$a = -0,0012$ $b = 0,0621$	0,86

Continuação Tabela 9...

.....Preparo convencional.....					
0,075	$\Psi m = \Psi m_o + \frac{a}{1 + e^{-\frac{TSS - TSS_o}{b}}}$	$a = 0,0892$ $b = -1,5043^{ns}$ $TSS_o = 4,9614$ $\Psi m_o = -0,0850$	0,99	$a = 0,0799$ $b = -0,4720^{ns}$ $TSS_o = 5,1495$ $\Psi m_o = -0,0835$	0,93
0,15	$\Psi m = \Psi m_o + \frac{a}{1 + e^{-\frac{TSS - TSS_o}{b}}}$	$a = 0,0936$ $b = -1,9434$ $TSS_o = 6,8042$ $\Psi m_o = -0,0910$	0,99	$a = 0,0743$ $b = -0,6609$ $TSS_o = 6,2210$ $\Psi m_o = -0,0794$	0,96
0,3	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = -0,0005$ $b = 0,3316$	0,99	$a = -0,0011$ $b = 0,2883$	0,99
0,45	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = -0,0010$ $b = 0,1945$	0,96	$a = -0,0009$ $b = 0,1801$	0,99
0,6	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = -0,0015$ $b = 0,0991$	0,93	$a = -0,0010$ $b = 0,1409$	0,90
0,75	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	$a = -0,0015$ $b = 0,0654$	0,63	$a = -0,0006$ $b = 0,1329$	0,92
0,75	$\Psi m = -ae^{bTSS}$	-	-	$a = -0,0011$ $b = 0,0734$	0,90

R^2_{ajis} = coeficiente de determinação ajustado ao número de observações e parâmetros do modelo; ns = não significativo a 5% de probabilidade de erro; TSS_o e Ψm_o = coeficientes relacionados ao TSS e Ψm , respectivamente.

A comparação da evolução do Ψm com a secagem do solo em PD e PC, nos dois experimentos, para as três primeiras profundidades de solo (0,075m, 0,15m e 0,3m), pode ser observada nas Figuras 38, 39 e 40, respectivamente.

Para as profundidades de 0,075m (Figura 38) e 0,15m (Figura 39), o modelo sigmóide descreveu, inicialmente, uma pequena redução do Ψm logo após a precipitação, ou seja, no início da contagem do TSS . Com o avanço do TSS ocorreu uma queda mais acentuada do Ψm , com a curva estabilizando-se, posteriormente, próximo a um valor crítico de Ψm . Este valor de Ψm crítico foi diferente para cada sistema de manejo e profundidade de solo avaliada (0,075m ou 0,15m) e entre os dois experimentos, no caso do PD.

Nas Figuras 38 e 39 observa-se que, embora o Ψm tenha sido descrito pelo mesmo modelo, houve diferença significativa na evolução do mesmo entre o solo sob PD e aquele em PC, para uma mesma profundidade (0,075m e 0,15m), e

entre experimentos para um mesmo sistema de manejo e profundidade. Nas profundidades de 0,075m e 0,15m e nos dois experimentos, a curva que explicou a queda do Ψ_m foi deslocada no tempo no solo em PD, em relação a PC, retardando a ocorrência de um mesmo valor de Ψ_m . A diferença de tempo para que um mesmo Ψ_m fosse atingido no solo de ambos sistemas de manejo, em um dado experimento (2001/02 ou 2002/03) pode ser atribuída, principalmente, à maior capacidade de armazenagem e disponibilidade de água no solo sob PD, para as duas profundidades mais próximas à superfície (Figuras 20 e 21).

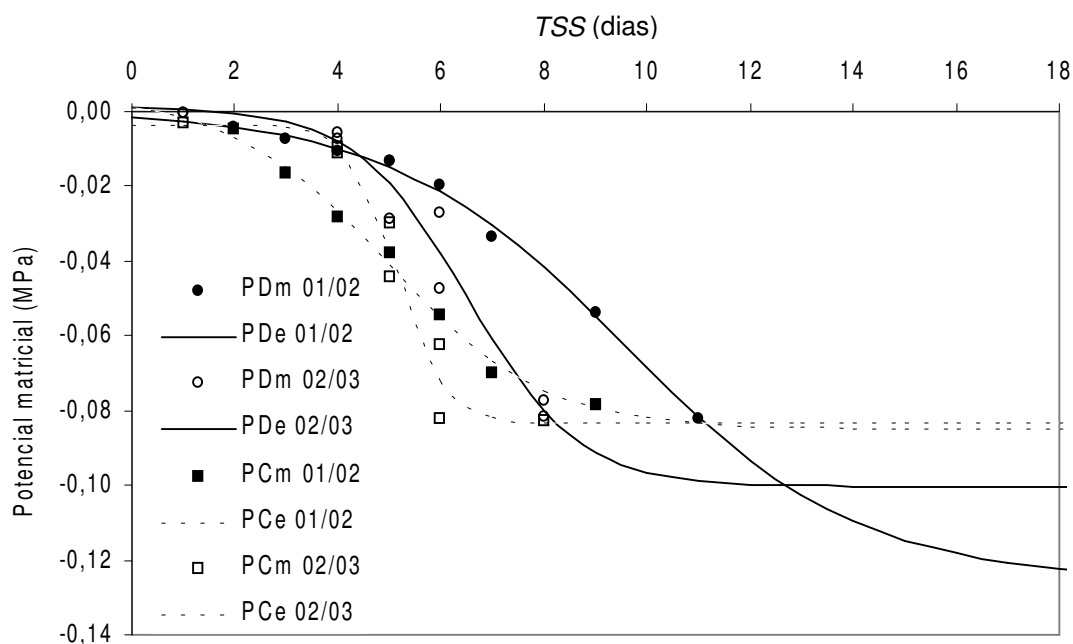


FIGURA 38. Potencial matricial da água no solo medido em plantio direto (PDm) e preparo convencional (PCm) cultivado com milho e valores estimados em função do tempo de secagem (*TSS*) (PDe e PCe) para a profundidade de 0,075m, no primeiro (01/02) e segundo (02/03) experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

No solo em PD nas profundidades mais superficiais (Figuras 38 e 39), o modelo estimou Ψ_m mais elevado no experimento de 2002/03 em relação àquele de 2001/02, até quatro dias após o início da secagem do solo. A diferença foi pequena em ambas profundidades, mas mostra que esses resultados ocorreram por causa do maior volume de precipitação ocorrida antes do início do

ciclo de secagem do solo (Tabela 8), comparando com o experimento de 2001/02. Isto é verdadeiro na medida em que o IAF inicial do período de medições e a condição média de demanda hídrica atmosférica (ET_o) foram mais elevados no experimento de 2002/03 (Tabela 8), em que foram verificados os Ψ_m mais altos. Considerando apenas os quatro dias a partir do início da secagem do solo, o total de ET_o foi de 12,2mm em 2001/02 e 15,4mm em 2002/03.

Comparando os dois experimentos no solo em PD após o quarto dia de secagem do solo, verifica-se uma queda mais acentuada do Ψ_m em 2002/03 em relação 2001/02, tanto na profundidade de 0,075m (Figura 31) quanto naquela de 0,15m (Figura 32). Em virtude disso, quando a água deixou de ser absorvida na respectiva camada para ser extraída de uma camada de solo imediatamente inferior, o Ψ_m crítico no solo em PD foi mais elevado em 2002/03, comparado à 2001/02.

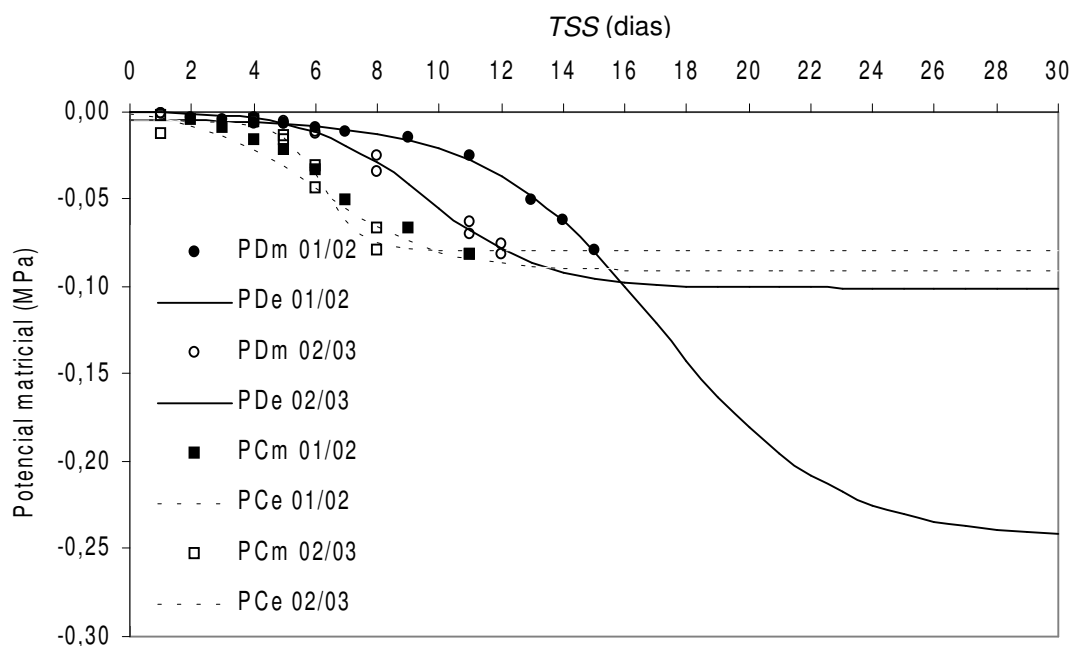


FIGURA 39. Potencial matricial da água no solo medido em plantio direto (PDm) e preparo convencional (PCm) cultivado com milho e valores estimados em função do tempo de secagem (TSS) (PDe) e (PCe) para a profundidade de 0,15m, no primeiro (01/02) e segundo (02/03) experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Na profundidade de 0,075m (Figura 38) o Ψ_m crítico em 2001/02 foi de $-0,124\text{MPa}$ e em 2002/03 foi de $-0,1\text{MPa}$, ou seja, cerca de 20 % mais elevado. Na profundidade de 0,15m (Figura 39) a diferença no Ψ_m crítico entre os dois experimentos foi maior do que na profundidade de 0,075m, atingindo cerca de 60%. O valor do respectivo Ψ_m em 2002/03 se manteve em $-0,1\text{MPa}$, enquanto em 2001/02 atingiu $-0,243\text{MPa}$. Os Ψ_m críticos foram obtidos pela extrapolação dos modelos ajustados; portanto, devem ser assumidos como aproximações daquilo que ocorre a campo, uma vez que outros fatores podem induzir a uma variabilidade significativa nestes valores.

A mudança na evolução do Ψ_m no solo em PD com o tempo, após o quatro dia do início da secagem do solo, pode ser explicada pela diferença de IAF do milho entre os dois experimentos (Tabela 8). O período de avaliação em 2002/03 ocorreu num estágio mais avançado do ciclo do milho, conforme o maior número de GD_{acm} . Com o aumento da área foliar, aumentou a demanda hídrica do milho, a qual exigiu maior extração de água do solo, alterando a queda do Ψ_m .

Além da diferença no IAF , outros fatores também podem ter induzido a uma variabilidade interanual de extração de água do solo pelo milho, como a demanda evaporativa da atmosfera e o crescimento radicular. No caso da demanda evaporativa, embora a mesma tenha sido mais elevada em 2002/03 (Figura 2), a diferença não foi suficiente para explicar a variabilidade de extração de água entre os dois experimentos. No período, a ET_o , que caracteriza a demanda evaporativa, foi de 27,2mm e 28,3mm para o experimento de 2001/02 e 2002/03, respectivamente, entre o quarto e o décimo dia após o início TSS . Já o crescimento radicular, este sim, pode ter induzido, em parte, na queda mais acentuada do Ψ_m no experimento de 2002/03 (Figura 2), devido às precipitações mais concentradas no início do ciclo, em relação a 2001/02 (Figura 1). A plena disponibilidade de água no início do ciclo do milho predispôs as plantas a manter raízes mais concentradas próximo à superfície, condição que é somada à maior disponibilidade de nutrientes na camada mais superficial do solo em PD (Muzilli, 1983; Falleiro et al., 2003). Da emergência até o início dos respectivos ciclos de secagem do solo (Tabela 8) a precipitação foi de 126mm no experimento de 2001/02 e de 224mm no experimento de 2002/03.

Apesar da antecipação na queda dos Ψm determinada pelos modelos, a variabilidade interanual também foi observada, no solo em PC nas duas profundidades (0,075m e 0,15m). Embora menos evidente, o Ψm também foi mais elevado no experimento de 2002/03, na comparação com 2001/02, até o quinto dia após o início de secagem do solo (Figuras 38 e 39). Após o quinto dia de secagem a queda do Ψm foi mais rápida no ano de 2002/03, em relação à 2001/02, da mesma forma que no solo em PD. Também neste caso, a diferença interanual foi provocada pela condição de maior precipitação e/ou mais concentrada e pela diferença no *IAF* do milho entre os ciclos de secagem.

Ao contrário do que foi verificado no solo em PD, praticamente, não houve diferença entre os Ψm críticos nos dois experimentos e para as duas profundidades mais próximas à superfície (0,075m e 0,15m) no solo em PC. Para a condição de PC, o valor médio de Ψm crítico foi de $-0,085\text{MPa}$, valor semelhante ao Ψm de rompimento da coluna dos tensiômetros e muito próximo daquele verificado na profundidade de 0,075m na área sem plantas, que foi de $-0,096\text{MPa}$. Isto indica que, após o tensiômetro deixar de funcionar em uma dada profundidade de solo, o milho extraiu água da camada subsequente numa velocidade maior, em relação ao solo sob PD, cujo Ψm crítico foi menor.

Apesar da variabilidade das condições meteorológicas e do *IAF* entre os experimentos, ou seja, da demanda hídrica da cultura, bem como pelo fato do Ψm crítico ter sido verificado em diferentes profundidades, inclusive na área sem plantas, o Ψm crítico de $-0,085\text{MPa}$ pode ser considerado para outras profundidades, neste tipo de solo, bem como para condições variadas de demanda hídrica da cultura em PC. Para o milho em PD a generalização não é possível, devido à variabilidade do Ψm crítico ($-0,1\text{MPa}$ a $-0,243\text{MPa}$) entre experimentos e camadas de solo, em consequência das distintas condições de armazenagem de água no solo e de efeito da demanda da cultura.

A variabilidade do Ψm crítico no PD, comparada ao valor único observado no solo em PC, é evidência clara da mudança da dinâmica dos processos hídricos no solo em PD. A alteração de um experimento para outro e dentro de um mesmo experimento, entre profundidades, mostra a grande importância do fator tempo embutido na análise dos resultados em PD, já que as modificações ocorrem da superfície em direção ao interior do solo. Desta forma,

pequenas diferenças entre sistemas de manejo, que se mantém ao longo do tempo, principalmente quando o PD está incluído, são evidências de que as mesmas são significativas, embora, em muitos casos a análise estatística não confirme.

Na profundidade de 0,3m (Figura 40) e demais profundidades, cujos modelos encontram-se na Tabela 9, a queda do Ψ_m foi mais lenta em ambos sistemas de manejo do solo e nos dois experimentos. Isso se deve à secagem menos intensa do solo nestas camadas, o que determinou o ajuste do modelo exponencial em detrimento do sigmóide. Devido a isso, não foi possível estabelecer o valor do Ψ_m crítico para estas profundidades, conforme foi feito para aquelas de 0,075m e 0,15m, uma vez que o segundo ponto de inflexão da curva estimada não é determinado pelo modelo exponencial. Entretanto, analisando o período inicial de evolução do Ψ_m no solo em PD, observa-se que a tendência verificada nas profundidades de 0,075m e 0,15m se manteve, ou seja, o Ψ_m foi mais elevado no experimento de 2002/03 em relação àquele de 2001/02, até seis dias após o início do TSS.

Na Figura 40 também é mantida a discriminação entre as curvas dos experimentos de 2001/02 e 2002/03, que descrevem a evolução do Ψ_m em PD, enquanto que em PC se observa uma aproximação suave das mesmas com o avanço da secagem do solo. Portanto, nos dois casos, a semelhança em relação às profundidades de 0,075m e 0,15m é uma indicação de que o Ψ_m crítico para a profundidade de 0,3m se aproxima de $-0,085\text{MPa}$ no solo em PC e é variável naquele em PD, inclusive com chance de superar os limites observados nas profundidades mais superficiais.

Considerando-se a variação do Ψ_m até a profundidade de máxima extração de água, verificou-se que no experimento de 2001/02, o PD conseguiu manter uma condição hídrica do solo mais favorável às plantas do que o PC, por cerca de 15 dias (Figura 41a). Já, no segundo experimento, devido à maior concentração de precipitações no início do ciclo da cultura e ocorrência de um curto período de déficit hídrico, mas de grande demanda evaporativa no momento de máximo *IAF* da cultura, a diferença foi de apenas quatro dias (Figura 41b) (Dalmago et al., 2003b). Isto mostra que, dependendo da variabilidade das condições meteorológicas, o sistema de PD consegue retardar o déficit hídrico

nas culturas de verão, como o milho, em relação ao PC, mantendo uma condição hídrica das plantas mais favorável aos processos fisiológicos, como foi demonstrado por Bianchi (2004).

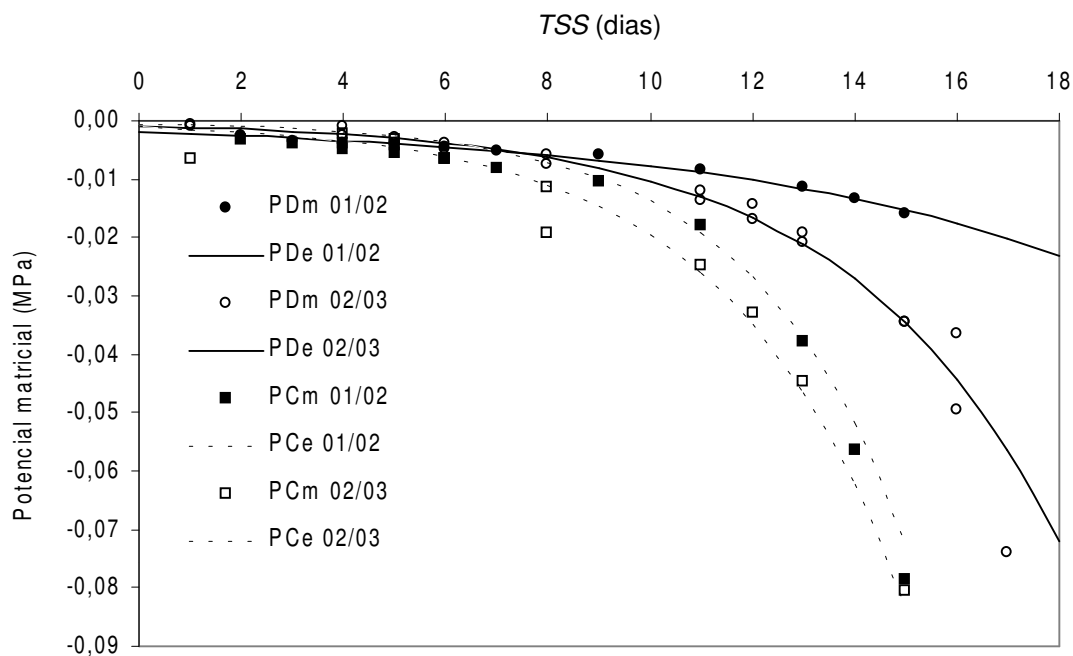


FIGURA 40. Potencial matricial da água no solo medido em plantio direto (PDm) e preparo convencional (PCm) cultivado com milho e valores estimados em função do tempo de secagem (*TSS*) (PDe e PCe) para a profundidade de 0,3m, no primeiro (01/02) e segundo (02/03) experimentos. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

4.8.4.2 Integração do efeito do tempo de secagem do solo e do crescimento das plantas

Conforme verificado no item anterior, a variabilidade entre os ciclos de secagem do solo (Tabela 8) esteve associada, além do *TSS*, às diferenças no crescimento das plantas (*IAF*). Em vista disso, procurou-se descrever a evolução do Ψ_m no solo em PD e PC, associando o *TSS* com uma variável altamente relacionada com o crescimento do milho e, ao mesmo tempo, às condições de demanda evaporativa da atmosfera. Para atender esse requisito foi selecionada a variável GD_{acm} , que descreve adequadamente a evolução do *IAF* do milho (Figuras 3 e 4), sendo que a temperatura do ar, utilizada para o cálculo da mesma, é uma das variáveis que influencia a demanda evaporativa da atmosfera.

A descrição da evolução do Ψm e, portanto, do processo de extração de água em cada camada do solo em PD e PC foi feita a partir do ajuste de um modelo exponencial. O modelo explica a queda do Ψm a partir dos efeitos aditivo das variáveis independentes TSS e GD_{acm} e multiplicativo do Ψm inicial medido no primeiro dia de secagem do solo, após uma precipitação pluvial. A equação ajustada foi:

$$\Psi m = \Psi m_o e^{aTSS + bGD_{acm}} \quad (18)$$

em que Ψm é o potencial matricial da água no solo (MPa), Ψm_o é o potencial matricial inicial, ou seja, aquele do primeiro dia após a precipitação (MPa), TSS é o tempo de secagem do solo (dia) e GD_{acm} é graus-dia acumulados desde a emergência do milho ($^{\circ}C$). Os parâmetros ajustados, com o respectivo coeficiente de determinação para cada modelo, das profundidades do solo até 0,9m em ambos sistema de manejo, encontram-se na Tabela 10. O intervalo de cada variável independente utilizada no ajuste dos modelos e o número de observações podem ser verificados no Apêndice 22.

Analisando o coeficiente de determinação dos modelos (Tabela 10), verifica-se que os mesmos foram maiores para o PD do que para o PC, em todas as profundidades, indicando melhor ajuste dos dados ao modelo proposto. Esta tendência está relacionada com a menor secagem do solo sob PD, devido à sua maior capacidade de armazenagem de água num menor estado energético (Figuras 20 e 21). Em períodos nos quais o solo seca mais intensamente, conforme foi verificado em PC, a tendência é o aumento na dispersão dos valores de Ψm , uma vez que a $K(\theta)$ se reduz exponencialmente (Figura 12, equação 5) e, assim, não consegue estabelecer homogeneidade na θv do solo. Além disso, o solo em PC apresentou menor retenção de água e, por isso, a secagem foi mais rápida do que no solo em PD.

A maior dispersão dos pontos de Ψm em PC também pode ser devido à maior variabilidade de distribuição do sistema radicular em relação ao solo em PD, no qual as raízes se concentram mais junto à superfície (Mello Ivo & Mielniczuk, 1999; Ball-Coelho et al., 1998). Isso pode ser observado na comparação entre os coeficientes de determinação dos modelos das Tabelas 9 e

10. Nos modelos da Tabela 10, a inclusão da variável GD_{acm} , que representa o crescimento da cultura do milho e, em parte, a demanda hídrica da atmosfera, aumentou a dispersão dos pontos entre PD e PC e, em profundidade, dentro de cada sistema.

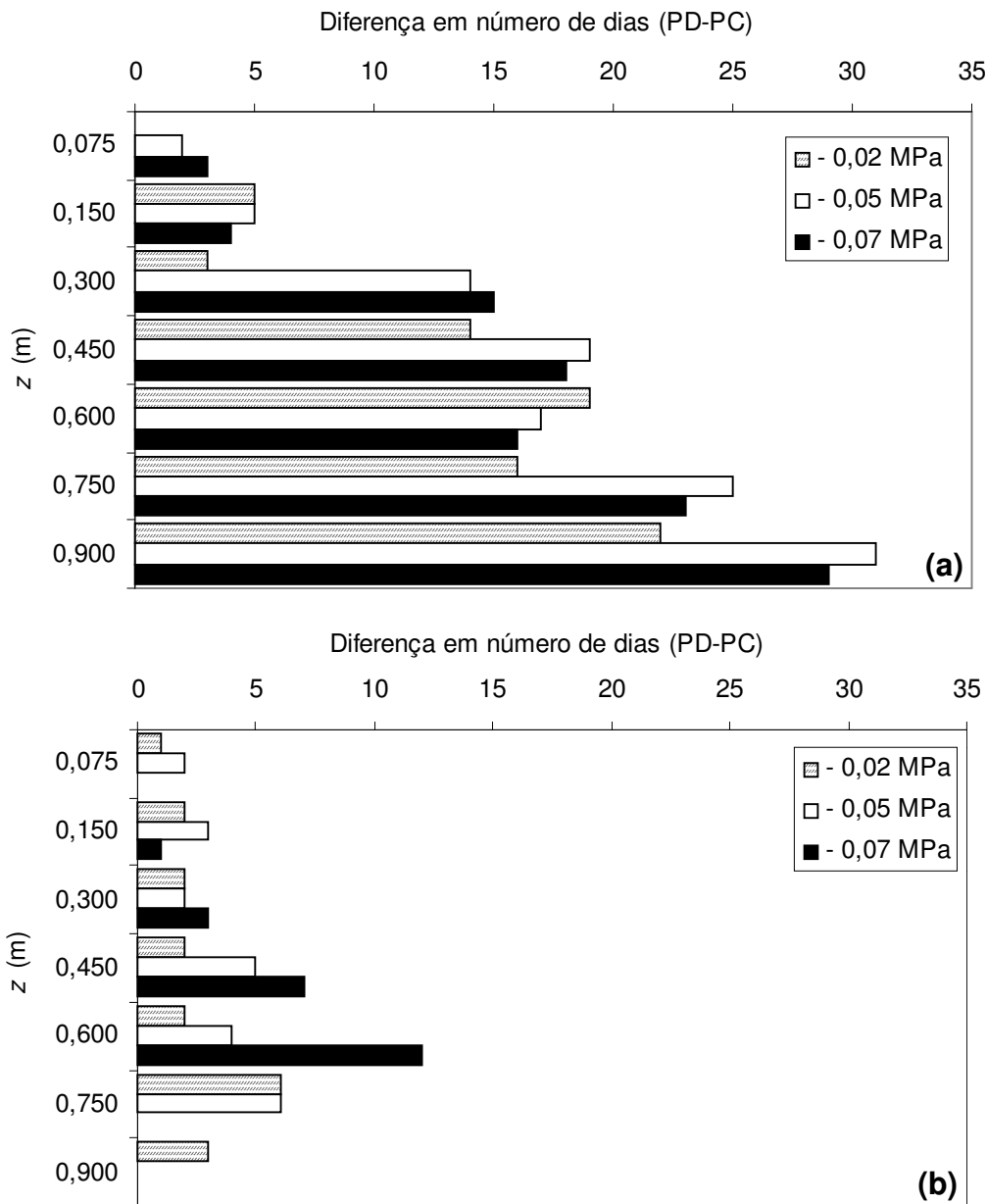


FIGURA 41. Diferença em número de dias entre a ocorrência de um determinado valor de potencial matricial da água no solo, cultivado com milho em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em 2001/02 (a) e 2002/03 (b). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Num primeiro momento, esta tendência seria esperada do ponto de vista físico, ou seja, haveria um aumento da variabilidade da θv do solo quando há plantas extraíndo água do mesmo, por causa da distribuição desuniforme do sistema radicular. Entretanto, considerando que os modelos da Tabela 10 foram obtidos pela união dos conjuntos de dados de Ψm utilizados no ajuste dos modelos da Tabela 9, o aumento na dispersão de Ψm pode ter sido causado pela variabilidade espacial do solo, entre os locais de medição do primeiro e do segundo experimentos e, principalmente, pela interação da demanda evaporativa da atmosfera com o IAF , que variou entre os dois experimentos. A inclusão da ETo nos modelo, como variável representativa da demanda evaporativa da atmosfera, não melhorou o ajuste dos mesmos, nos dois sistemas de manejo, uma vez que, para a maioria das profundidades os coeficientes não foram significativos para esta variável.

TABELA 10. Coeficientes do modelo de estimativa do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional cultivado com milho, em diferentes profundidades (z) (Equação 18) e respectivos coeficientes de determinação dos mesmos ($R^2_{ajs.}$). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

z (m)	Plantio direto				Preparo convencional			
	Ψm_o	a_{TSS}	b_{GDacm}	$R^2_{ajs.}$	Ψm_o	a_{TSS}	b_{GDacm}	$R^2_{ajs.}$
0,075	$-9,14 \times 10^{-4}$	0,3907	0,0030	0,76	$-1,32 \times 10^{-3}$	0,4546	0,0026	0,71
0,15	$-8,92 \times 10^{-4}$	0,2128	0,0039	0,95	$-1,21 \times 10^{-3}$	0,2903	0,0040	0,65
0,3	$-6,32 \times 10^{-4}$	0,0950	0,0047	0,88	$-6,71 \times 10^{-4}$	0,1522	0,0049	0,81
0,45	$-5,74 \times 10^{-4}$	0,0428	0,0049	0,88	$-6,01 \times 10^{-4}$	0,0605	0,0051	0,78
0,6	$-3,63 \times 10^{-4}$	0,0251	0,0052	0,92	$-4,98 \times 10^{-4}$	0,0056 ^{ns}	0,0057	0,75
0,75	$-4,11 \times 10^{-4}$	-0,0002 ^{ns}	0,0044	0,96	$-6,52 \times 10^{-4}$	-0,0366	0,0050	0,77
0,9	$-1,10 \times 10^{-3}$	0,0034 ^{ns}	0,0023	0,81	$-1,22 \times 10^{-3}$	-0,0128	0,0027	0,82

R^2_{adj} = coeficiente de determinação ajustado ao número de observações e parâmetros do modelo; ns = não significativo a 5% de probabilidade de erro; Ψm_o , a_{TSS} e b_{GDacm} = coeficientes do modelo estimados no ajuste.

Mesmo com o aumento da dispersão de pontos nos modelos da Tabela 10, em relação àqueles da Tabela 9, o coeficiente b_{GDacm} foi significativo para a maioria das profundidades (Tabela 10), demonstrando que o efeito do crescimento do IAF e do sistema radicular na extração de água no solo foi integrado pelos modelos. Na média do perfil, os GD_{acm} tiveram efeito maior em PC

que em PD, provavelmente, devido à maior interceptação de *RFA* pelo milho neste sistema de manejo de solo (Bergamaschi et al., 2004). A contribuição do *IAF* e do crescimento radicular também pode ser visualizada nas Figuras 42 e 43, que descrevem a evolução do Ψm em função de GD_{acm} e *TSS*, para as profundidades de 0,075m e 0,15m respectivamente.

Nas duas profundidades e nos dois sistemas de manejo (Figuras 42 e 43) a retirada de água do solo e, portanto, a redução do Ψm , como contribuição do crescimento do milho (*IAF* e sistema radicular) foi mais significativa a partir de 400 GD_{acm} , aproximadamente, e no início do *TSS*. Isso corresponde ao momento imediatamente após o estabelecimento das plantas, quando se iniciava o rápido crescimento do *IAF* (Figuras 3 e 4) e, do sistema radicular. Nesta condição, a taxa de demanda diária de água pela cultura aumentou, significativamente, devido ao rápido aumento da *ETm* com o *IAF* (Bergamaschi et al., 2001), resultando em maior retirada de água do solo, com concomitante redução do Ψm . Além disso, com o aumento do *IAF* a interceptação da radiação solar foi maior em PC, reduzindo a quantidade de energia que chega à superfície do solo (Bergamaschi et al., 2004; Dalmago et al., 2004a). Em consequência, a perda de água por evaporação foi reduzida (Dalmago et al., 2003a) e a participação da mesma no processo de evapotranspiração diminuiu em relação ao início do ciclo do milho, tanto em PD quanto em PC (Dalmago et al., 2004c).

Antes do limite de 400 GD_{acm} , aproximadamente, a redução de Ψm por efeito do acúmulo de GD foi mais significativa à medida que se prolongou o *TSS*, quando a superfície do mesmo secou e a perda de água por evaporação foi fortemente reduzida (Figura 42 e 43). Por outro lado, logo após a precipitação, a evaporação contribuiu de forma mais significativa na secagem do solo, devido ao pequeno sombreamento pela área foliar (Dalmago et al., 2003a).

A redução de Ψm , em função do *TSS* foi maior em PC do que em PD no início do ciclo da cultura, nas camadas mais próximas à superfície. Isto está de acordo com a maior capacidade de armazenagem de água do solo em PD do que em PC (Figuras 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21) e com a maior interceptação de *RFA* pelo milho em PC (Bergamaschi et al., 2004). Ambas variáveis reduziram de forma mais significativa o Ψm no solo em PC, em relação a PD, seja pela menor disponibilidade de água, seja pela maior energia interceptada.

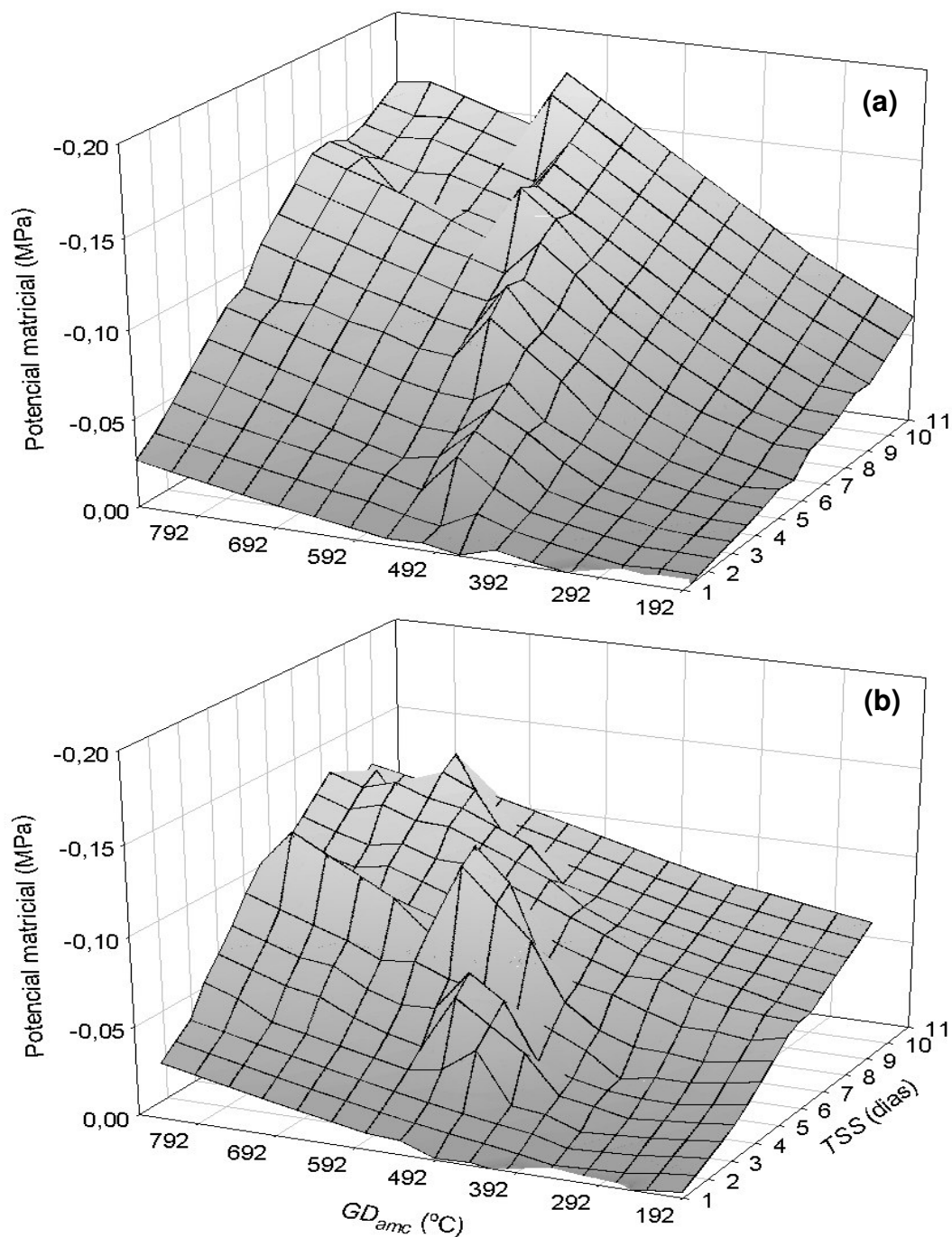


FIGURA 42. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b) cultivado com milho na profundidade de 0,075m, em função do tempo de secagem do solo (TSS) e de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{anc}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

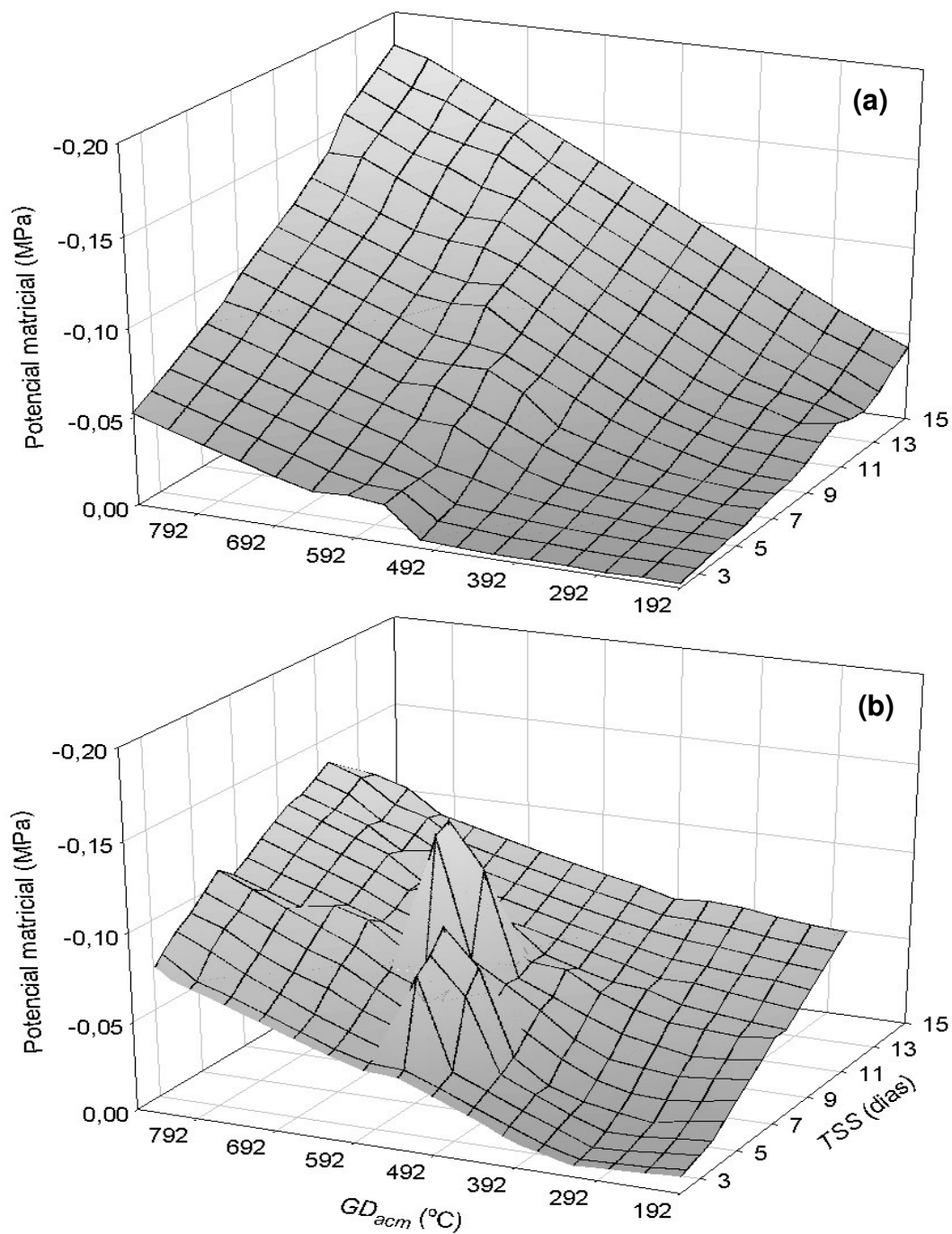


FIGURA 43. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b) cultivado com milho na profundidade de 0,15m, em função do tempo de secagem do solo (TSS) e de graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}),. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Analisando as Figuras 42 e 43 verifica-se que, no início do crescimento do milho ($215 GD_{acm}$), a influência da variável TSS foi mais significativa na redução do Ψ_m no solo em PC do que em PD. Considerando que, naquele período, o IAF do milho ainda se encontrava baixo (Figuras 4 e 5), o efeito observado pode ser atribuído à redução da evaporação na superfície do solo em PD que, assim, manteve a θ_v mais elevada por mais tempo. Entretanto, de acordo com os resultados preliminares apresentados por Dalmago et al. (2003a), referentes ao mesmo experimento, a evaporação não foi reduzida pelo PD, sendo a mesma até maior do que no solo em PC, em períodos de longa estiagem. Desta forma, o efeito do TSS na redução do Ψ_m se deve a que o solo em PD armazena maior quantidade de água até o limite de rompimento da coluna dos tensiômetros (Figuras 20 e 21).

Para as profundidades de 0,075m e 0,15m (Figuras 42 e 43) observa-se efeito interativo entre TSS e GD_{acm} na redução do Ψ_m , quando diferentes subperíodos e condições distintas de cultivo são agrupadas (2001/02 e 2002/03). O efeito da variável TSS foi mais significativo próximo à superfície, enquanto a contribuição de GD_{acm} teve maior peso nas camadas 0,15m e 0,75m de profundidade, conforme os maiores coeficientes a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$, respectivamente (Tabela 10). Observa-se também, que, até 0,45m de profundidade, o coeficiente a_{TSS} foi maior em PC, indicando uma secagem mais rápida do solo, devido à menor armazenagem de água que o mesmo apresentou nas primeiras camadas (Figuras 20 e 21).

Com relação ao coeficiente $b_{GD_{acm}}$, este foi maior em PD na profundidade de 0,075m, indicando maior influência da variável GD_{acm} na descrição da evolução de Ψ_m . O valor mais elevado de $b_{GD_{acm}}$ nesta camada do solo em PD pode ser atribuído à concentração do sistema radicular na mesma (Basso et al., 1994; Mello Ivo & Mielniczuk, 1999), devido à maior θ_v (Figuras 20 e 21) e melhor condição nutricional promovida por este sistema de manejo, em relação a PC (Apêndice 4) (Falleiro et al., 2003).

Nas Figuras 44 e 45 é apresentada a evolução de Ψ_m nas profundidades de 0,3m e 0,45m, respectivamente. Observa-se que o Ψ_m diminuiu mais rapidamente, em relação às camadas mais próximas à superfície, à medida que a cultura cresceu. Isso se deve ao avanço mais rápido da frente de secagem

do solo, devido à maior extração de água com o crescimento das plantas. Além disso, a redução da água disponível das camadas superficiais e a maior concentração do sistema radicular nestas camadas, com o crescimento da cultura, determinaram que o milho “buscasse” água em camadas mais profundas (Cabelguenne & Debaeke, 1998).

Para as profundidades de 0,3m e 0,45m, o efeito do TSS e dos GD_{acm} , seguiu a mesma tendência verificada a 0,075m e 0,15m de profundidade (Figuras 42 e 43). A variável TSS teve efeito mais significativo no início do ciclo do milho em PC e, posteriormente, quando a cultura cobriu a superfície do solo, os GD_{acm} tiveram maior contribuição na redução de Ψ_m . A partir de 0,45m de profundidade, a contribuição do TSS foi fortemente reduzida, enquanto àquela dos GD_{acm} se manteve semelhante às camadas superficiais (Tabela 10). Isto pode ser atribuído ao aprofundamento do sistema radicular, em busca de água em camadas mais profundas do perfil, com o crescimento das plantas. Entre os sistemas de manejo, a secagem do solo, por efeito da extração de água foi maior em PC do que em PD, a partir de 0,15m de profundidade (coeficiente $b_{GD_{acm}}$ maior) (Tabela 10), o que, de certa forma, também indica maior aprofundamento do sistema radicular.

Analisando as Figuras 42, 43, 44 e 45 em conjunto, verifica-se que, no primeiro dia após a ocorrência de uma precipitação, ou seja, no início da contagem do TSS , o Ψ_m foi menor nas profundidades de 0,3m e 0,45m (Figuras 44 e 45) do que próximo à superfície (Figuras 42 e 43), nos dois sistemas de manejo, à medida que aumentou o período de secagem do solo e o crescimento das plantas. Isso foi verificado, principalmente, na profundidade de 0,45m e no solo em PC (Figura 45b), através do nítido atraso na queda do Ψ_m com o tempo.

Por exemplo, a queda significativa de Ψ_m , quando o milho tinha em torno de 500 GD_{acm} , ocorreu já com dois dias após o início do TSS . Enquanto isso, com aproximadamente 700 GD_{acm} , a queda ocorreu somente após 20 dias do início de secagem do solo. Esta variação foi observada, principalmente, porque a máxima extração de água no solo, com o crescimento das plantas em PC, foi deslocada para camadas mais profundas no perfil, em função da menor disponibilidade de água próximo à superfície (Figuras 20 e 21).

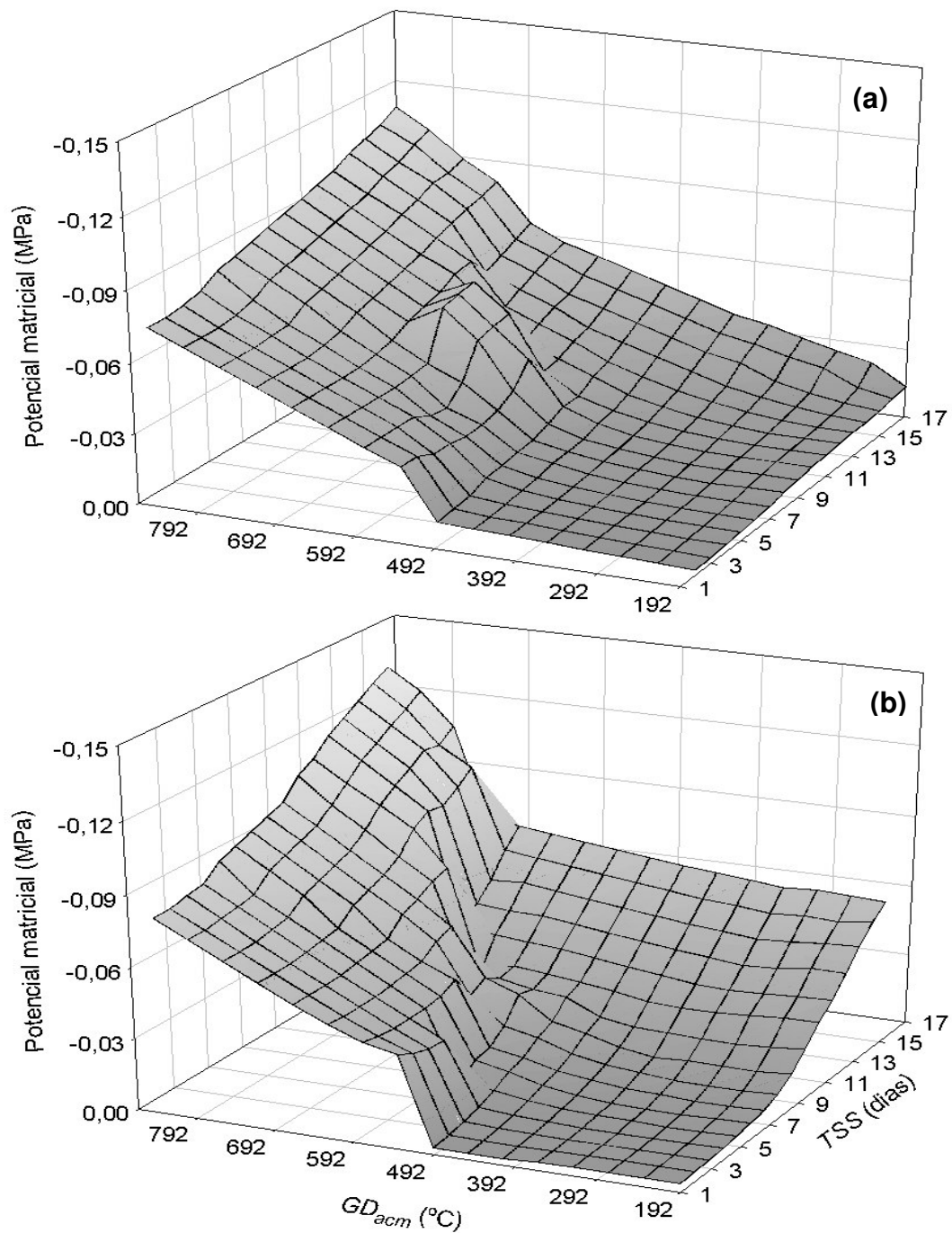


FIGURA 44. Evolução do potencial matricial da água no solo cultivado com milho em plantio direto (a) e preparo convencional (b) em função do tempo de secagem do solo (TSS) e da graus-dia acumulados após a emergência do milho (GD_{acm}), na profundidade de 0,3m. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

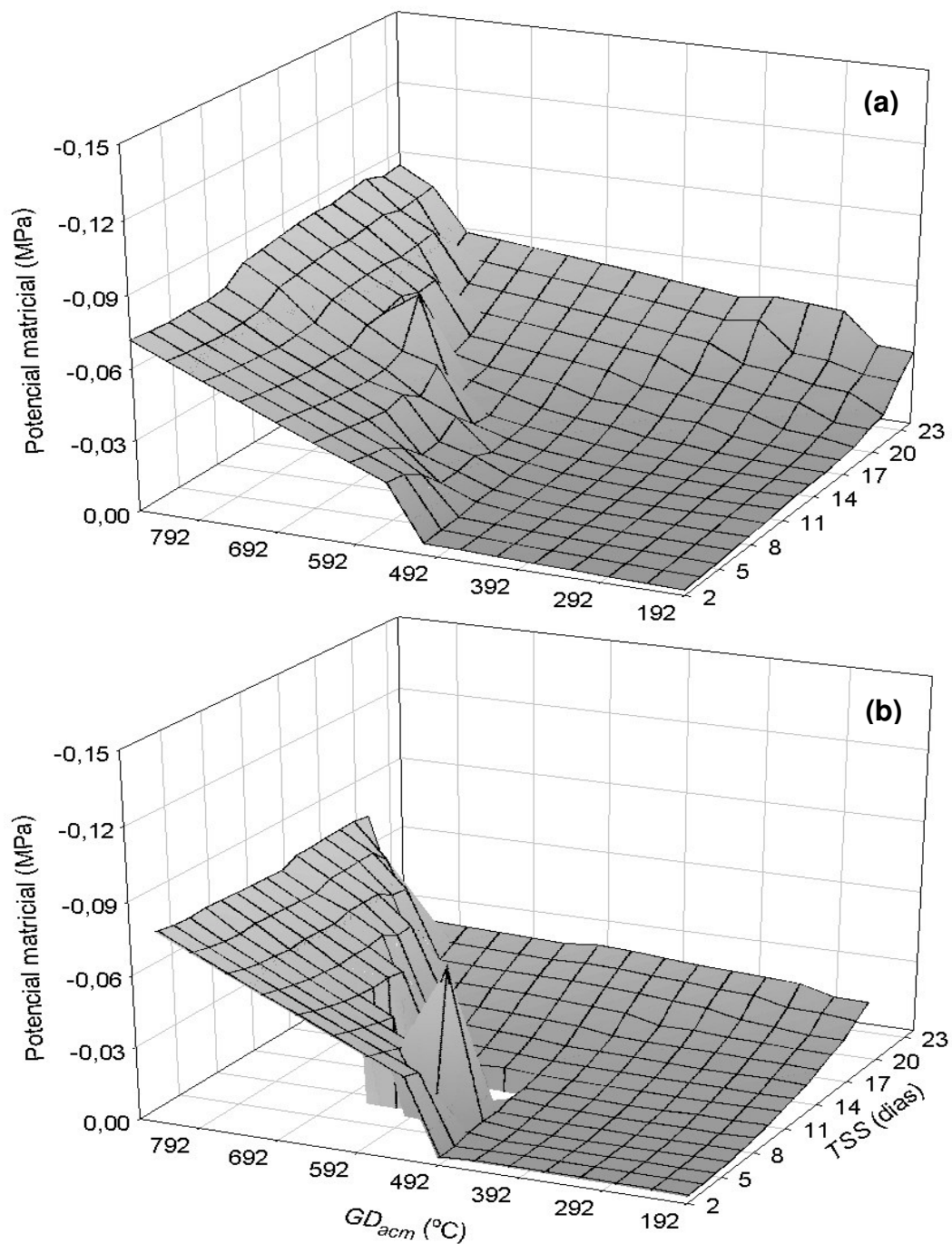


FIGURA 45. Evolução do potencial matricial da água no solo cultivado com milho em plantio direto (a) e preparo convencional (b), em função do tempo de secagem do solo (TSS) e dos graus-dia acumulados após a emergência do milho (GD_{acm}) na profundidade de 0,45m. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

No solo em PD este fenômeno não foi observado, claramente, em nenhuma profundidade do perfil (Figuras 42a, 43a, 44a e 45a). Entretanto, em PD o aspecto da interação entre as variáveis GD_{acm} e TSS foi mais evidente, em relação ao PC, provavelmente devido à sua maior capacidade de retenção de água disponível às plantas. Com condições hídricas e nutricionais favoráveis, o sistema radicular concentrou-se mais próximo à superfície em PD, determinando que o Ψm mantivesse uma variação mais gradual com o TSS e o crescimento das plantas (GD_{acm}), em relação ao que foi observado no solo em PC.

Para as demais profundidades avaliadas (Tabela 10) a tendência foi semelhante àquela verificada nas profundidades de 0,45m (Apêndice 23). À medida que aumentou a profundidade no solo foi menor o efeito interativo entre as variáveis independentes que explicam a evolução do Ψm , principalmente em PC. Prevaleceu o efeito do crescimento das plantas (GD_{acm}) na extração de água, em detrimento da variável TSS .

4.8.4.3 Integração do efeito do tempo de secagem do solo, crescimento das plantas e profundidade no perfil

Devido à extração de água do solo é um processo dinâmico, que ocorre de forma simultânea em todo o perfil, variando em intensidade ao longo do mesmo de acordo com o crescimento do IAF , a demanda evaporativa da atmosfera e a disponibilidade de água no solo. Assim, a evolução do Ψm , em consequência da absorção de água, também é integrada em função da profundidade explorada com o tempo.

Na tentativa de representar a evolução do Ψm ao longo do tempo, em uma dada profundidade de solo, foi feito ajuste dos coeficientes Ψm_o , a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$ (Tabela 10), em função da profundidade do solo. A representação da variação destes coeficientes ao longo do perfil pode ser verificada na Figura 46.

Observa-se que houve diferença não muito contrastante entre a variação dos coeficientes no solo em PD e PC. Na média do perfil (0 a 0,9m), Ψm_o foi mais elevado no solo em PD, em consequência da maior capacidade de armazenagem de água. Devido a isso, em média, também os coeficientes a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$ foram menores em PD em comparação a PC. Conforme mencionado

anteriormente, o coeficiente a_{TSS} indica menor retenção de água no solo em PC e não secagem mais intensa pelo processo de evaporação na superfície.

A distribuição dos coeficientes Ψm_o , a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$, ao longo do perfil, ocorreu de acordo com a tendência física esperada, o que é de grande importância para o entendimento das relações hídricas solo-planta-atmosfera. Além disso, os coeficientes corroboram com resultados observados na análise das propriedades físicas do solo, tornando-se, portanto, indicadores confiáveis da tendência média de evolução do Ψm e das diferenças entre o processo de retirada de água em PD e PC. As equações que descrevem os respectivos coeficientes em profundidade no perfil do solo, em PD e PC são apresentadas na Tabela 11. Conforme mostrado anteriormente, os coeficientes a_{TSS} e $b_{GD_{acm}}$ descrevem o efeito do TSS e do crescimento das plantas de milho (GD_{acm}), respectivamente.

A semelhança na variação dos coeficientes ao longo do perfil, entre os sistemas de manejo, mostra que os processos que determinaram a extração de água do solo em PD e PC foram os mesmos. Por sua vez, o deslocamento das curvas entre os sistemas de manejo (Figura 46) indica que a intensidade com que esses processos ocorreram foi diferente no solo em PD e em relação a PC. A variação dos coeficientes entre os sistemas se deve a diferenças nas propriedades físicas do solo que determinaram as variações na retenção de água entre PD e PC e a diferenças na interceptação da radiação solar pelo milho (Bergamaschi et al., 2004), que aumentou a quantidade de água extraída pela cultura, em PC.

Quanto ao coeficiente Ψm_o a variabilidade espaço-temporal é definida, também, pelo volume das precipitações que ocorrem antes dos respectivos ciclos de secagem do solo, que foram utilizados no ajuste deste parâmetro. Entretanto, para uma análise comparativa entre sistemas de manejo, esse ajuste torna-se desnecessário, porque a precipitação ocorreu na mesma quantidade nas áreas em PD e em PC. Além disso, vários outros fatores interferem na dinâmica da água no solo, em ambos sistemas de manejo, muitos dos quais têm efeito bem maior do que a precipitação inicial como, por exemplo, a $K(\theta)$.

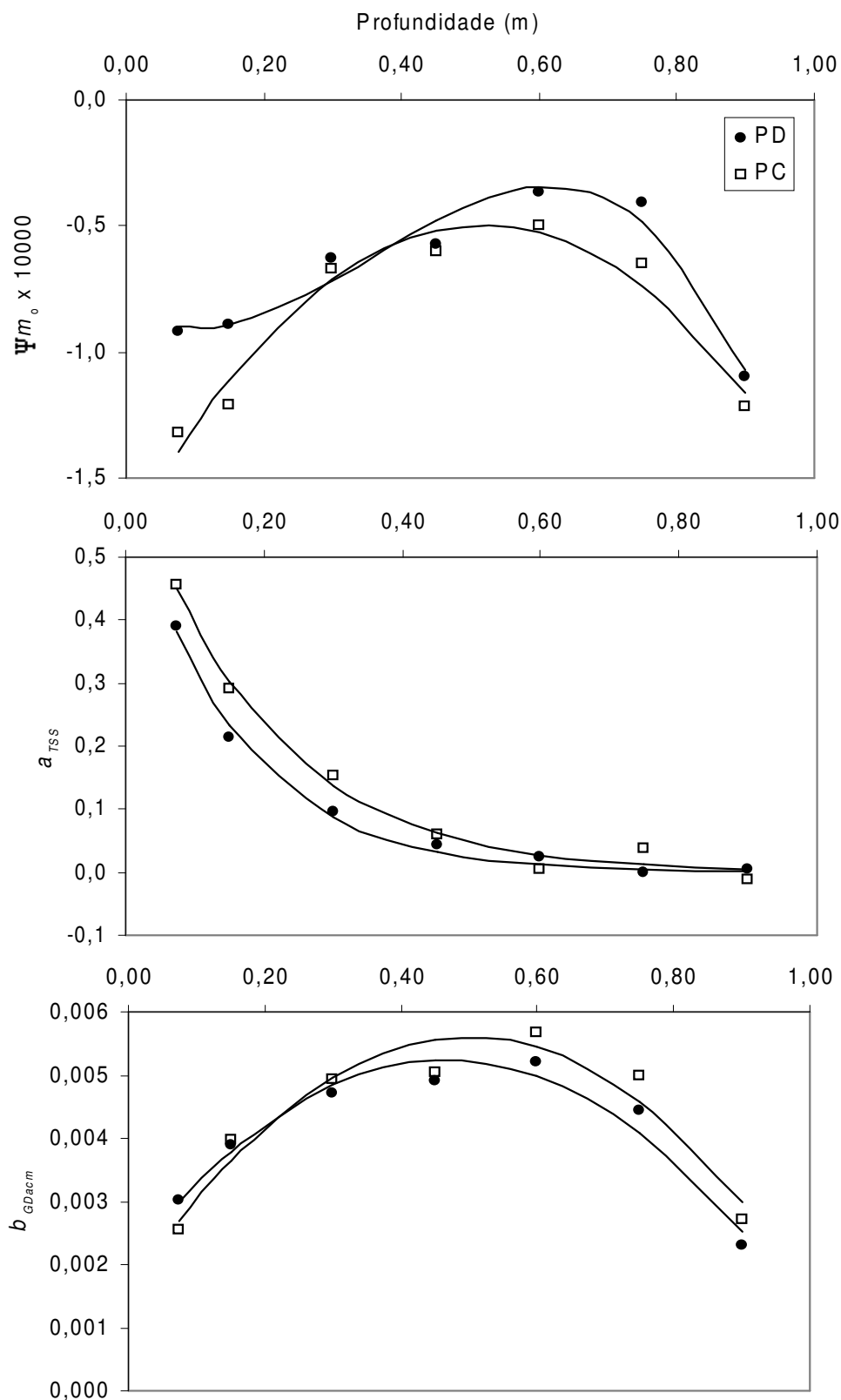


FIGURA 46. Variação dos coeficientes Ψm_0 , a_{TSS} e b_{GDacm} da Tabela 10, para o plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função da profundidade do solo. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

TABELA 11. Equações para estimar Ψm_o , a_{TSS} e b_{GDacm} para o plantio direto e preparo convencional, em função da profundidade do solo (z), e respectivos coeficientes de determinação. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Modelos	$R^2_{ajis.}$
.....Plantio direto.....	
$\Psi m_o = -8,26278 \times 10^{-4} - 1,6135 \times 10^{-3^{ns}} z + 9,1126 \times 10^{-3^{ns}} z^2 - 8,4704 \times 10^{-3} z^3$	0,90
$a_{TSS} = 0,624085 e^{-6,56683 z}$	0,99
$b_{GDacm} = 2,05595 \times 10^{-3} + 1,36424 \times 10^{-2} z - 1,45795 \times 10^{-2} z^2$	0,92
.....Preparo convencional.....	
$\Psi m_o = -1,72312 \times 10^{-3} + 4,73625 \times 10^{-3} z - 4,57088 \times 10^{-3} z^2$	0,93
$a_{TSS} = 0,671186 e^{-5,31772 z}$	0,99
$b_{GDacm} = 1,55845 \times 10^{-3} + 1,62756 \times 10^{-2} z - 1,6339 \times 10^{-2} z^2$	0,88

$R^2_{ajis.}$ = coeficiente de determinação ajustado ao número de observações e parâmetros do modelo; ns = não significativo a 5% de probabilidade de erro.

A partir da variação dos coeficientes Ψm_o , a_{TSS} e b_{GDacm} em profundidade no perfil de solo (Figura 46), descrita pelas equações da Tabela 11, foi proposta uma função que descreve a evolução do Ψm em profundidade para cada combinação das variáveis de TSS e GD_{acm} . O ajuste foi feito para os dois sistemas de manejo, separadamente, e é válido dentro dos limites apresentados no Apêndice 22.

O modelo final consiste na inclusão das equações que descrevem os coeficientes da Figura 46 (Tabela 11), em função da profundidade do solo, no modelo apresentado anteriormente (Equação 18). Assim, o Ψm será função do TSS , GD_{acm} e da profundidade no perfil, para os dois sistema de manejo. A forma final da equação é:

$$\Psi m_{(PD\ ou\ PC)} = [\Psi m_o f(z)] e^{\left\{ \left[TSS^{a_{TSS}} f(z) \right] \left[GD^{b_{GDacm}} f(z) \right] \right\}} \quad (19)$$

em que z é a profundidade do solo (m) e f significa função. Os demais símbolos foram definidos na equação 18.

4.8.4.4 Evolução do potencial matricial após o florescimento do milho

No florescimento do milho, a avaliação da extração de água não foi possível de ser realizada em cada profundidade do solo, pois o número de dias com registro de Ψ_m em todas as profundidades foi pequeno. Isto ocorreu porque, naquele momento, a demanda de água pela cultura foi alta, devido ao máximo I_{AF} (Figuras 3 e 4) e às condições de elevada demanda evaporativa da atmosfera (Figuras 1 e 2), o que ocasionou o rompimento da coluna dos tensiômetros em poucos dias após cada precipitação. Mesmo assim, foi possível selecionar pequenos intervalos de secagem do solo, com três a quatro leituras de Ψ_m , para identificar alterações no processo de extração de água pelo milho em PD e PC, após o florescimento.

Devido ao pequeno conjunto de dados disponíveis em cada profundidade avaliada, foi feita a média de Ψ_m no perfil até 0,9m de profundidade, para cada dia após a precipitação. Este limite foi adotado pelo fato que a máxima extração de água, neste estágio da cultura, ocorreu até, aproximadamente, 0,9m de profundidade (Figura 37) e não mudou, de forma significativa, com o avanço do ciclo da cultura, pois o crescimento do sistema radicular cessou. Devido às diferenças na precipitação ocorrida antes de cada ciclo de secagem do solo, os valores de Ψ_m foram normalizados para uma condição de precipitação padrão de 30mm, que correspondeu à precipitação média entre todos os ciclos avaliados. Foram agrupados períodos dos dois experimentos, utilizando as repetições da área não irrigada. A evolução do Ψ_m nestas condições encontra-se na Figura 47.

Na média do perfil, também neste estágio o Ψ_m se manteve mais elevado no solo sob PD, demorando mais tempo para atingir um mesmo Ψ_m do que em PC. Esta tendência foi observada apesar do milho cultivado em PD ter apresentado maior transpiração, logo após o pendramento/espigamento, do que em PC (Dalmago et al., 2003c). Isto se deveu à maior retenção de água no solo em PD, em relação a PC, proporcionada pela capacidade mais elevada de armazenagem de água que o solo apresentou neste sistema de manejo (Figuras 20 e 21).

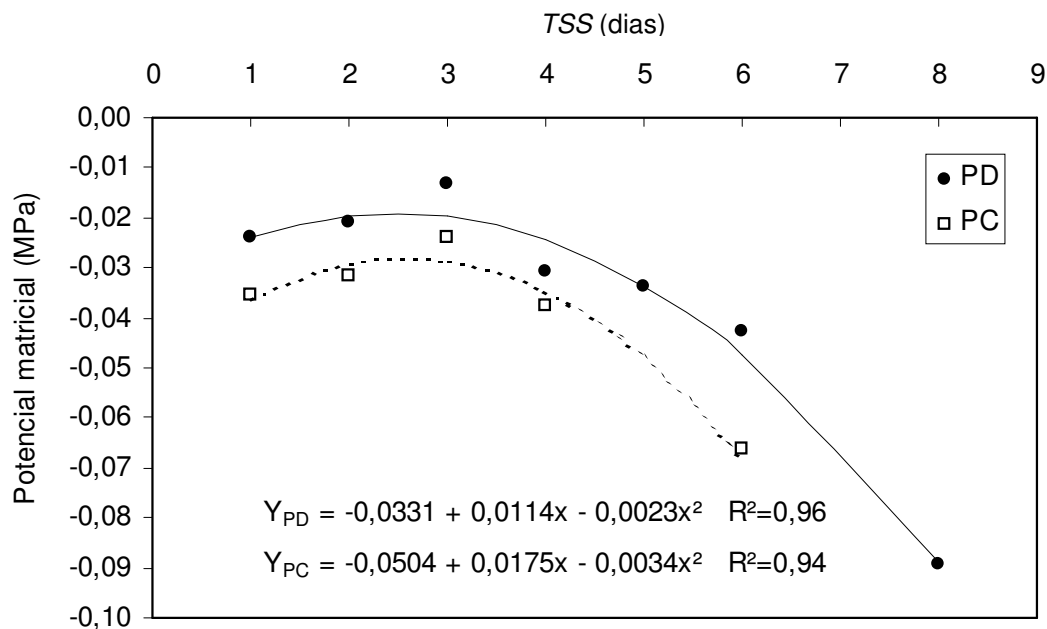


FIGURA 47. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função do tempo de secagem do solo (*TSS*), após o florescimento do milho. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

O Ψ_m apresentou uma forma cúbica de variação com do *TSS*, inicialmente aumentando e depois diminuindo de forma exponencial, o que indica que, na média do perfil, a secagem não foi intensa a ponto de alterar o modelo para a forma sigmoidal. Entretanto, em camadas específicas do solo isto pode ter ocorrido, principalmente naquelas em que se encontrava a maior concentração do sistema radicular. A elaboração da média do perfil suavizou a forma de decaimento sigmoidal do Ψ_m .

Além da maior capacidade de armazenagem de água em PD, até o limite de $-0,08\text{MPa}$ (Figura 20), a diferença na evolução do Ψ_m , em relação a PC, pode ter sido causada, também, pela maior interceptação de *RFA* pelo milho em PC até o máximo *IAF* (Bergamaschi et al., 2004). Conforme já mencionado, isto exigiu maior extração de água do perfil para atender à maior demanda hídrica, antes do pendoamento. Assim, quando o sistema radicular parou de crescer, ao redor do florescimento, o solo em PC se apresentava, em média, mais seco, o que justifica a manutenção de Ψ_m menores no pendoamento/espigamento, em relação ao solo sob PD.

No início do ciclo de secagem do solo (Figura 47) o modelo descreveu um aumento de Ψm médio do perfil até o terceiro dia após a precipitação, tanto no solo em PD quanto naquele em PC. Esse aumento ocorreu devido ao atraso no avanço da frente de umedecimento do solo nas camadas mais profundas do perfil. Com isso, logo após a precipitação, o Ψm aumentou próximo à superfície, mas, se manteve baixo na camada de solo de maior extração de água pelas raízes, devido, também, à manutenção do processo de absorção de água (Figura 48). Isto fez com que, na média do perfil, o Ψm apenas aumentasse à medida que ocorreu a passagem da água das camadas superficiais para as mais profundas no perfil (Figura 48), por conta da $K(\theta)$. Baseado nestes resultados é possível inferir que, nos dois sistemas de manejo do solo, uma precipitação de aproximadamente 30mm durante o florescimento atinge a zona de maior absorção de água após três dias da ocorrência da mesma.

Na Figura 48 verifica-se, nitidamente, a condição descrita pelos modelos da Figura 47. Também se observa que houve tendência do Ψm estabilizar-se próximo a $-0,085\text{MPa}$ em PC e de $-0,12\text{MPa}$ no solo em PD, valores que se aproximam aos Ψm críticos definidos durante o crescimento inicial do milho (Figuras 38 e 39). Apesar dos valores de Ψm da Figura 48 representarem a condição média do perfil, descrevem exatamente a condição verificada nos estudos de caso (Figuras 37), ou seja, a extração de água ocorre em camadas mais profundas no perfil do solo em PC, em relação a PD, à medida que avança a secagem do mesmo.

Nos dois sistemas, observa-se um padrão de extração de água semelhante a um funil, sendo mais característico no solo em PD do que naquele em PC (Figura 48). Isto foi causado pela distribuição do sistema radicular mais próximo à superfície em PD, enquanto em PC o mesmo se encontrava concentrado em camadas mais profundas. Por outro lado, a extração mais intensa próximo à superfície do solo, nos dois sistemas, pode ter sido causada pelas raízes adventícias que se formaram na base do colmo do milho, conforme foi verificado anteriormente (Figura 37).

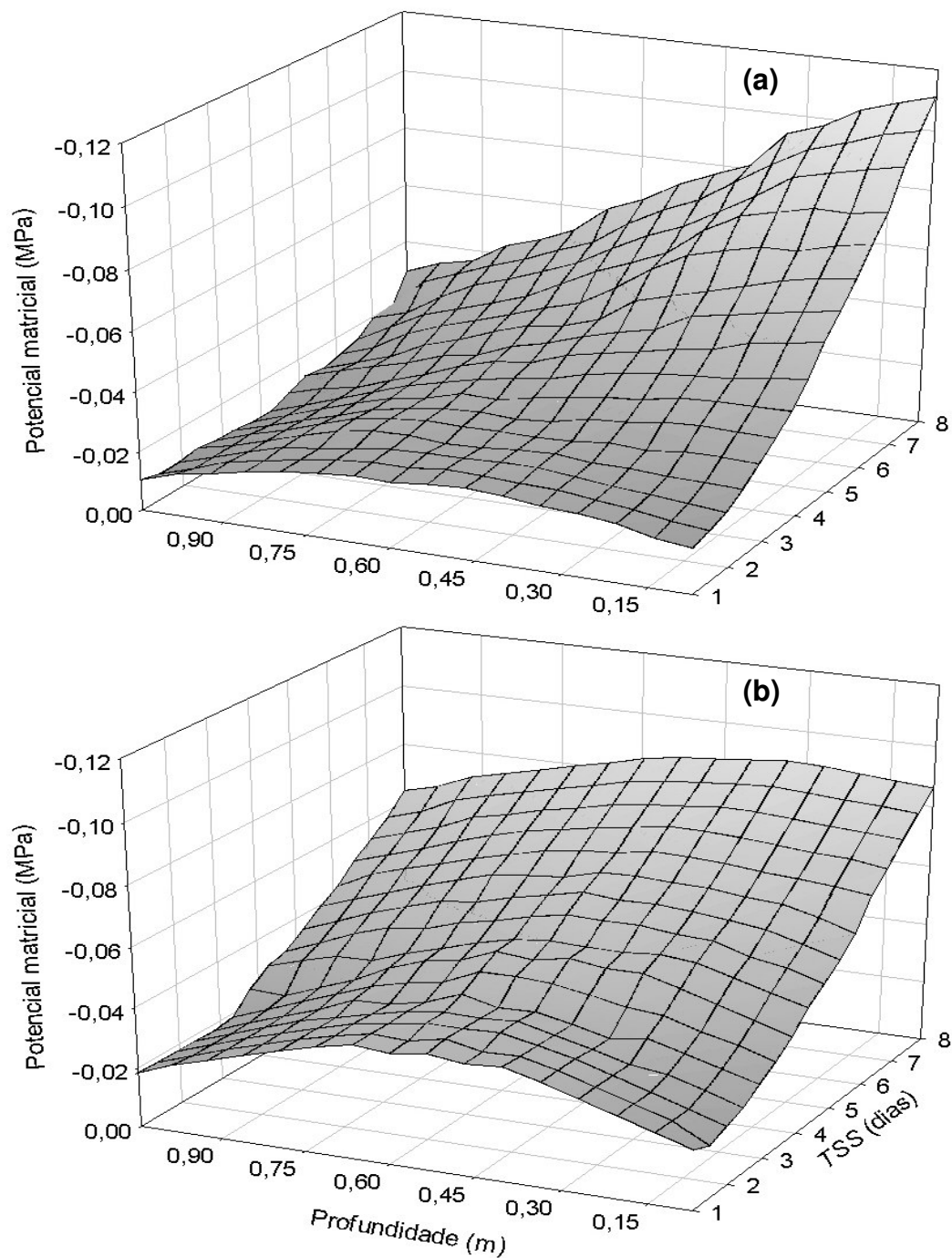


FIGURA 48. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b), em função do tempo de secagem do mesmo (TSS) e da profundidade no perfil, durante o florescimento do milho,. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

4.8.4.5 Verificação dos modelos de extração de água

O modelo final que descreve a evolução do Ψ_m no solo, em cada sistema de manejo, para uma dada profundidade (Equação 19), foi testado quanto à sua capacidade preditiva. Para isso foram utilizados valores de Ψ_m obtidos em outros ciclos de secagem do solo de menor duração, bem como, de medições feitas na área irrigada, considerando a irrigação como fator para início de um ciclo de secagem do solo e tendo o mesmo efeito que uma precipitação. No entanto, para uma melhor avaliação, os modelos devem ser testados em condições semelhantes às aquelas nas quais foram ajustados, sendo essa apenas uma aproximação da sua capacidade preditiva.

A verificação dos respectivos modelos aponta para uma melhor capacidade preditiva do modelo ajustado para o solo sob PD, em relação àquele em PC (Figura 49). Em PD observou-se alta aderência entre os valores de Ψ_m , medidos e estimados, em torno da linha de regressão (r^2 elevado) e da linha 1:1, conforme indicaram o coeficiente linear não diferindo de zero, e o angular não diferindo de 1, ambos significativos a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t. Em PC, embora a aderência em torno da linha 1:1 tenha sido significativa, a dispersão de pontos em relação à curva de regressão foi mais elevada do que em PD, com tendência de aumento da mesma em Ψ_m menores. Mesmo assim, os coeficientes angular e linear foram significativos pelo teste t a 5%, indicando que os mesmos não diferem de zero e 1, respectivamente. A tendência entre os modelos de PD e PC diferiu da variação verificada na área sem plantas, provavelmente, pelo efeito integrador entre as plantas e os sistemas de manejo.

A menor aderência à linha regressão em PC, provavelmente, está relacionada ao fato de que os ciclos de secagem do solo utilizados para validar os modelos foram menores do que aqueles utilizados no ajuste. A utilização de ciclos de secagem do solo iniciados após irrigações também pode ter aumentado a variabilidade entre os valores medidos e estimados, uma vez que a irrigação, dificilmente, homogeniza a θ_v do solo da mesma forma que uma precipitação. Outra causa que pode ter contribuído para aumentar a dispersão entre os valores medidos e estimados em PC pode ter sido o fato de que o solo neste sistema de manejo, sempre apresentou secagem mais rápida daquele em PD. A secagem

mais intensa do solo tende a aumentar a variabilidade espaço-temporal da θ_v , devido à redução da $K(\theta)$ e a distribuição desuniforme do sistema radicular.

Em PD, o fato do solo reter maior quantidade de água contribuiu para melhorar a performance do modelo, quanto à aderência à linha 1:1 e à menor dispersão de pontos em relação à linha de regressão. Neste sistema o aumento da precisão de estimativa também ocorreu devido ao solo manter-se com θ_v mais elevada por mais tempo do que em PC, bem como pela tendência de concentração do sistema radicular mais próximo à superfície, conferindo maior homogeneidade de distribuição do mesmo.

A diferença na precisão dos modelos entre os sistemas de manejo, além de confirmar a superioridade do estado hídrico do solo em PD, quando a complexidade de análise aumenta, tem importância em outros aspectos. Baseado no coeficiente de determinação mais elevado em PD pode-se inferir que, em PD, as variáveis hídricas apresentam maior homogeneidade temporal do que em PC. Isto é um indicador de que o sistema PD é mais dependente do fator tempo e dos processos evolutivos, quando o solo não é revolvido e grandes quantidades de matéria orgânica são adicionadas à superfície. Neste sentido, diferenças pequenas entre PD e PC, nem sempre significativas do ponto de vista estatístico, assumem grande importância no processo evolutivo, principalmente quando as mesmas se mantêm ao longo do tempo.

A capacidade preditiva também foi testada através da análise do quadrado médio do erro de ajuste dos modelos e o quadrado médio do erro entre valores medidos e estimados (Neter et al., 1996). Este critério também identificou as diferenças entre os modelos, para PD e PC, observadas na Figura 41. O quadrado médio do erro entre os valores medidos e estimados foi cerca de 70% menor daquele de ajuste do modelo, no caso do PD. Já em PC o mesmo foi cerca de 20% menor ao do ajuste do modelo. De acordo com Neter et al. (1996), isto é evidência de que o modelo selecionado para PD tem capacidade preditiva melhor do que aquele em PC, embora ambos tendam a apresentar comportamento futuro semelhante, devido ao quadrado médio do erro entre os valores medidos e estimados ter sido menor do que no ajuste dos modelos. Entretanto, para ambos sistemas de manejo, a capacidade preditiva dos modelos deve ser testada com

ciclos de secagem do solo mais prolongados em experimentos futuros, a fim de buscar maior segurança quanto à aplicabilidade dos mesmos.

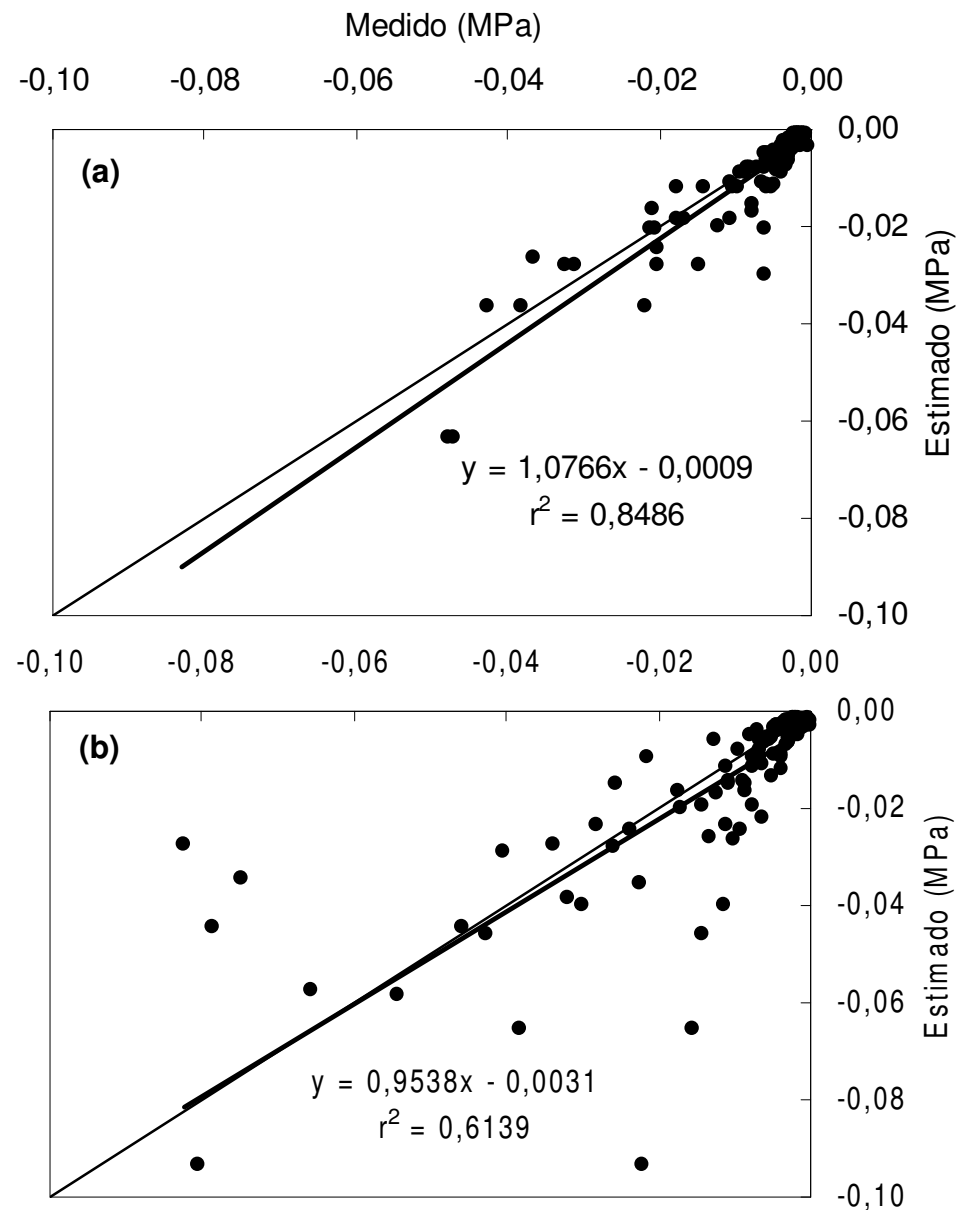


FIGURA 49. Potencial matricial da água no solo em plantio direto (a) e preparo convencional (b) cultivado com milho, medido com tensiômetros e estimado a partir da equação 19, na camada de 0 a 0,975m de profundidade. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Para os modelos da Tabela 9 a validação não foi possível devido à falta de dados independentes. O mesmo também ocorreu para aqueles que descreveram a secagem do solo após o pendramento/espigamento (Figura 47).

4.9 Avaliação da profundidade do sistema radicular do milho

A estimativa da profundidade do sistema radicular do milho, com base redução do Ψ_m , mostrou diferenças entre PD e PC e, dentro dos sistemas de manejo, de acordo com a condição hídrica proporcionada, principalmente, pela aplicação da irrigação. Seguindo as pressuposições utilizadas por Faria & Madramootoo (1996), de que o aprofundamento do sistema radicular segue uma função linear, e o critério adotado por Müller (2001), de que o crescimento do sistema radicular do milho pára no florescimento, estimou-se a profundidade máxima alcançada pelo volume mais significativo das raízes, quando o milho passou do período vegetativo para o reprodutivo (Tabela 12).

Na Tabela 12 verifica-se que a maior profundidade do sistema radicular do milho ocorreu no solo em PC e na da condição não irrigada, atingindo 1,05m no primeiro e 0,9m no segundo experimento, respectivamente. No solo em PD a máxima profundidade de extração de água também foi verificada na área não irrigada, que foi de 0,75m nos dois experimentos. Quando a cultura foi irrigada, independentemente do nível de irrigação (I2 ou I4) e do sistema de manejo, o aprofundamento máximo do sistema radicular foi menor do que na área em que o milho não foi irrigado, conseqüência da maior disponibilidade de água no solo nas camadas mais próximas à superfície. O efeito de distintos sistemas de manejo do solo, incluindo PD e PC e a irrigação, sobre o crescimento radicular do milho também foi estudado por Newell & Wilhelm (1987), que encontraram resultados semelhantes.

Tanto no caso do milho irrigado quanto naquele não irrigado, o aprofundamento do sistema radicular foi menor em PD quando comparado a PC. Em média, o milho cultivado em PC aprofundou cerca de 0,3m a mais o seu sistema radicular em comparação a PD, como forma de “buscar” água nas camadas mais profundas do perfil do solo.

A resposta do sistema radicular à condição hídrica também foi avaliada quando o nível de irrigação foi cerca de 40% da CC (I2). Também nesta quantidade de irrigação o sistema radicular se aprofundou mais no solo em PC do

que em PD, em cerca de 0,15m, mostrando que o efeito do sistema de manejo se manteve, independente da quantidade de água aplicada. Em termos de aprofundamento máximo do sistema radicular, o milho não irrigado em PD se equívale à condição da cultura irrigada no solo em PC. Na comparação destas situações, a profundidade máxima estimada de alcance do sistema radicular no solo em PD foi de 0,75m.

TABELA 12. Profundidade máxima e coeficiente de aprofundamento do sistema radicular do milho em florescimento (Az_r), sob diferentes níveis de irrigação, em solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), com os respectivos graus-dia acumulados (GD_{acm}) e dias após a emergência (DAE). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Sistema	Nível irrigação	GD_{acm} (° C)	DAE	Profundidade Máxima (m)	Coefficiente Az_r
.....Experimento 2001/02.....					
PD	I4	779	54	0,45	$4,49 \times 10^{-4}$
PD	I0	749	52	0,75	$8,34 \times 10^{-4}$
PC	I4	779	54	0,75	$8,68 \times 10^{-4}$
PC	I0	749	52	1,05	$1,27 \times 10^{-4}$
.....Experimento 2002/03.....					
PD	I4	795	51	0,45	$4,40 \times 10^{-4}$
PD	I2	822	53	0,6	$6,08 \times 10^{-4}$
PD	I0	852	55	0,75	$7,63 \times 10^{-4}$
PC	I4	836	54	0,75	$7,78 \times 10^{-4}$
PC	I2	836	54	0,75	$7,78 \times 10^{-4}$
PC	I0	836	54	0,9	$9,57 \times 10^{-4}$

I4 = nível de irrigação correspondente a 100% da CC; I2 = nível de irrigação correspondente a 41% da CC; I0 = não irrigado.

Comparando o aprofundamento radicular do milho entre os dois experimentos (Tabela 12), verifica-se diferença apenas na área não irrigada em PC. Enquanto no primeiro experimento a profundidade máxima de raízes foi de 1,05m no segundo experimento foi de 0,9m. Esta diferença, embora pequena (0,15m) reflete às distintas condições de precipitação verificadas, principalmente no início do crescimento do milho (Figuras 1 e 2). No segundo experimento, além do maior volume de água precipitada até o estabelecimento da cultura (317 GD_{acm}), que foi cerca de 47% maior que no primeiro experimento, a precipitação

foi mais concentrada (Figura 2) do que em 2001/02 (Figura 1). Isto determinou menor aprofundamento do sistema radicular do milho no segundo experimento em relação ao primeiro, como conseqüência da maior disponibilidade de água no solo (Newell & Wilhelm, 1987).

A influência da condição hídrica na profundidade máxima do sistema radicular do milho, além da resposta geotrópica que as raízes apresentam, pode ser verificada comparando-se as mesmas condições de cultivo entre os experimentos (Tabela 12). Observa-se que um mesmo aprofundamento máximo do sistema radicular ocorreu em diferentes condições de GD_{acm} ou seja, mesmo que, potencialmente, um maior acúmulo de GD favorecesse maior aprofundamento radicular, isso não aconteceu, em conseqüência da resposta das raízes ao estado hídrico do solo.

A manutenção da resposta do milho em termos de profundidade do sistema radicular entre o solo em PD e em PC, independentemente da quantidade de água adicionada via precipitação ou irrigação, mostra que o plantio direto altera a distribuição do sistema radicular, não simplesmente pela maior quantidade de água que o mesmo normalmente apresenta (Figuras 20 e 21), mas, também, por outros fatores interrelacionados. A concentração do sistema radicular mais próximo à superfície, evidenciado pelo padrão de extração de água neste trabalho e por medição do mesmo a campo, por outros autores (Newell & Wilhelm, 1987; Mello Ivo & Mielniczuk, 1999), se deve também à concentração de nutrientes nas primeiras camadas de solo (Muzilli, 1983; Falleiro et al., 2003). A adubação concentrada junto à linha de sementes e a matéria orgânica adicionada à superfície, associados ao não revolvimento do solo, mantêm uma condição mais favorável para que as raízes se concentrem nas camadas mais superficiais do solo, embora, muitas vezes, a condição física do mesmo seja mais restritiva. Neste caso, a dificuldade física é amenizada pela melhor estrutura do solo e atividade da fauna, que proporcionam condições de porosidade e retenção de água mais favoráveis ao crescimento radicular. Além disso, o fato da água estar retida em menor energia no solo em PD, em relação àquele em PC, nas camadas de solo mais próximas à superfície (Figuras 20 e 21), também contribui para que o sistema radicular se concentre nas primeiras camadas de solo, já que o gasto de energia é menor para a extração de água.

A mudança no padrão de aprofundamento das raízes entre o solo em PD e aquele em PC, em função da variação das condições hídricas, tem grande importância prática. A consideração destas variações permite melhorar a estimativa do balanço hídrico do solo, através do ajuste da capacidade de água disponível às reais condições em que a cultura se encontra. Também, os resultados permitem inferir que, no caso do PD, a prática da irrigação deve ser alterada reduzindo o volume e aumentando a frequência de rega, em relação a prática prevista para o milho em PC.

Por outro lado, os resultados da Tabela 12 permitem inferir que pode haver elevação do risco que o PD oferece ao cultivo de espécies como o milho, em determinadas condições. Por exemplo, numa situação em que a cultura se desenvolve com pleno atendimento da necessidade hídrica, ou seja, num período em que as precipitações são elevadas e frequentes no início do ciclo, o sistema radicular se concentrará mais próximo à superfície que em PC. Se, nessas condições, próximo ao florescimento se estabelecer um déficit hídrico severo, como aquele verificado ao redor de 60 DAE no segundo experimento (Figura 2), o milho em PD poderá ser afetado de forma mais severa do que em PC, cujo sistema radicular se concentra a maior profundidade.

4.9.1 Estimativa do aprofundamento do sistema radicular

Com base no aprofundamento máximo do sistema radicular, em cada sistema de manejo de solo e condição hídrica considerada, foi estimado o coeficiente Az_r da equação 15, que é o acréscimo em profundidade do sistema radicular do milho por unidade de GD_{acm} . O coeficiente Az_r variou entre os sistemas de manejo e entre experimentos, em função da profundidade máxima atingida pelo sistema radicular e de GD_{acm} para cada condição hídrica (Tabela 12). Esta variação foi decorrente das distintas condições a que a cultura do milho foi submetida, principalmente, quanto à disponibilidade de água no solo e à demanda evaporativa da atmosfera, já discutidas anteriormente.

A variabilidade do coeficiente Az_r , dentro de cada sistema de manejo (Tabela 12) foi cerca de 22% em PD e 29% em PC, conforme demonstra o coeficiente de variação. Isso mostra que o mesmo foi dependente do ambiente em que a cultura foi submetida, já que são valores relativamente elevados. Assim, o coeficiente Az_r representa cinco diferentes ambientes, o que é útil para elaborar

uma função de estimativa do aprofundamento radicular, de acordo com variáveis interrelacionadas como a precipitação e a ETo. Neste sentido, verificou-se que o coeficiente Az_r apresentou correlação negativa com a quantidade de precipitação e/ou irrigação até o florescimento do milho nos dois sistemas de manejo, sendo mais significativa em PD que em PC. O coeficiente de correlação (r) foi de -0,98 ($P > 0,002$) para PD e de -0,73 ($P > 0,156$) em PC, demonstrando melhor resposta ao efeito de PD, bem como a condições hídricas mais homogêneas neste solo, em relação a PC. Com relação a ETo, tanto em PD quanto em PC, a correlação foi menor do que aquela verificada com a precipitação, inclusive, com efeito contrário do esperado no caso de PC ou seja, ETo acumulada indicou redução no aprofundamento do sistema radicular do milho à medida que a mesma aumenta. Os coeficientes de correlação foram de 0,61 ($P > 0,272$) e de -0,61 ($P > 0,263$) para PD e PC, respectivamente.

Considerando a precipitação como a variável que mais influenciou o coeficiente Az_r , além da maior facilidade de obtenção, verificou-se que houve maior efeito da mesma na redução da profundidade do sistema radicular no milho cultivado em PD do que em PC (Figura 50). Isto mostra que, havendo água disponível, o sistema radicular do milho se aprofunda menos no solo em PD em relação a PC, principalmente, devido à melhor condição nutricional (Muzilli, 1983; Falleiro et al., 2003) e disponibilidade de água nas camadas de solo próximas à superfície (Figuras 20 e 21), conforme mencionado anteriormente.

O efeito da precipitação pluvial ou irrigação aplicada no fator Az_r para o milho foi testado para ambos sistemas de manejo de solo. A precipitação ou irrigação acumuladas até o florescimento, quando o sistema radicular pára de crescer, foi dividida pelos GD_{acm} até este estágio. Neste caso, os GD_{acm} funcionaram como uma variável de tempo, que permite estabelecer a variação que houve em Az_r para cada milímetro de água aplicada à cultura do milho. O ajuste do coeficiente Az_r à quantidade de água aplicada dividida por GD_{acm} , até o florescimento do milho, foi maior em PD do que em PC, com $r^2_{ajs} = 0,74$ ($P > 0,0391$) e $r^2_{ajs} = 0,51$ ($P > 0,4029$), respectivamente. Estes resultados reafirmam a menor variabilidade temporal das variáveis hídricas no solo em PD, em relação a PC.

Inserindo as funções que estimam Az_r , em função de P_{acm}/GD_{acm} , na equação 15, obtém-se que o aprofundamento do sistema radicular do milho pode ser estimado através das seguintes equações:

$$Z_{r(PD)} = Z_{ro} + GD_{acm} \left[0,00146524 - 0,00252089 \left(\frac{P_{acm}}{GD_{acm}} \right) \right] \quad (20)$$

$$Z_{r(PC)} = Z_{ro} + GD_{acm} \left[0,00470585 - 0,021206 \left(\frac{P_{acm}}{GD_{acm}} \right) + 0,0283854 \left(\frac{P_{acm}}{GD_{acm}} \right)^2 \right] \quad (21)$$

em que $Z_{r(PD \text{ ou } PC)}$ é a profundidade do sistema radicular num tempo qualquer “n” de crescimento do milho, Z_{ro} é a profundidade inicial do sistema radicular (0,1 m), GD_{acm} é graus-dia acumulados até o tempo “n” e P_{acm} é a precipitação ocorrida acrescida da irrigação realizada, quando for o caso, até o tempo “n”. Os demais componentes das equações 20 e 21 são constantes dos modelos linear e quadrático que estimam o valor do coeficiente Az_r da equação 15.

Analisando as funções de estimativa de Az_r , verifica-se que ocorreu um aumento em Az_r do sistema radicular do milho, à medida que a razão P_{acm}/GD_{acm} se aproximou de zero, ou seja, quando não ocorreu precipitação ou irrigação a partir da emergência do milho. A redução projetada pelo modelo para o milho em PD foi cerca de 20%, quando a cultura for adequadamente suprida de água, o que se dá próximo à razão P_{acm}/GD_{acm} em torno de 0,4. Entretanto, quando a mesma razão for próxima de zero, a redução de Az_r para a cultura em PD foi em torno de 70% (Figura 50), em relação ao PC, em função, principalmente, do maior aprofundamento das raízes que ocorreu no milho em PC. Em PC, quando a razão P_{acm}/GD_{acm} passa de 0,4 para zero, que significa um período sem precipitação desde a emergência do milho, o aprofundamento radicular aumenta em cerca de 500%, quando comparada à cultura adequadamente suprida de água.

A manutenção de uma diferença significativa do fator Az_r , quando a precipitação ou irrigação atendem às necessidades de água da cultura do milho (P_{acm}/GD_{acm} próximo de 0,4), ocorreu em função da condição nutricional mais favorável no solo em PD próximo à superfície (Muzilli, 1983; Falleiro et al., 2003). Já, a diferença verificada no fator Az_r , quando não há precipitação acumulada a partir da emergência do milho, se deve à melhor condição física do solo em PD,

principalmente, por aumento da capacidade de armazenagem e de disponibilidade de água às plantas. Assim, verifica-se que a resposta da cultura do milho à deficiência hídrica no solo é aumentar a profundidade de extração de água no perfil, desde que fatores como deficiência de aeração do solo ou resistência mecânica à penetração radicular não limitarem o crescimento radicular. Este efeito foi maior em PC do que em PD.

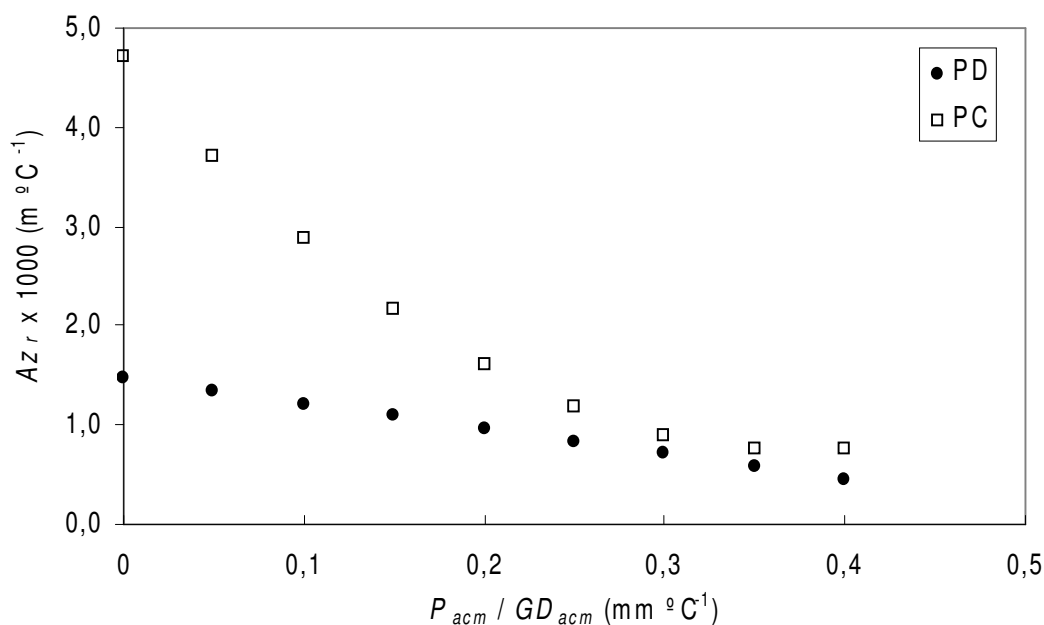


FIGURA 50. Coeficiente de aprofundamento do sistema radicular do milho (Az_r) em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função da razão entre precipitação ou irrigação acumulada (P_{acm}) e graus-dia acumulados após a emergência (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

O aumento das diferenças no fator Az_r , entre PD e PC, quando foi reduzida a quantidade de água adicionada à cultura do milho, reflete a contribuição do PD na melhoria das condições hídricas do solo, principalmente, no início do ciclo da cultura. Além disso, também está inserida neste contexto a contribuição da demanda evaporativa da atmosfera que, juntamente, com a deficiência hídrica determinam maior aprofundamento do sistema radicular do milho, principalmente em PC, como forma de atender à demanda de água pela cultura, já que, neste sistema, o solo apresenta menor disponibilidade de água do que em PD. A estimativa de aprofundamento do sistema radicular, na forma como

foi proposta, se constitui em ferramenta importante para melhorar a estimativa do balanço hídrico do solo, em função de estimativas mais precisas da CAD, tanto em PD quanto em PC.

A estimativa do fator Az_r , obviamente se torna precisa dentro dos limites em que a função inserida nas equações 20 e 21 foram ajustadas. Para ambos sistemas de manejo, as mesmas são adequadas na condição de precipitação ou irrigação acumuladas em torno de 350mm até o florescimento do milho, e cujo acúmulo de GD esteja entre 800^oC e 900^oC. Entretanto, considerando que a evapotranspiração máxima do milho até o florescimento é cerca de 180mm (Matzenauer et al., 2002) e que o acúmulo de GD para o florescimento do milho situa-se próximo a 900^oC, pode-se considerar que as funções de estimativa de Az_r inseridas nas equações 20 e 21 são representativas para todas as situações em que a razão P_{acm}/GD_{acm} até o florescimento seja inferior a 0,4. Contudo, para sua aplicação numa condição diferente daquela em que foi feito o ajuste, a função deve ser validada, considerando que o solo não apresente outros fatores limitantes ao aprofundamento radicular, sejam físicos ou químicos.

4.9.2 Verificação dos modelos de aprofundamento do sistema radicular do milho

A resposta preditiva dos modelos 20 e 21 foi testada com dados independentes de aprofundamento do sistema radicular do milho, obtidos por tensiometria, em ambos sistemas de manejo.

Devido à grande quantidade de precipitação ocorrida no início do ciclo do milho, nos dois experimentos (Figuras 1 e 2), a estimativa de aprofundamento do sistema radicular, feita a partir de leituras em tensiômetro, apenas foi possível para as profundidades a partir de 0,3m. Os valores medidos e estimados, para PD e PC, considerando os cinco ambientes estabelecidos anteriormente, podem ser observados na Figura 51.

Tanto o ajuste em torno da linha 1:1 quanto em torno da reta de regressão foi melhor entre os valores medidos e estimados para o sistema PD, comparado ao PC (Figura 5). Os coeficientes angulares e lineares para PD não diferiram, significativamente, de 1 e de zero pelo teste t a 5% de probabilidade de erro, conforme o desejado. Em PC observou-se o contrário, ou seja, os

coeficientes angular e linear foram diferentes de 1 e de zero pelo teste t a 5% de probabilidade. Isto indica que apenas o modelo gerado sob condição de PD tem capacidade preditiva adequada para ser utilizado. A falta de adequação do modelo gerado para o PC, provavelmente, ocorreu pelo fato da maior variabilidade temporal da θ_v do solo, verificada sob este sistema de manejo. Além disso, em longas estiagens a ascensão capilar da água pode transferir umidade a partir de camadas subjacentes às raízes. Nestas condições os modelos poderão não ter precisão na estimativa do aprofundamento das raízes, devido à margem de erro associada à tensiometria (Müller, 2001). Este pode ser o fator que determinou a falta de ajuste à linha 1:1 do modelo gerado para o milho cultivado sob PC, devendo, por isso, ser testado numa outra condição de cultivo.

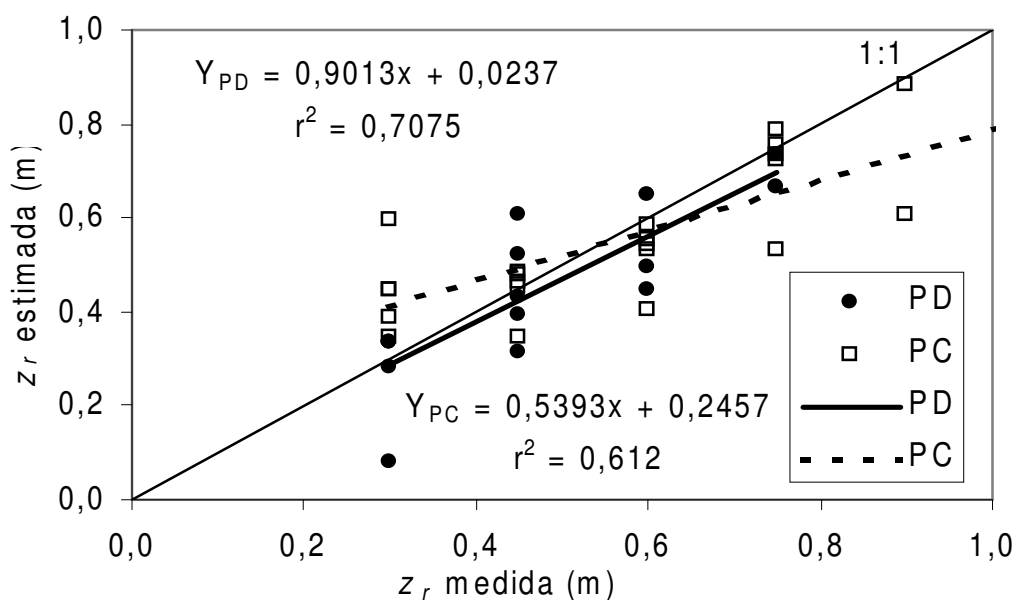


FIGURA 51. Profundidade radicular do milho (z_r) cultivado em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), medida através do acompanhamento da variação do potencial matricial da água no solo, e estimada pelas equações 20 e 21. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Para o caso do PD foi observado que o modelo, em média, estimou a extração de água do solo pelo milho a 0,3m de profundidade já com 29 DAE, enquanto, que, na profundidade de 0,45m, a extração de água foi atingida a 40 DAE. Já nas profundidades de 0,6m e 0,75m, a presença de raízes foi verificada

em 46 DAE e 55 DAE, respectivamente. Resultados muito semelhantes foram obtidos por Müller (2001) com milho em solo em PC.

4.10 Evaporação da água na superfície do solo

4.10.1 Caracterização geral dos períodos de medição

A E_s em PD e PC foi avaliada durante 13 períodos de secagem do solo, sendo oito no experimento de 2001/02 e cinco em 2002/03. No total, foram obtidos 61 valores de E_s , em ambos sistemas de manejo, envolvendo um período de 79 dias, considerando as medições feitas na área que não recebia irrigação. Na área que recebeu irrigação, o número de períodos, o total de valores e o número total de dias envolvidos foram menores. Estes períodos e demais informações podem ser observados na Tabela 13.

Na Tabela 14 é apresentada a θ_v em PD e PC, no primeiro dia de cada ciclo de avaliação, referente à Tabela 13. Isto foi feito para a área mantida sem plantas e para aquela cultivada com milho, com e sem irrigação, cujo início dos ciclos coincidiam.

Analisando a Tabela 14, verifica-se que a θ_v no primeiro dia após o início TSS (Tabela 13) quase sempre foi maior no interior dos microlisímetros em PD, comparado àquele em PC, independente da condição da superfície, ou seja, com ou sem presença de plantas e aplicação de irrigação. As diferenças máxima e mínima de umidade, entre PD e PC, foram observadas na área com plantas irrigada e sem irrigação, respectivamente. Na maior diferença o solo do interior dos microlisímetros em PD apresentou umidade cerca de 44% maior do que em PC, enquanto que a diferença mínima foi de apenas 0,5%. As mesmas foram verificadas no primeiro e sexto períodos de medição, respectivamente (Tabela 14).

Quando iniciaram os ciclos de avaliação da E_s , a umidade do solo no interior dos microlisímetros esteve próxima à CC média das primeiras camadas de solo (Tabela 3). Até a profundidade de 0,15m, a CC para o solo em PD foi de $0,263\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ e de $0,278\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ para aquele em PC (Tabela 3), na média dos dois métodos de medição. A proximidade entre esses valores médios de CC e da umidade no interior dos microlisímetros foi mais elevada quando os ciclos de avaliação da E_s (ciclos de secagem do solo) iniciaram um a dois dias após a precipitação, tempo suficiente para drenagem natural do solo.

TABELA 13. Ciclos de avaliação da evaporação da água na superfície do solo com respectivos números de medidas feitas, total de dias envolvidos e tempo de secagem do solo (*TSS*) em que foram iniciadas as medições, a equivalência em relação aos dias após a emergência do milho (*DAE*) e graus-dia acumulados (*GD_{acm}*) pela cultura. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Nº	Ciclos de Avaliação	Nº Leituras	Total Dias	DAE (dias)	<i>GD_{acm}</i> (°C)	<i>TSS</i> (dias)
1º	07/12/01 a 19/12/01	11	12	14	178	1
2º	23/12/01 a 28/12/01	4	5	30	404	2
3º	02/01/02 a 04/01/02	3	3	40	554	2
4º	09/01/02 a 20/01/02	10	11	47	662	4
5º	26/01/02 a 29/01/02	2	3	64	932	2
6º	02/02/02 a 04/02/02	2	2	71	1044	2
7º	11/02/02 -	1	1	80	1162	1
8º	14/02/02 a 26/02/02	6	12	83	1209	2
9º	20/12/02 -	1	1	18	271	1
10º	26/12/02 a 09/01/03	10	14	24	353	2
11º	13/01/03 a 16/01/03	2	3	42	643	3
12º	24/01/03 a 04/02/03	8	11	53	822	1
13º	10/02/03 -	1	1	79	1252	1
TOTAL		61	79			

OBS: Em *GD_{acm}* e *DAE*, os valores correspondem ao primeiro dia do início das medições de cada período.

Analisando a frequência desta aproximação, verificou-se que a mesma foi maior para PD do que para PC. Em vários dos ciclos de avaliação da *Es*, que iniciaram até dois dias após a precipitação, a umidade do solo no interior dos microlisímetros em PD superou a CC média de $0,263 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que, para PC a umidade do solo no interior dos microlisímetros foi maior do que $0,278 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ apenas em alguns períodos (Tabela 14). Isto foi verificado independente da condição irrigada ou não irrigada e da presença ou ausência de plantas, bem como da variabilidade da precipitação ocorrida (Figuras 1 e 2), antes do início de cada período de avaliação (Tabela 13). No início de cada período a precipitação oscilou entre um mínimo de 9mm e um máximo de 46mm.

As diferenças na umidade do solo interno, entre os microlisímetros em PD e PC, mostram que, no início do processo de evaporação, o solo em PD apresentou maior disponibilidade de umidade para atender a demanda

evaporativa da atmosfera. Isto corresponde aos resultados mostrados, anteriormente, nas avaliações feitas em laboratório e na evolução do Ψ_m a campo, em que a θ_v em PD foi superior do que em PC. Além disso, a proximidade entre a CC do solo dentro dos microlisímetros e no ambiente externo, principalmente em PD, assegura a representatividade das medidas de E_s feitas com esta metodologia.

A quantidade de solo e a densidade média do mesmo no interior dos microlisímetros, em PD e PC, são apresentadas no Apêndice 24.

TABELA 14. Umidade do solo, em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), no interior dos microlisímetros no primeiro dia de início de cada ciclo de determinação da evaporação, em presença e ausência de plantas, (com e sem irrigação). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Nº Ciclo	Umidade do solo ($m^3 m^{-3}$)							
	Área sem irrigação				Área irrigada			
	Sem plantas		Com plantas		Sem plantas		Com plantas	
	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC
1º	0,267 a	0,234 b	0,268 a	0,250 a	0,282 a	0,221 b	0,324 a	0,224 b
2º	0,259 a	0,264 a	0,258 a	0,254 a	0,274 a	0,234 b	0,273 a	0,239 b
3º	0,203 a	0,221 a	0,213 a	0,205 a	0,237 a	0,194 b	0,240 a	0,213 a
4º	0,196 a	0,194 a	0,213 a	0,182 b	0,211 a	0,174 b	0,226 a	0,195 a
5º	0,285 a	0,260 a	0,248 a	0,215 a	0,287 a	0,226 b	0,278 a	0,238 b
6º	0,205 a	0,217 a	0,208 a	0,207 a	0,227 a	0,193 b	0,241 a	0,191 b
7º	0,241 b	0,267 a	0,233 a	0,228 a	0,264 a	0,245 b	0,284 a	0,224 b
8º	0,225 a	0,229 a	0,229 a	0,222 a	0,244 a	0,217 b	0,272 a	0,212 b
9º	0,262 a	0,231 b	0,329 a	0,284 b	0,280 a	0,242 a	0,343 a	0,281 b
10º	0,247 a	0,203 b	0,307 a	0,279 b	0,255 a	0,202 b	0,329 a	0,271 b
11º	0,201 a	0,155 b	0,230 a	0,174 b	0,201 a	0,164 a	0,276 a	0,211 b
12º	0,253 a	0,210 b	0,271 a	0,232 b	0,252 a	0,218 a	0,301 a	0,273 b
13º	0,258 a	0,228 a	0,254 a	0,262 a	0,276 a	0,264 a	0,321 a	0,294 a

OBS: As letras comparam os sistemas PD e PC dentro de cada condição da superfície e ciclo de secagem do solo; Valores umidade do solo, seguidos pela mesma letra em cada condição específica, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

4.10.2 Efeito dos sistemas de manejo do solo

Para avaliar o efeito dos sistemas de manejo PD e PC sobre E_s foram selecionados cinco ciclos de secagem (Tabela 13), sendo três do primeiro

experimento (primeiro, quarto e oitavo) e dois do segundo experimento (décimo e décimo segundo). O critério utilizado para a seleção foi o maior número de valores de *Es* medidos (Tabela 13), para permitir uma avaliação da evolução temporal do processo de *Es*, o que é conseguida através de ciclos mais longos. Além disso, eles representam a tendência média de todo o conjunto de valores que foram obtidos durante a realização dos experimentos.

Nas Figuras 52 e 53, esta apresentada a *Es* ocorrida nos ciclos selecionados, para o primeiro e segundo experimentos, respectivamente. Verificou-se que, em três dos cinco períodos selecionados, *Es* foi maior em PC do que em PD, no primeiro ou até no segundo dia após o início da contagem do *TSS* (Figuras 52a, 52c e 53 b). A partir do segundo ou terceiro dia após o início das medições, *Es* passou a ser mais elevada no solo em PD, comparado a PC. Isto pode ser verificado no quarto e décimo períodos avaliados (Figuras 52 e 53), que se iniciaram quatro e dois dias após o início da contagem do *TSS*, respectivamente.

Considerando *Es* no primeiro ou até no segundo dia após o início do *TSS* (Figuras 52a, 52c e 53 b), a mesma foi cerca de 77% em PD, em relação àquela verificada em PC, apresentando CV de 11,4% e 8,2%, respectivamente. A diferença entre os sistemas foi estatisticamente significativa no primeiro e décimo segundo períodos avaliados (Figuras 52a e 53 b), exatamente naqueles em que as medições iniciaram no primeiro dia do *TSS* (Tabela 13). No oitavo ciclo de secagem (Figura 52b) a diferença de *Es* não foi significativa entre PD e PC, provavelmente, devido ao período de avaliação ter iniciado dois dias após a precipitação, quando o processo de *Es* já apresentava tendência de inversão, ou seja, *Es* ser maior em PD do que em PC.

A inversão na perda de água por *Es* entre os sistemas PD e PC ocorreu a partir do segundo ou terceiro dia (Figuras 52 e 53) após o início do *TSS*. Nesse momento *Es* em PD passou a ser cerca de 26% maior, em relação àquela em PC (Figuras 52a, 52c, 53a e 53b), cuja inversão foi verificada no segundo ou terceiro dia após o início do *TSS*. Entretanto, este valor oscilou entre 8% a 35%, determinando diferenças significativas apenas no décimo e décimo segundo períodos (Figuras 53a e 53b), as quais foram as mais elevadas entre os sistemas de manejo. Isto pode ser atribuído aos valores mais elevados de umidade no solo

no interior dos microlisímetros em PD, bem como às diferenças mais acentuadas da mesma nesses períodos, em relação a PC (Tabela 14).

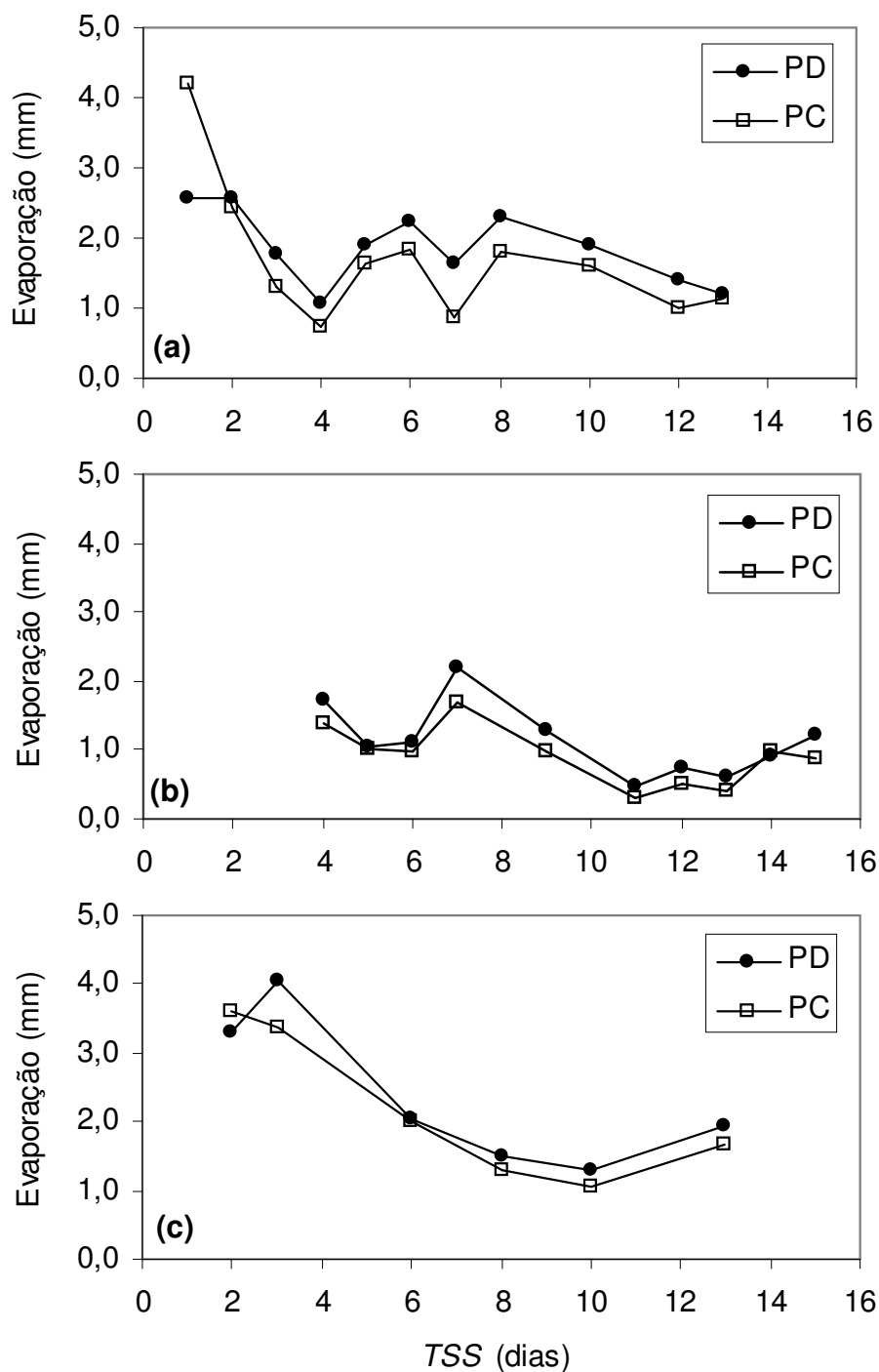


FIGURA 52. Evaporação da água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no primeiro (a), quarto (b) e oitavo (c) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada, sem plantas. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

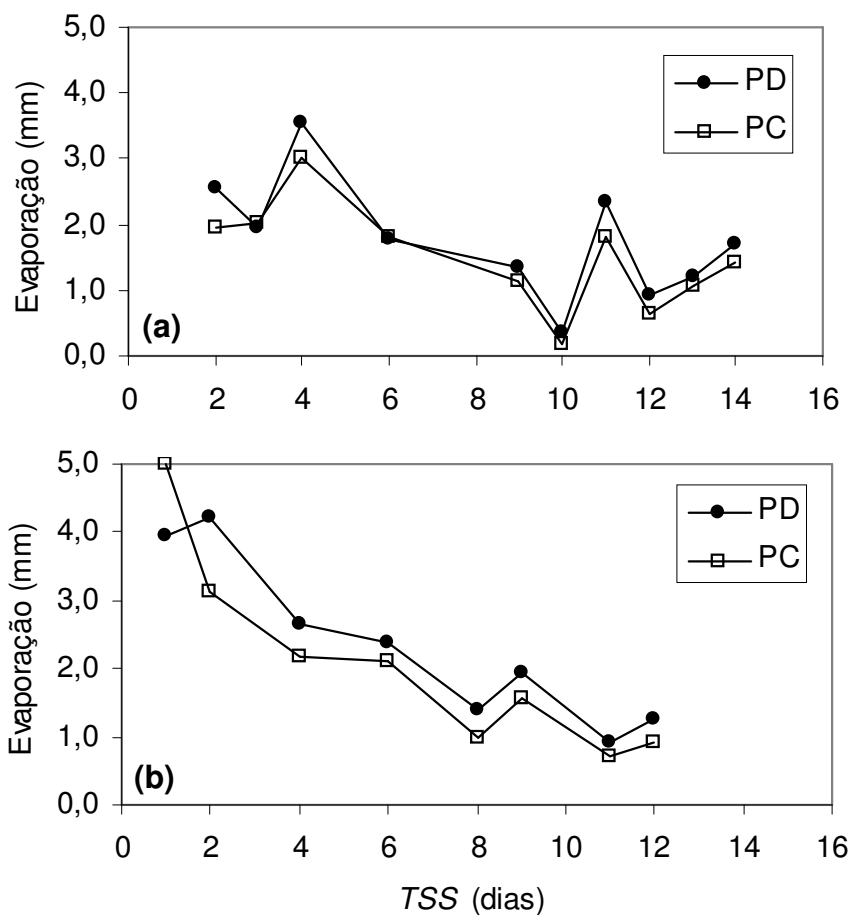


FIGURA 53. Evaporação da água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no décimo (a) e décimo segundo (b) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada, sem plantas. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

Na inversão da tendência, E_s apresentou CV menor em PD (CV = 10,3%) e mais elevado em PC (CV=11,4%), em relação àqueles verificados para E_s no primeiro dia após a precipitação. Isto indica aumento da variabilidade de E_s em PC, ao mesmo tempo em que mostra uma maior homogeneidade deste processo em PD, à medida que o mesmo evolui no tempo. Por outro lado, tais resultados também concordam com outros já apresentados e que mostram maior homogeneidade de variáveis hídricas no solo em PD, comparando a PC.

Após ocorrida a inversão de E_s , verificou-se que a tendência assumida pelo processo se manteve até o final dos períodos de secagem do solo (Figuras 52 e 53). Em 92% das medidas feitas após a inversão, E_s foi mais elevada em PD do que em PC, oscilando entre uma diferença mínima de 3% e uma máxima de

89%, como consequência da variabilidade da umidade do solo no interior dos microlisímetros (Tabela 13) e das condições meteorológicas (Figuras 1 e 2, Apêndices, 8 e 11).

Na média dos valores após a inversão, *Es* foi de 1,3mm dia⁻¹ em PD e de 1,1mm dia⁻¹ em PC, enquanto na inversão da tendência (dois ou três dias após *TSS*) a mesma foi, em média, de 3,4mm dia⁻¹ em PD e de 2,7mm dia⁻¹, em PC. Por outro lado, logo após o início do *TSS* (um até dois dias após *TSS*), *Es* média dos ciclos de avaliação foi de 3,3mm dia⁻¹ em PD e 4,3mm dia⁻¹ no solo em PC (Figuras 52 e 53).

A tendência verificada no processo de *Es* entre o PD e o PC, apresentada nas Figuras 52 e 53, pode ser explicada pela associação de duas condições importantes no condicionamento deste processo, que são a disponibilidade de energia incidente e de umidade na superfície do solo.

O fato da *Es* ser maior no primeiro dias após a precipitação em PC, pode ser atribuída à umidade mais elevada no solo nesse sistema de manejo, comparado a PD, devido à redução da infiltração de água provocada, principalmente, pelo selamento superficial que se forma em solos desprovidos de proteção na superfície (Baumhardt et al., 1993; Barcelos et al., 1999). Nesta condição, havendo disponibilidade de energia, a *Es* ocorre sem restrição (estágio 1), conforme preconizado por Lemon (1956) e, portanto, será mais alta no solo que tiver maior teor de umidade na camada próxima à superfície.

A inversão verificada após o segundo ou terceiro dia do início do *TSS* é explicada pelo aumento da resistência ao processo de *Es* que ocorre em PC. Em PD, ao contrário, *Es* se mantém no estágio 1 por mais tempo (Lemon, 1956), uma vez que este solo apresenta maior retenção de água, principalmente, na camada mais próxima à superfície (Figuras 13 e 15). Além da maior umidade deste solo, a manutenção da *Es* mais elevada no solo em PD, com a evolução do *TSS*, está relacionada com a presença da palha na superfície, que impede o impacto direto das gotas de chuva, evitando a formação do selamento superficial (Barcelos et al., 1999). Ao mesmo tempo, a palha retarda a secagem da superfície do solo, mantendo a *Es* em PD no estágio 1 por mais tempo, conforme modelo de Lemon (1956) e resultados de campo obtidos por Idso et al. (1974). Além disso, a palha mantém a continuidade dos poros, facilitando a condução de água do interior do perfil para alimentar o processo de *Es*, desde que tenha energia disponível. Tais

afirmações apresentam embasamento físico, pois, quando se estabelece uma camada de solo mais seca próximo à superfície, esta forma uma espécie de isolamento da mesma em relação à atmosfera, funcionando como se fosse a palha adicionada sobre o solo (Phillips, 1984).

Baseado nos resultados apresentados, verifica-se que uma quantidade de palha da ordem de $5,0\text{Mg ha}^{-1}$, num primeiro momento, não apresenta efeito significativo na redução de E_s , conforme preconizado por Bragagnolo & Mielniczuk (1990b). Isto, provavelmente, se deve ao baixo volume adicionado e à distribuição não uniforme da mesma, não cobriu totalmente o solo (Apêndice 7). Além do mais, a palha perde rapidamente o seu poder refletor a cerca de 30 a 35 dias após o acamamento da mesma, conforme mostrado por Dalmago et al. (2004a) e por outros autores (Wagner-Riddle et al., 1996). Isto indica que, após este tempo, a disponibilidade de energia na superfície do solo em PD e PC é muito semelhante, favorecendo o processo de evaporação em PD, por apresentar maior disponibilidade de água nas camadas rente à superfície. A redução da refletância da palha e, portanto, o aumento da energia absorvida pela superfície do solo em PD, também foi verificada pela alteração na dinâmica térmica do solo ao longo do tempo, através do fluxo de calor no solo (Dalmago et al., 2004a) e da temperatura do solo (Comiran et al. 2003; Dalmago et al., 2004b), observados em trabalhos paralelos.

4.10.3 Evaporação acumulada

A E_s , acumulada durante um período, permite uma visualização mais adequada da perda de água em cada sistema de manejo. Esta avaliação se faz necessária, uma vez que um determinado sistema de manejo pode favorecer a perda de grande quantidade de água no início do processo de E_s e, após, manter-se com taxas menores do que em outro sistema, o que leva a interpretações equivocadas da dinâmica deste processo. A E_s acumulada nos períodos de avaliação selecionados no item anterior pode ser verificada nas Figuras 54 e 55.

Analisando as Figuras 54 e 55, verifica-se que, em todos os períodos selecionados, a E_s acumulada foi maior em PD do que em PC, confirmando as tendências apresentadas anteriormente. A diferença variou de 9,1% no oitavo (Figura 54c) a 25% no quarto período (Figura 54b), sendo que a mesma não foi significativa apenas no oitavo período de avaliação (Figura 54c). Também neste

caso, o CV foi menor para *Es* acumulada em PD, em relação a PC, sendo da ordem de 5,3% e 7,2%, respectivamente. A média de *Es* acumulada entre os períodos selecionados (Figuras 54 e 55) foi de 16,5mm em PD e de 14,5mm em PC, para um período médio de avaliação de 12 dias (Tabela 13).

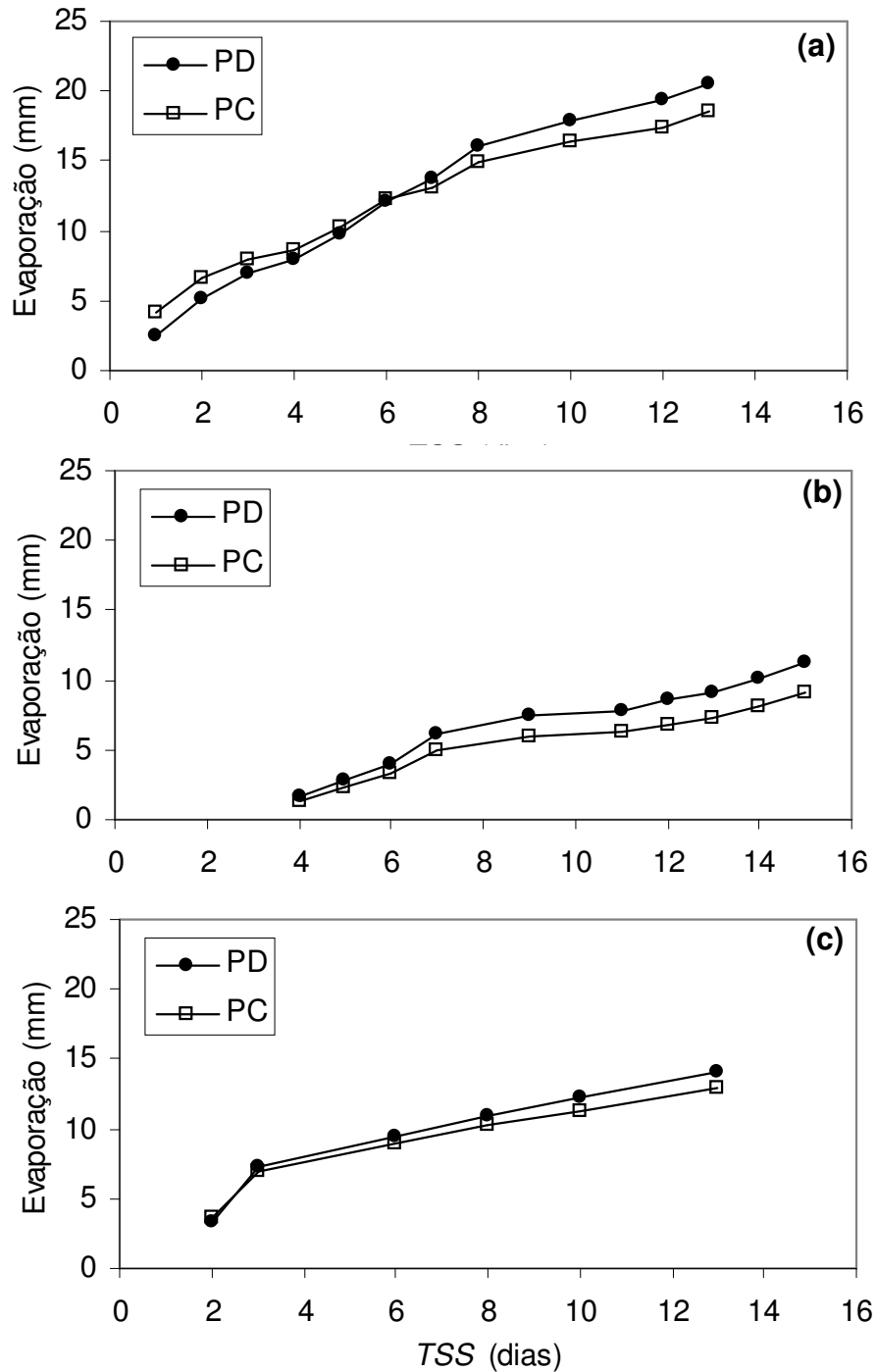


FIGURA 54. Evaporação acumulada de água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no primeiro (a), quarto (b) e oitavo (c) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

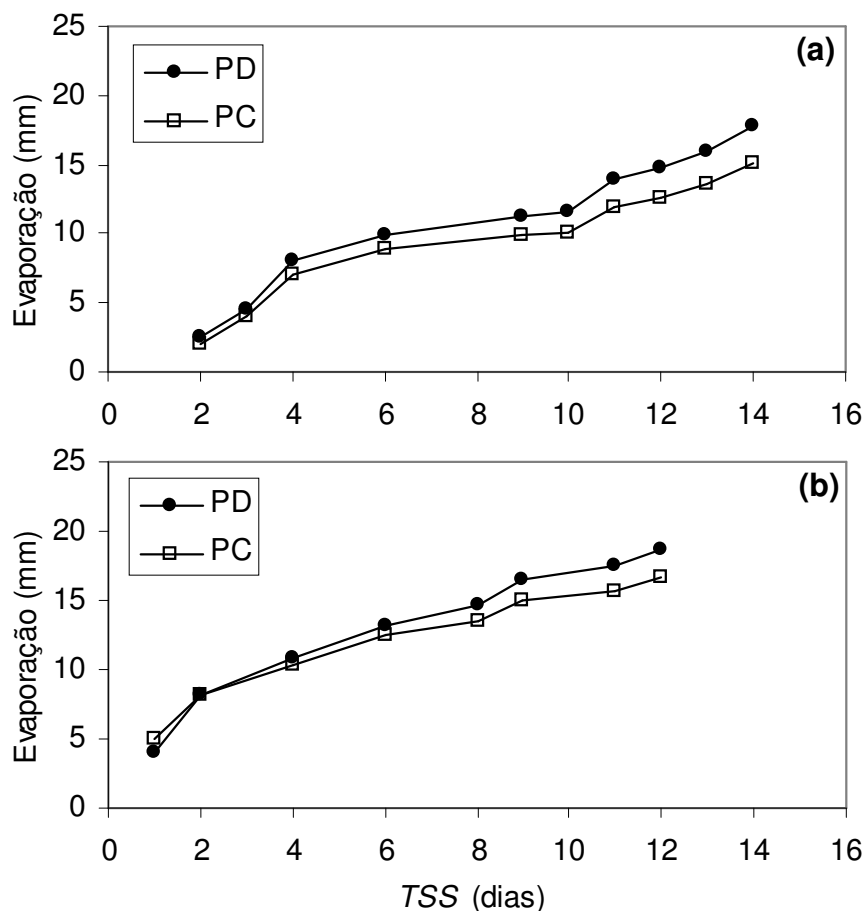


FIGURA 55. Evaporação acumulada de água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) no décimo (a) e décimo segundo (b) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, na área não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002/03.

A maior E_s acumulada em PD, em relação a PC, não apenas confirma as tendências de evolução verificadas nas Figuras 52 e 53, como também mostra que o processo segue as pressuposições do modelo teórico de Lemon (1956), discutidas por Phillips (1984). De acordo com Phillips (1984), a palha mantém a E_s no solo em PD no estágio 1 por mais tempo, em relação a PC. Isto faz com que, num período prolongado sem precipitação, E_s acumulada num solo com “muching”, tipo aquele formado pela palha em PD, pode ser maior do que a E_s acumulada no PC. Esta tendência pode ser nitidamente verificada na Figura 54a, em que, sete dias após o início do TSS, E_s acumulada em PD passou a ser maior do que em PC.

4.10.4 Efeito da palha sobre o solo na redução da evaporação

Embora os resultados apresentados mostrem que a *Es* é maior em PD do que em PC, após o segundo ou terceiro dia do início do processo, ainda faltam evidências conclusivas a respeito de quais fatores apresentam maior influência neste processo. Está claro que o aumento na retenção e disponibilidade de água nas camadas mais próximas à superfície do solo em PD, em relação ao PC, é um fator importante no aumento de *Es* neste sistema de manejo. Entretanto, a contribuição da palha na redução de *Es* ainda não foi avaliada, a qual é significativa, segundo Bond & Willis (1969) e Bragagnolo & Mielniczuk (1990b).

Para atender esta necessidade, em três dos cinco períodos selecionados da Tabela 13 a *Es*, foi normalizada pela umidade média do solo no interior dos microlisímetros de cada dia de medição. Isto foi feito, dividindo-se a *Es*, em cada sistema de manejo, pela umidade média do solo no inteiro dos microlisímetros e após o valor foi multiplicado pela média entre os sistemas de manejo. Desta forma, isolou-se o efeito da umidade no solo na variabilidade da *Es* entre os sistemas de manejo, para evidenciar a contribuição da presença da palha na superfície do solo sobre a redução de *Es*. Foram selecionados o primeiro, o décimo e o décimo segundo períodos de avaliação, pelas medições de *Es* terem iniciadas no primeiro dia após o início do TSS, cujos resultados encontram-se na Figura 56.

Analisando a Figura 56, verifica-se que, uma vez isolado o efeito da umidade do solo no interior dos microlisímetros, a *Es* passou a ser maior em PC do que em PD. A diferença entre PD e PC foi maior no décimo segundo ciclo de avaliação (Figura 56c), em relação aos demais, devido à maior diferença na umidade média do solo no interior do microlisímetros, entre os sistemas de manejo. Enquanto em PD a umidade do solo nos microlisímetros foi de $0,179\text{m}^3\text{ m}^{-3}$, $0,165\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ e $0,176\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ para o primeiro, décimo e décimo segundo períodos de avaliação, respectivamente, em PC a umidade média foi de $0,165\text{m}^3\text{ m}^{-3}$, $0,136\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ e $0,141\text{m}^3\text{ m}^{-3}$, respectivamente.

A tendência verificada na Figura 56 mostra que a palha, na superfície do solo, apresenta efeito de redução da *Es* se a umidade entre os ambientes for semelhante. Possivelmente, o efeito da palha poderá ser mais significativo se grandes quantidades forem adicionadas à superfície e esta estiver bem distribuída sobre o solo. Nessas condições, a camada de isolamento será maior,

aumentando também o espaço, através do qual, o vapor d'água deverá ser transportado por difusão, o que é um processo de transporte mais lento que a convecção, que ocorre sobre a palha.

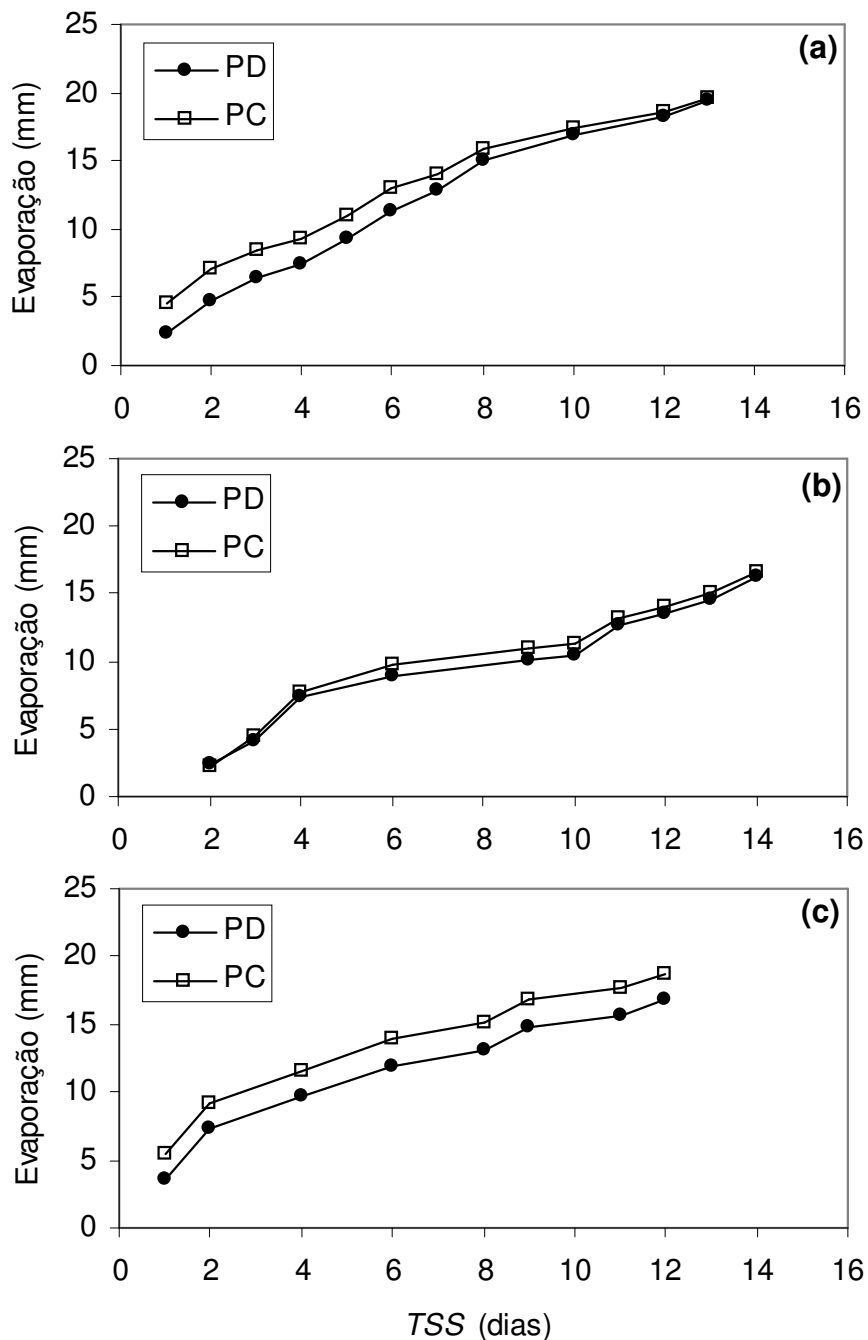


FIGURA 56. Evaporação acumulada de água na superfície do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), normalizada pela umidade do solo interno dos microlisímetros, no primeiro (a), décimo (b) e décimo segundo (c) ciclos de secagem do solo, apresentados na Tabela 13, para a área não irrigada. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Por outro lado, os resultados também servem para mostrar que o aumento da *Es* no solo em PD, comparado a PC, se deve ao aumento da capacidade de retenção e disponibilidade de água no solo deste sistema de manejo. Portanto, fica comprovado que o efeito da palha na redução de *Es* do solo em PD é pequeno, principalmente, se este solo tiver aumentado sua capacidade de retenção e disponibilidade de água e se a quantidade de palha adicionada for pequena. Também, está mostrado que o processo é dinâmico e complexo, mediado pela disponibilidade de energia radiante ou advectiva e pela disponibilidade de água na superfície.

4.10.5 Influência de outros fatores na evaporação da água na superfície do solo

Considerando a estrutura dos trabalhos experimentais conduzidos, outros fatores que poderiam influenciar o processo de *Es* são a irrigação e a presença de plantas na superfície. Devido aos objetivos deste trabalho, cujas diferenças de *Es* entre os sistemas PD e PC foi o foco principal, optou-se pelas avaliações de *Es* na área sem plantas e não irrigada (Apêndice 2). Isto se deve ao fato de que, nessas áreas a influência dos sistemas sobre esta variável é mais evidente, permitindo ciclos de avaliação mais longos. Entretanto, algumas considerações sobre a influência destes dois fatores podem ser feitas.

A irrigação funcionou como meio de reduzir a variabilidade de parâmetros hídricos do solo entre PD e PC, conforme foi verificado na análise da evolução temporal do Ψ_m (Figuras 22 e 23 e Apêndice 17). Isto também foi verificado na *Es* diária, mas foi observado de forma mais significativa na *Es* acumulada. Na média dos cinco períodos de avaliação selecionados (Tabela 13), a diferença de *Es* acumulada entre PD e PC, na área não irrigada, foi cerca de 17%, enquanto na área irrigada a mesma foi em torno de 13%. A redução das diferenças na área irrigada ocorreu porque a irrigação interrompeu o processo de *Es*, fazendo com que o mesmo reiniciasse várias vezes, dentro de um mesmo ciclo de secagem do solo.

A influência da presença de plantas de milho sobre a *Es* foi explorada nos resultados preliminares apresentados por Dalmago et al. (2003a). De acordo com esses resultados, no início do crescimento das plantas a tendência de *Es*, entre PD e PC, se manteve semelhante à área sem plantas. Com o crescimento

da cultura do milho, a diferença de *Es* entre os sistemas de manejo foi reduzida para cerca de 40%, no primeiro dia após uma precipitação (oscilando entre 30% e 60%), e para valores entre 0% e 10% ao final do ciclo de secagem do solo.

Dalmago et al. (2003a) também verificaram que, no início do crescimento linear do milho, a *Es* média foi de 25% a 40% da ETm. Depois de atingida a máxima área foliar (em torno da floração), a participação média de *Es*, foi reduzida para cerca de 15% de ETm, aumentando novamente para, aproximadamente, 40% de ETm no enchimento de grãos. Segundo os autores a redução de *Es*, na floração do milho, se deve ao sombreamento do solo pela cultura, reduzindo a *Es* por limitar a quantidade de radiação incidente sobre o solo. Por outro lado, o aumento da participação de *Es* em ETm, no enchimento de grãos, se deve à senescência progressiva das folhas do milho, que permitiu maior quantidade de radiação transmitida à superfície do solo, aumentando a evaporação, bem como diminuiu a contribuição da transpiração.

No mesmo trabalho (Dalmago et al., 2003a) também se encontra uma análise preliminar da relação entre *Es* na superfície do solo em PD e PC com ETo.

4.11 Dinâmica físico-hídrica no sistema plantio direto e respostas das plantas

Neste estudo, foi observado que o PD afetou propriedades físicas do solo, em algumas profundidades no perfil. Houve aumento na retenção e na disponibilidade de água nas camadas mais próximas à superfície, principalmente, devido ao aumento da porosidade de retenção de água, já que não foram observadas diferenças significativas na taxa de infiltração.

A distribuição do tamanho de mesoporos em classes de maior diâmetro, no solo em PD, em comparação a PC, também contribuiu para o aumento da disponibilidade de água às plantas em PD, o que implica em menor gasto de energia para sua absorção. Entretanto, o aumento da disponibilidade hídrica nas camadas de solo mais próximas à superfície também foi influenciada pela *K_o* e não saturada do solo em PD, que foi, geralmente, mais elevada neste sistema de manejo.

As variáveis estáticas, que condicionaram maior disponibilidade hídrica no solo em PD, em relação a PC, também determinaram uma melhor condição

hídrica do mesmo durante a evolução temporal, observada durante o ciclo da cultura do milho. As pequenas tendências, mesmo que não significativas sob o ponto de vista da estatística, mas que se mantiveram ao longo do tempo, foram importantes, pois determinaram variações no processo de extração de água do solo entre o milho cultivado em PD e aquele em PC. A maior disponibilidade hídrica do solo em PD garantiu um melhor estado hídrico das plantas de milho em PD, comparado a PC (Bianchi, 2004), o que é importante para outros processos ligados à produção das plantas. Por outro lado, isso não proporcionou alterações fenométricas e fenológicas significativas na cultura do milho, mas alterou a dinâmica de processos, como a interceptação de *RFA* (Bergamaschi et al., 2004) e o balanço térmico do solo (Comiran et al., 2003; Dalmago et al., 2004a; Dalmago et al., 2004b).

Dada a variabilidade das condições meteorológicas durante a execução dos experimentos e a evolução temporal do Ψ_m , em diferentes ambientes formados pela integração dos fatores sistema de manejo e irrigação, foi possível identificar diferenças na profundidade máxima do sistema radicular do milho. Esta resposta apresentada pela cultura, como consequência de mudanças na dinâmica hídrica e nutricional nas primeiras camadas de solo em PD, é de fundamental importância para o entendimento dos processos envolvidos, bem como para ajustes de índices e modelos gerados em PC.

Também ficou evidente que a redução da *Es* do solo em PD não ocorre na forma preconizada por inúmeros trabalhos na literatura. O aumento da umidade verificado neste sistema de manejo é decorrente do aumento do espaço de armazenagem de água, principalmente, nas camadas mais próximas à superfície. Em função disso, é fácil entender que o PD não apresenta maior disponibilidade de água porque a evaporação seria menor, já que evapora mais por ter maior quantidade de água para alimentar o processo. Isto foi reforçado por resultados que demonstram redução da reflectância da superfície do solo em PD, apenas até 30 a 35 dias após o acamamento da palha (Dalmago et al., 2004a).

Os resultados apresentados neste trabalho reforçam a idéia de integração de variáveis, como forma de entender processos dinâmicos e complexos ligados ao contínuo solo-planta-atmosfera e que apresentam evolução temporal, como aqueles sob PD. Pequenas tendências que se mantêm ao longo do tempo e em diversas variáveis, são indicações fortes no sentido de qualificar

um determinado sistema. Por outro lado, a pequena diferença na dinâmica de processos entre PD e PC não subsidiam afirmações que colocam estes dois sistemas de manejo em extremos opostos. É evidente, sem dúvida, que o PD reduz riscos e contribui para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, mais do que o PC.

5. CONCLUSÕES

O plantio direto altera as propriedades físicas do solo, em relação ao preparo convencional aumentando a armazenagem de água no solo, sendo esse efeito mais acentuado nas camadas próximas a superfície.

A mesoporosidade do solo é aumentada pelo plantio direto, apresentando relação inversa com a densidade, a macro e a microporosidade e relação direta com a porosidade total do solo.

O tamanho de mesoporos segue uma distribuição exponencial no solo em plantio direto, com maior frequência na subclasse de maior diâmetro. Em preparo convencional a maior quantidade de mesoporos ocorre na subclasse de diâmetro médio, seguindo uma distribuição normal.

A infiltração de água no solo, avaliada pelo método dos anéis concêntricos, não difere entre plantio direto e preparo convencional ao final do ciclo das culturas de cobertura de inverno.

A condutividade hidráulica do solo saturado está relacionada com a macroporosidade.

A condutividade hidráulica do solo não saturado é maior em plantio direto, principalmente, nas camadas com maior mesoporosidade.

A retenção de água no solo é maior em plantio direto do que em preparo convencional, nas camadas mais próximas à superfície. As diferenças entre os sistemas de manejo são maiores em potenciais matriciais mais elevados.

Em plantio direto há um valor menor de umidade no solo em capacidade de campo, como também no ponto de murcha permanente, comparado ao preparo convencional.

A umidade do solo na capacidade de campo corresponde a um potencial matricial de $-0,006\text{MPa}$, tanto em plantio direto quanto em preparo convencional.

A disponibilidade de água às plantas é maior em plantio direto do que em preparo convencional, nas camadas de solo próximas à superfície. Nessas camadas a maior parte da água no solo está retida até o limite de rompimento da coluna de mercúrio dos tensiômetros ($-0,08\text{MPa}$).

O plantio direto amplia a fração “p” de água disponível no solo, em relação ao preparo convencional.

O avanço da frente de secagem do solo é mais lento em plantio direto do que em preparo convencional, apresentando mesmo padrão de secagem do solo, o qual ocorre da superfície para o interior do perfil. Esta diferença é ampliada ou reduzida de acordo com as condições de demanda evaporativa atmosférica.

Modelos matemáticos podem simular a redução do potencial matricial com o tempo de secagem do solo. Porém, os mesmos diferem entre os sistemas de manejo e entre profundidades no perfil, em função da intensidade de secagem de cada camada de solo.

O padrão de extração de água pelo milho varia entre estádios da cultura, tanto em plantio direto quanto em preparo convencional. No enchimento de grãos as diferenças entre sistemas de manejo aumentam em relação a estádios anteriores.

A cultura do milho aumenta a profundidade de extração de água no solo em preparo convencional, em função da menor armazenagem nas camadas próximas à superfície, em relação ao plantio direto.

As diferenças na secagem do solo e na extração de água pelas plantas entre o plantio direto e o preparo convencional aumentam com a duração dos períodos secos.

O potencial matricial crítico da água no solo, que define a mudança na camada de máxima extração de água até o florescimento, é menor em plantio direto do que no preparo convencional.

A extração de água do solo em plantio direto e preparo convencional pode ser estimada com base na evolução do tempo de secagem ou de graus-dia acumulados, para uma dada profundidade no perfil.

A variável graus-dia acumulados é mais adequada do que o tempo de secagem do solo (em dias) para estimar a extração da água pelas plantas. Porém, no início do crescimento das plantas o tempo de secagem do solo tem maior importância. Estas variáveis estiveram mais associadas com o potencial matricial no caso do plantio direto e para camadas mais profundas do perfil, em relação ao preparo convencional.

Após o florescimento do milho a maior absorção de água se dá em camadas mais profundas do perfil.

A velocidade estimada de aprofundamento do sistema radicular do milho e a profundidade máxima atingida são maiores em preparo convencional do que plantio direto.

A profundidade do sistema radicular do milho pode ser estimada em função do acúmulo de graus-dia e da precipitação pluvial, principalmente, no sistema de plantio direto.

Tanto em plantio direto quanto em preparo convencional, o aprofundamento do sistema radicular do milho no perfil do solo tem resposta direta à redução da umidade no mesmo.

A evaporação da água na superfície do solo é maior em plantio direto do que em preparo convencional a partir do segundo ou terceiro dia após a chuva, mantendo-se até o final do ciclo de secagem. A evaporação acumulada no período todo é maior em plantio direto.

A palha reduz a evaporação da água na superfície do solo em plantio direto, em relação ao solo desnudo. Entretanto, em função de uma maior capacidade de armazenagem de água e de um maior conteúdo de umidade no solo a evaporação no sistema plantio direto é maior do que no preparo convencional.

O plantio direto promove maior homogeneidade de variáveis hídricas do solo ao longo do tempo, em relação ao preparo convencional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASE, J. K.; TANAKA, D. L. Soil water evaporation comparisons among tillage practices in the northern great plains. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, n. 2, p. 436-440, 1987.

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 46, n. 2, p. 161-168, 1995.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115-119, 1995.

ALVES SOBRINHO, T. et al. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

AMADO, T. J. C. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e de preparo do solo**. 1997. 201 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ANJOS, J. T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 139-145, 1994.

ANNANDALE, J. G. et al. Predicting crop water uptake under full and deficit irrigation: An example using pea (*Pisum sativum* L. cv. Puget). **Irrigation Science**, New York, v. 19, n. 2, p. 65-72, 2000.

ARMY, T. J.; WIESE, A. F.; HANKS, R. J. Effect of tillage and chemical weed control practices on soil moisture losses during de fallow period. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v. 25, n. 2, p. 410-413, 1961.

ARSHAD, M. A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; AZOOZ, R. H. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 1, p. 41-47, 1999.

ASADY, G. H.; SMUCKER, A. J. M. Compaction and root modification of soil aeration. **Soil Science Society of the America Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 251-254, 1989.

AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, n. 2, p. 143-152, 1996.

BALL-COELHO, B. R.; ROY, R. C.; SWANTON, C. J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, n. 3-4, p. 237-249, 1998.

BANZATO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação agrícola**. 3. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 247 p.

BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 35-43, 1999.

BASSOI, L. H. et al. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica: II. Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 541-548, 1994.

BAUMHARDT, R. L.; ZARTMAN, R. E.; UNGER, P. W. Grain sorghum response to tillage method used during fallow and to limited irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, n. 4, p. 643-646, 1985.

BAUMHARDT, R. L.; KEELING J. W.; WENDT, C. W. Tillage and residue effects on infiltration into soils cropped to cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 2, p. 379-383, 1993.

BAUMHARDT, R. L.; JONES, O. R. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in texas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 2, p. 71-82, 2002.

BAVER, L. D.; GARDENER, W. H.; GARDENER, W. R. **Física de Suelos**. 1. ed. Mexico: Limusa, 1991. 529 p.

BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada a irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1992. 125 p.

BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Buenos Aires, v. 1, n. 1, p. 23-27, 2001.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: Ed: UFRGS, 2003a. 78 p.

BERGAMASCHI, H. et al. Importância da água no período crítico do milho para a formação do rendimento de grãos. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO,

- 48.; REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO SORGO, 31., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: EMATER/RS: FEPAGRO, 2003b. 1 CD-ROM.
- BERGAMASCHI, H. et al. Solar radiation intercepted by maize crops as function of soil tillage systems and water availabilities. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANISATION CONFERENCE, 13., 2004, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: ASSSI/ IECA, 2004. 1 CD-ROM.
- BERLATO, M.; SUTILI, V. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência-pendoamento e emergência-espigamento de três cultivares de milho (*Zea mays* L.). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11. 1976, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: Departamento de Genética da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" , 1976. p. 523-527.
- BIANCHI, C. A. M. **Avaliação de indicadores da condição hídrica em milho sob diferentes níveis de água, em semeadura direta e convencional.** 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of Soil Analysis:** Physical and mineralogical methods. Madison: SSSA, 1986. p. 363-375. (Agronomy, Monograph; 9)
- BOND, J. J.; WILLIS, W. O. Soil water evaporation: first stage dryings as influenced by surface residue and evaporation potential. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v. 34, n. 6, p. 924-928, 1969.
- BOONE, F. R. et al. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage II. Soil conditions and plant growth. **Netherland Journal Agricultural Science**, Wageningen, v. 35, n. 2, p. 113-128, 1987.
- BOUNDER, J. W.; RANDALL, G. W.; SCHULER, R. T. Effects of tillage with controller wheel traffic on soil properties and root growth of corn. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankey, v. 40, n. 4, p. 382-385, 1985.
- BRAGAGNOLO, N. ; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 3, p. 369-374, 1990a.
- BRAGAGNOLO, N. ; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de cultura e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 91-98, 1990b.
- BRÉDA, N. et al. Soil water dynamics in an oak stand: I soil moisture water potentials and water uptake by roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 172, n. 1, p. 17-27, 1995.
- BRUNINI, O.; THURTELL, G. W. Resistance to water flow in the soil-plant system – A case study with indoor grown maize plants. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 171-178, 1998.

CABELGUENNE, M.; DEBAEKE, P. Experimental determination and modeling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soybean, sorghum and wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 202, n. 2, p. 175-192, 1998.

CAMPOS, B. C. et al. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 459-463, 1994.

CARPENEDO, V. ; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CARTER, M. R.; STEED, G. R. The effects of direct-drilling and stubble retention on hydraulic properties at the surface of duplex soil in northeastern Victoria. **Australian Journal of Soil Research**, Australia, v. 30, n. 4, p. 505-516. 1992.

CARVALHO JUNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um latossolo vermelho-escuro textura média, na Região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 505-514, 1998.

CAUDURO, F. A.; DORFMANN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Brasília: PRONI/MA, 1988. 216 p.

CENTURION, J. F. & DEMATTÊ, J. L. I. Efeitos de sistema de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 263-266, 1985.

CHAUDHARY, M. R.; KHERA, R.; SINGH, C. J. Tillage and irrigation effects on root growth, soil water depletion and yield of wheat following rice. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 116, n. 1, p. 9-16, 1991.

COMIRAN, F. et al. Temperatura do solo em culturas de milho sob semeadura direta e convencional. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15; FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2003, Porto Alegre. **Resumos....** Porto Alegre: UFRGS, 2003, p. 156-157.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

Da ROS, C. O. et al., Influência do tempo de cultivo no sistema plantio direto nas características físicas de um Latossolo vermelho-escuro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 397-400, 1996.

Da ROS, C. O. et al. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 241-247, 1997.

DALMAGO, G. A. et al. Rendimento do milho em sistemas de semeadura direta e convencional, sob condições hídricas variáveis. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 30., 2002, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 1 CD-ROM.

DALMAGO, G. A. et al. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de semeadura direta e convencional de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBA./UFSM/UNIFRA, 2003a. v. 1. p. 295-296.

DALMAGO, G. A. et al. Diferenças na disponibilidade de água no solo entre os sistemas de semeadura direta e convencional de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBA./UFSM/UNIFRA, 2003b. v. 1. p. 293-294.

DALMAGO, G. A. et al. Transpiração do milho cultivado em sistemas de semeadura direta e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBA./UFSM/UNIFRA, 2003c. v. 1. p. 297-298.

DALMAGO, G. A. et al. Reflectância para radiação fotossinteticamente ativa e fluxo de calor em solo sob plantio direto e preparo convencional. In: REUNIÓN ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA, 10., REUNIÓN LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA, 4., 2004, Mar del Prata. **Anais...** Mar del Prata: FCEyN/UBA/INTA, 2004a. 1 CD-ROM.

DALMAGO, G. A. et al. Soil temperature in maize crops as functions of soil tillage systems. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANISATION CONFERENCE, 13., 2004, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: ASSSI/ IECA, 2004. 1 CD-ROM.

DALMAGO, G. A. et al. Evapotranspiration in maize crops as function of soil tillage systems. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANISATION CONFERENCE, 13., 2004, Brisbane. **Proceedings...**, Brisbane: ASSSI/ IECA, 2004. 1 CD-ROM.

DALTON, F. N. In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 173, n. 1, p. 157-165, 1995.

DAO, T. H. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1586-1595, 1993.

DENMEAD O. T.; SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 385-390, 1962.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N. ; HEINZMANN, F. X. Manejo de solo com cobertura verde de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 20, n. 7, p. 761-773, 1985.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N. ROTH, C. H., Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, n. 1-4, p. 253-263, 1986.

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Londrina: GTZ-IAPAR, 1991. 272 p.

DICKEY, E. C. et al. Tillage system definitions. In: GRIFFITH, D. R. et al. **Conservation Tillage systems and management**: crop residue management with no-till, ridge-till, mulch-till. Ames:Midwest Plan Service, 1992. p. 5-7.

DIIWU, J. Y. et al. Effect of tillage on the spatial variability of soil water properties. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 40, n. 1, p. 1-8, 1998.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efectos del água sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Estudio FAO: Riego Y drenage, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande, UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigao e Drenagem, 33).

DORAN, J. W.; ELLIPTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. **Soil & Tillage research**, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p. 3-18, 1998.

DOUGLAS, J. T.; GROSS, M. J.; HILL, D. Measurements of pores characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of a radioactive tracer (144ce) technique. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 11-18, 1980.

DOURADO NETO, D. et al. Programa para confeco da curva de reteno de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. 92-102, 1990.

DRURY, C. F. et al. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 1, p. 101-108, 1999.

EHLERS, W. et al. Root system parameters determining water uptake of field crops. **Irrigation Science**, New York, v. 12, n. 3, p. 115-124, 1991.

ELTZ, F. L. F. ; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno lico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 259-267, 1989.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. **Sistema brasileiro de classificao de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1999. 412 p.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de curvas de infiltração usando uma câmara de fluxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 325-333, 1997.

FALLEIRO, R. M. et al. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1097-1104, 2003.

FARIA, R. T. de; MADRAMOOTOO, C. A. Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 31, n. 1-2 p. 35-49, 1996.

FERNANDES, B. et al. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros em dois solo (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 329-333, 1983.

FLERCHINGER, G. N. ; SAUER, T. J.; AIKEN, R. A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1-2, p. 217-233, 2003.

FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latinoamericana**, San José, v. 42, n. 2, p. 165-176, 1967.

FORTIN, M. C. Soil temperature, soil water, and no-till corn development following in-row residue removal. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 3, p. 571-576, 1993.

FRANÇA, S. **Efeitos da disponibilidade de nitrogênio e água na fotossíntese, crescimento e produção do milho, em diferentes sistemas de cultura**. 2003. 170 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FRANZLUEBBERS, A. J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 197-205, 2002.

FRANZLUEBBERS, A. J.; HONS, F. M.; ZUBERER, D. A. Tillage induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 41-60, 1995.

GAVANDE, S. A. **Física de Suelos: principios y aplicaciones**. 1. ed. Mexico: Limusa-Wiley, 1973. 351p.

GHUMAN, B. S.; SUR, H. S. Tillage and residue management effects on soil properties and yields of rainfed maize and wheat in a subhumid subtropical climate. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 58, n. 1-2, p. 1-10, 2001.

- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia**: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. 653 p.
- GORDIYENKO, V. P. ; KOSTOGRYZ, P. V. Patterns of moisture evaporation at variable bulk densities of the upper soil layer. **Soviet Soil Science**, New York, v. 22, n. 8, p. 111-122, 1990.
- GREVERS, M. C. et al. Soil water conservation under zero- and conventional tillage systems on the canadian prairies. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, n. 1-4, p. 265-276, 1986.
- GRIFFITH, D. R., et al. Crop response to tillage systems. In: GRIFFITH, D. R. et al. Conservation tillage systems and management: crop residue management with no-till, ridge-till, mulch-till. Ames: Midwest Plan Service, 1992. p. 25-33.**
- HAMMEL, J. E.; PAOEBDICK, R. I.; CAMPBELL, G. S. Fallow tillage effects on evaporation and seedzone water content in a dry summer climate. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1016-1022, 1981.
- HANWAY, J. J. Growth stages of corn (*Zea mays* L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 55, n. 5, p. 487-491, 1963.
- HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 2, p. 271-280, 2001.
- HEILMAN, J. L. et al. Evaporation from ridge-tilled soil covered with herbicide-killed winter wheat. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1278-1286, 1992.
- HIDE, J. C. Observation on factors influencing the evaporation of soil moisture. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 18, n. 3, p. 234-239, 1954.
- HILL, R. L.; HORTON, R. CRUSE, R. M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1264-1270, 1985.
- HILL, R. L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society of America journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 161-166, 1990.
- HILLEL, D. **Soil and water**: physical principles and processes. 3. ed. New York: Academic Press, 1973. 288 p.
- HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. 1. ed. London: Academic Press, 1982. 365 p.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HOMAE, M.; FEDDES, R. A.; DIRKSEN, C. Simulation of root water uptake II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 111-126, 2002.

HUNDAL, S. S.; DEDATA, S. K. water-table and tillage effects on root distribution soil-water extraction, and yield of sorghum grown after wetland rice tropical soil. **Field Crops research**, Amsterdam, v. 9, n. 3-4, p. 291-303, 1984.

IDSO, S. B. et al. The three stages of drying of a field soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 38, n. 5, p. 831-837, 1974.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 193-198, 1994.

IZAURRALDE, R. C.; CHARNASIK, D. S.; JUMA, N. G. Soil water under conventional and alternative cropping systems in cryoboreal subhumid central Alberta. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 74, n. 1, p. 85-92, 1994.

JOHNSON, M. D.; LOWERY, B.; DANIEL, T. C. Soil moisture regimes of three conservation tillage system. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 27, n. 5, p. 1385-1395, 1984.

JONES, O. R. et al., No-tillage effects on infiltration, runoff, and water conservation on dryland. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 37, n. 2, p. 473-479, 1994.

KAY, B. D.; VANDENBYGAART, A. J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 107-118, 2002.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um latossolo roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Bulk Density In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: SSSA, 1986. p. 687-732. (Agronomy, Monograph; 9).

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 20)

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soil**. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.

LAL, R. Tillage and agricultural sustainability. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 133-46, 1991.

LAMPURLANÉS, J.; ANGÁS, P. CANTERO-MARTÍNEZ, C. Root growth, soil content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 69, n. 1, p. 27-40, 2001.

LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Proceedings. Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 20, n. 1, p. 120-125, 1956.

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura de milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 305 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

LI, K. Y.; DE JONG, R.; BOISVERT, J. B. An exponential root-uptake model with water stress compensation. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 252, n. 1-4, p. 189-204, 2001.

LI, Y.; WALLACH, R.; COEN, Y. The role of soil hydraulic conductivity on the spatial and temporal variation of root water uptake in drip-irrigated corn. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 243, n. 2, p. 131-142, 2002.

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

LIMA, J. M. J. C.; LIMA, V. C. Efeito do plantio direto nas características micromorfológicas do solo. *Agrárias*, Curitiba, v. 14, n. 1-2, p. 31-40, 1995a.

LIMA, J. M. J. C.; LIMA, V. C. Variação temporal das características micromorfológicas em solo sob plantio direto. *Agrárias*, Curitiba, v. 14, n. 1-2, p. 71-76, 1995b.

LINDSTROM, M. J.; ONSTAD, C. A. Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, v. 39, n. 2, p. 149-152, 1984.

LINDSTROM, M. J.; VOORHEES, W. B.; ONSTAD, C. A. Tillage system and residue cover effects on infiltration in northwestern corn belt soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, v. 39, n. 1, p. 64-68, 1984.

LINDWALL, C. W.; LARNEY, F. J.; CAREFOOT, J. M. Rotation, tillage and seeder effects on winter wheat performance and soil moisture regime. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 75, n. 1, p. 109-116, 1995.

LOGSDON, S. D.; JOYNES, D. B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 60, n. 3, p. 703-709, 1996.

LYON, D. J.; STROUP, W. W.; BROWN, R. E. Crop production and soil water storage in long-term winter wheat-fallow tillage experiments. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p. 19-27, 1998.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105 p. (Boletim Fepagro, 10).

MAULÉ, C. P. ; REED, W. B. Infiltration under no-till and conventional tillage systems in Saskatchewan. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatchewan, v. 35, n. 3, p. 165-173, 1993.

MELLO IVO, W. M. P. & MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 1, p. 135-143, 1999.

MIELNICZUK, J. A sustentabilidade agrícola e o plantio direto. In: PEIXOTO, R.T.G.; AHREND, D. C.; SAMAHA, M. J. **Plantio direto: o caminho para uma agricultura sustentável**. Ponta Grossa: Instituto Agrônômico do Paraná, 1997. p. 9-14.

MILLER, J. J. et al. Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in Southern Alberta. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 78, n. 4, p. 643-648, 1998.

MODEL, N. S.; LEVIEN, R.; FROSI, R. A. Água armazenada e temperatura do solo em oito sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 41-49, 1995.

MOLZ, F. J. Interaction of water uptake and root distribution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, n. 4, p. 608-610, 1971.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. REICHARDT, K. Heterogeneidade dos pontos experimentais de curvas de retenção da água no solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 393-403, 1993.

MOROTE, C. G. B. et al. Alterações na temperatura do solo pela cobertura morta e irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 81-84, 1990.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, n. 3 p. 513-522, 1976.

MÜLLER, A. G. **Modelagem da matéria seca e do rendimento de grãos de milho em relação à disponibilidade hídrica**. 2001. 119 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2001.

MUNAWAR, A. et al. Tillage and cover crop management for soil water conservation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, n. 4, p. 773-777, 1990.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 95-102, 1983.

MUZILLI, O. **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 3-16.

MWENDERA, E. J.; FEYEN, J. Effects of tillage and evaporative demand on the drying characteristics of a silt loam: an experimental study. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 61-69, 1994.

NESMITH, D. S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 183-186, 1987.

NESMITH, D. S. et al. Tillage and residue management effects on properties of an ultisol and double-cropped soybean production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, n. 3, p. 570-576, 1987.

NETER, J. et al. **Applied linear regression models**. 3rd ed. Chicago: IRWIN, 1996. 720 p.

NEWELL, R. L.; WILHELM, W. W. Conservation tillage and irrigation effects on corn root development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, n. 1, p. 160-165, 1987.

NORWOOD, C. Profile water distribution and grain yield as affected by cropping system and tillage. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 3, p. 558-563, 1994.

NORWOOD, C. A. Water use and yield of dryland row crops as affected by tillage. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 1, p. 108-115, 1999.

NOVÁK, V. Estimation of soil-water extraction patterns by roots. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 12, n. 4, p. 271-278, 1987.

OLAOYE, J. O. Influence of tillage on crop residue cover, soil properties and yield components of cowpea in derived savannah ectones of Nigeria. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, n. 3-4, p. 179-187, 2002.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

PASSIOURA, J. B. Water transport in and to roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 39, p. 245-265, 1988.

PELEGRIN, F. et al. The influence of tillage methods on soil physical properties and water balance for a typical crops rotation in SW Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 4, p. 345-358, 1990.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bar soil and grass. **Proceedings of Royal Society-Serie A**, London, v. 193, p. 120-145, 1948.

PETERSON, G. A. et al. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 9, n. 2, p. 180-186, 1996.

PHILLIPS, R. E. Soil moisture. In: PHILLIPS, R. E; PHILLIPS, S. H. **No-Tillage Agriculture: principals and practices**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984. p. 67-86.

- PHILLIPS, R. E.; PHILLIPS, S. H. P. **No-Tillage Agriculture: princípios e praticas.** Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984. 306 p.
- PRASAD, R. A linear root water uptake model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 99, n. 3-4, p. 297-306, 1988.
- RATCLIFF, L. F.; RITCHIE, J. T.; CASSEL, D. K. Field-measured limits of soil water availability as related as related to laboratory measured properties. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 47, n. 4, p. 770-775, 1983.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** 1. ed. São Paulo: Manole, 1986. 188 p.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 211-216, 1988.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 505 p.
- REID, J. B.; HASHIM, O.; GALLAGHER, J. N. Relations between available and extractable soil water and evapotranspiration from a bean crop. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 9, n. 3, p. 193-209, 1984.
- REID, J. B.; HUCK, M. G. Diurnal variation of crop hydraulic resistance: A new analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, n. 4, p. 827-834, 1990.
- REINERT, D. J. et al. Efeito de diferentes métodos de preparo do solo sobre a estabilidade de agregados em solo podzólico vermelho amarelo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 19-25, 1984.
- REYNOLDS, W. D.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Characterization of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 33, n. 2, p. 117-131, 1995.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, J. T. Soil water availability. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, n. 1-3, p. 327-338, 1981.
- RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, n. 1-3, p. 81-96, 1981.
- RITCHIE, J. T.; JOHNSON, B. S. Soil and plant factors affecting evaporation. In: STUART, B. A.; NIELSEN, D. R. **Irrigation of agricultural crops.** Madison: American Society of Agronomy, 1990. p. 363-390. (Agronomy monograph, 30).
- ROJAS, C. A. L. **Alterações físico-hídricas de um podzólico em função do manejo de solo.** 1998. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ROJAS, A. L. C.; VAN LIER, Q. J. Alterações físicas e hídricas de um podzólico em função de sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 105-115, 1999.

ROTH, C. H. et al. Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an oxisol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 81-91, 1988.

SALTON, J. C. & MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 19, p. 313-2319, 1995.

SAUER, T. J.; HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Corn residue and placement effects on evaporation and soil thermal regime. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 5, p. 1558-1564, 1996.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Características da porosidade de um argissolo vermelho-amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 765-769, 2001.

SCHJONNING, P. RASMUSSEN, K. J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 1-2, p. 69-82, 2000.

SCHMIDHALTER, U.; SELIM, H. M.; OERTLI, J.J. Measuring and modeling root water uptake based on ³⁶chloride discrimination in a silt loam soil affected by groundwater. **Soil Science**, Baltimore, v. 158, n. 2, p. 97-105, 1994.

SECCO, D. et al. Efeito de sistemas de manejo na propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 57-60, 1997.

SHEPTUKHOV, V. N. et al. The effect of different tillage systems on the water regime, structure, and hydrophysical properties of soddy-podzolic soils. **Eurasian Soil Science**, Silver Spring, v. 30, n. 3, p. 311-317, 1997.

SHEWN, Y.; TANNER, C. B. Radiative and conductive transport of heat through flail-chopped corn residue. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 3, p. 653-658, 1990.

SIDIRAS, N. et al. Influência de diferentes sistemas de preparo de solo na variação da umidade e rendimento da soja, em latossolo roxo distrófico (oxisol). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 103-106, 1983.

SILVA, A. P. ; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P. da; NADLER, A.; KAY, B. D. Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of water content in the tillage zone. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 58, n. 3-4, p. 207-218, 2001.

SILVA, R. B. et al. Alterações de propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho distrófico pela adsorção de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 791-798, 2001.

SINGH, B.; CHANASYK, D. S.; MCGILL, W. B. Soil hydraulic properties of and orthic black chernozem under long-term tillage and residue management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, n. 1, p. 63-71, 1996.

SLONEKER, L. L.; MOLDENHAUER, W. C. Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankey, v. 32, n. 5, p. 231-236, 1977.

SOUZA, L. da S. **Variabilidade espacial dos solos em sistemas de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SOUZA, Z. M. de; ALVES, M. C. Movimento da água e resistência à penetração em um latossolo vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

STEICHEN, J. M. Infiltration and random roughness of a tilled and untilled claypan soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 4, n. 1-2, p. 251-262, 1984.

STEINER, J. L. Tillage and surface residue effects on evaporation from soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 3, p. 911-916, 1989.

STONE L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

SUWARDJI, P. ; EBERBACH, P. L. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandsol) after 16 years of direct drillig or conventional cultivation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p. 65-77, 1998.

TOLLNER, E. W.; HARGROVE, W. L.; LANGDALE, G. W. Influence of conventional and no-tillage practices on soil physical properties in the southern Piedmont. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankey, v. 39, n. 1, p. 73-76, 1984.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998a.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. ; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998b.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 305-314, 2002.

UNGER, P. W. Tillage and residue effects on wheat, sorghum, and sunflower grown in rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 4, p. 885-891, 1984.

UNGER, P. W. Infiltration of simulated rainfall: tillage system and crop residue effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1 p. 283-289, 1992.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAN LIER, Q. de J. The critical soil water content and its relation to soil water dynamics. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, n. 1, p. 45-50, 1997.

VAN LIER, Q. de J. Oxigenação do sistema radicular: Uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 233-238, 2001.

VAN OUWERKERK, C.; BOONE, F. R. Soil physical aspects of zero-tillage experiments. **Netherland Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 18, n. 1, p. 247-261, 1970.

VANBAVEL, C. H. M.; HILLEL, D. I. Calculation potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 17, n. 6, p. 453-476, 1976.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions American Society Agricultural Engineering**, v. 4, n. 2, p. 242-246, 1961.

VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 152-156, 1984.

WARGNER-RIDDLE, C.; GILLESPIE, T. J.; SWANTON, C. J. Rye mulch characterization for the purpose of microclimatic modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, n. 1-2, p. 67-81, 1996.

WEBBER III, C. L.; GEBHARDT, M. R.; KERR, H. D. Effect of tillage on soybean growth and seed production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, n. 6, p. 952-956, 1987.

XU, D.; MERMOUND, A. Modeling the soil water balance based on time-dependent hydraulic conductivity under different tillage practices. **Agricultural Water Management**, Rotterdam, v. 63, n. 2, p. 139-151, 2003.

ZHAI, R.; KACHANOSKI, R. G.; VORONEY, R. P. Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 186-192, 1990.

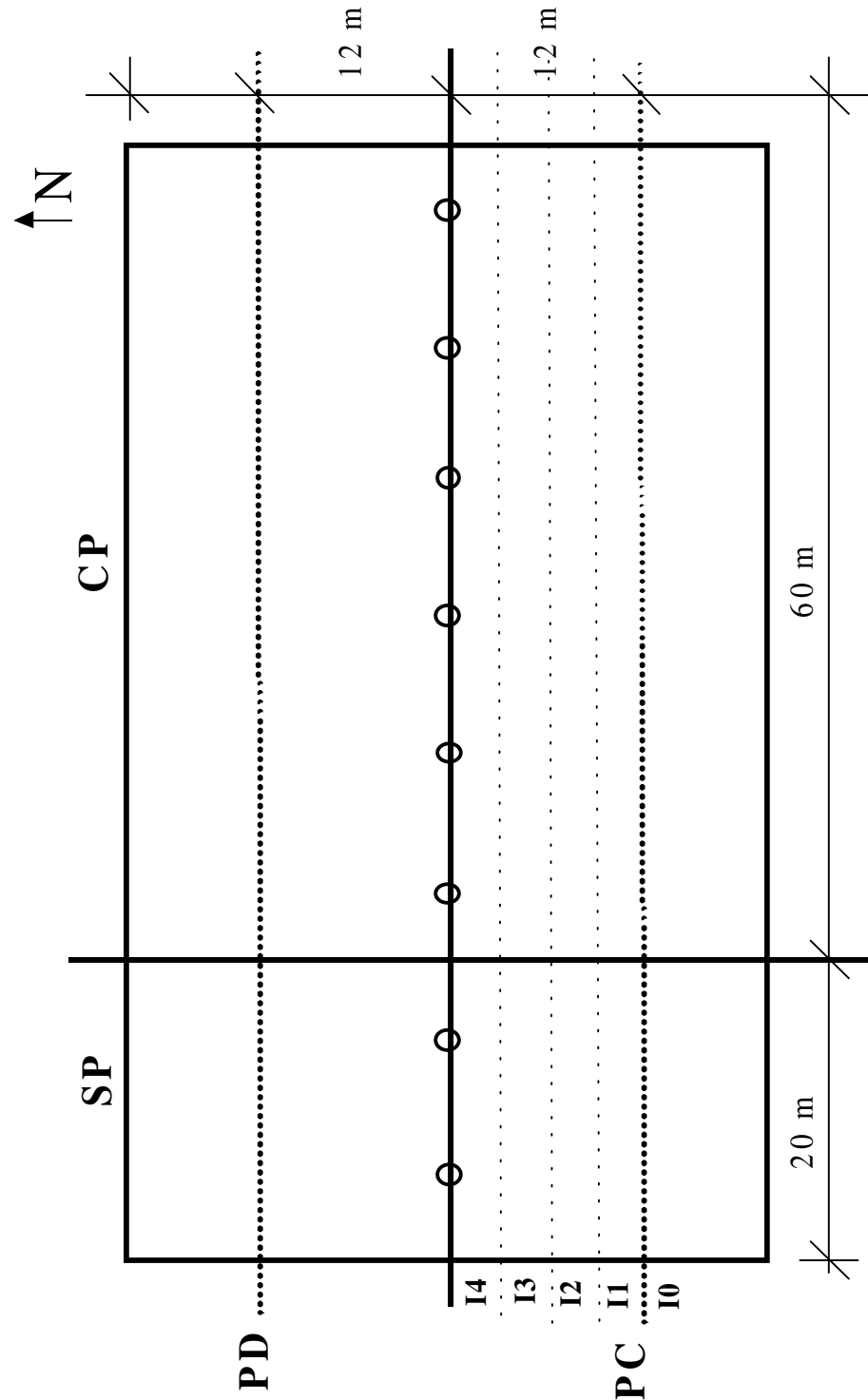
ZHUANG, J. et al. Estimation of root water uptake of maize: an ecophysiological perspective. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 69, n. 3, p. 201-213, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE 1. Distribuição média das partículas primárias do solo sob plantio direto e preparo convencional, em sete profundidades. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul, RS. (adaptado de Rojas, 1998).

Profundidade (m)	Areia	Silte	Argila	Classe textural
(%).....			
.....Plantio Direto.....				
0,03 – 0,06	58,9	25,3	15,9	franco arenoso
0,08 – 0,11	60,1	24,1	15,9	franco arenoso
0,18 – 0,21	58,3	23,3	18,5	franco arenoso
0,28 – 0,31	56,2	23,9	20,0	franco arenoso
0,38 – 0,41	53,8	22,2	24,1	franco arenoso
0,48 – 0,51	53,2	19,1	27,8	franco argilo arenoso
0,68 – 0,71	45,1	23,1	31,8	franco argilo arenoso
.....Preparo Convencional.....				
0,03 – 0,06	49,9	30,1	20,1	Franco
0,08 – 0,11	49,7	30,3	20,1	Franco
0,18 – 0,21	49,3	29,9	20,9	Franco
0,28 – 0,31	43,5	28,9	27,6	Franco
0,38 – 0,41	43,5	27,7	27,9	Franco
0,48 – 0,51	39,1	28,7	32,3	franco argiloso
0,68 – 0,71	33,2	26,2	40,7	franco argiloso

APÊNDICE 2. Croqui dos experimentos identificando a localização dos sistemas de manejo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), área sem plantas (SP) e com plantas (CP) e níveis de irrigação (I4, I3, I2, I1, I0) com as respectivas dimensões. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2001/02 e 2002/03.



APÊNDICE 3. População de plantas de milho na área útil nas subparcelas e plantas por metro linear em sistema de manejo do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2001/02 e 2002/03.

Variável	Ano/Sistema de manejo			
	2001/02		2002/03	
	PD	PC	PD	PC
Número de plantas ha ⁻¹	65322	64403	62127	65613
Área útil por planta (m ²)	0,15	0,16	0,15	0,15
Plantas por metro linear	4,90	4,83	4,96	4,92

OBS: O número de plantas por ha⁻¹ foi avaliado no estabelecimento da cultura (\pm 30 DAE), próximo a instalação dos sensores.

APÊNDICE 4. Laudo de análise química de diferentes profundidades do solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), depois de sete (outubro de 2001) e oito anos (outubro de 2002) de utilização dos sistemas de manejo em dois níveis de irrigação (I4 = 100% da CC; I0 = não irrigado). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

Sist.	Nível Irrig.	Prof. (m)	Argila (%)	pH H ₂ O	Índice SMP	P (Mg L ⁻¹)	K	M.O. (%)	Al _{troc.}	Ca _{troc.}	Mg _{troc.}	Al+H	CTC	%SAT da CTC		Relações		
														Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
.....Experimento 2001/02.....																		
PD	-	0,00-0,10	27	5,1	6,2	26	194	2,0	0,1	1,9	0,8	3,0	6,2	52	1,6	2,4	3,8	1,6
PD	-	0,10-0,20	29	5,2	6,3	17	178	1,4	0,2	1,9	0,7	2,7	5,8	53	3,5	2,7	4,2	1,5
PD	-	0,20-0,30	29	5,1	6,3	8,8	166	1,5	0,3	2,1	0,8	2,7	6,0	55	5,0	2,6	4,9	1,9
PC	-	0,00-0,10	29	5,1	6,2	17	212	2,2	0,1	2,3	0,8	3,0	6,6	55	1,5	2,9	4,2	1,5
PC	-	0,10-0,20	28	5,3	6,3	11	174	1,8	0,1	2,9	1,0	2,7	7,1	62	1,4	2,9	6,0	2,2
PC	-	0,20-0,30	35	5,2	6,2	4,4	137	1,7	0,2	2,5	1,0	3,0	6,8	56	2,9	2,5	7,0	2,8
.....Experimento 2002/03.....																		
PD	I0	0,00-0,05	25	4,5	5,7	41	217	3,0	0,3	2,1	0,9	4,7	8,2	43	3,6	2,3	3,8	1,6
PD	I0	0,05-0,10	29	5,1	6,1	34	211	1,9	0,3	2,0	0,8	3,3	6,6	51	4,5	2,5	3,7	1,5
PD	I0	0,10-0,20	32	5,1	6,0	19	180	1,6	0,2	1,9	0,8	3,6	6,7	47	3,0	2,4	4,1	1,7
PD	I4	0,00-0,05	27	4,9	5,9	24	187	3,2	0,2	2,2	1,0	3,9	7,6	49	2,6	2,2	4,6	2,1
PD	I4	0,05-0,10	29	5,3	5,6	23	173	2,1	0,3	2,2	0,8	5,1	8,6	40	3,5	2,8	5,0	1,8
PD	I4	0,10-0,20	34	5,3	5,6	13	139	2,0	0,4	2,4	0,8	5,1	8,7	41	4,6	3,0	7,0	2,2
PC	I4	0,00-0,05	29	5,0	5,8	8,1	206	2,2	0,2	2,2	0,8	4,3	7,8	45	2,6	2,8	4,2	1,5
PC	I4	0,05-0,10	28	5,2	5,7	8,7	173	2,2	0,2	2,3	0,8	4,7	8,2	43	2,4	2,9	5,0	1,8
PC	I4	0,10-0,20	29	5,2	5,9	6,7	119	2,0	0,3	2,5	0,9	3,9	7,6	49	3,9	2,8	8,0	2,9
PC	I0	0,00-0,05	28	5,0	5,7	19	189	2,3	0,2	2,3	0,8	4,7	8,3	43	2,4	2,9	4,7	1,7
PC	I0	0,05-0,10	27	5,2	6,0	9,9	171	2,0	0,1	2,4	0,9	3,6	7,3	51	1,4	2,7	5,0	2,1
PC	I0	0,10-0,20	29	5,3	5,9	5,5	140	1,9	0,1	2,8	1,0	3,9	8,1	52	1,2	2,8	8,0	2,8

APÊNDICE 5. Datas em que foram feitas as irrigações e quantidade de água aplicada no tratamento com máxima irrigação (I4). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

Dia	DAE	GD_{acm}	Irrigação (mm)
.....Experimento 2001/02.....			
18/12/2001	25	331	16,7
21/12/2001	28	337	26,5
29/12/2001	36	488	24,5
14/01/2002	52	749	32,6
19/01/2002	57	817	22,3
09/02/2002	88	1282	31,8
Total			154,4
.....Experimento 2002/03.....			
07/01/2003	36	550	28,2
16/01/2003	45	695	31,2
28/01/2003	57	885	25,4
01/02/2003	60	938	3,1
03/02/2003	63	996	3,7
04/02/2003	64	1016	28,6
06/02/2003	66	1055	23,3
08/02/2003	68	1090	26,8
Total			170,3

DAE = dias após a emergência do milho; GD_{acm} = graus-dia acumulados após a emergência do milho.

APÊNDICE 6. Coeficientes dos modelos de estimativa do índice de área foliar (IAF) do milho, cultivado em solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), na condição de máxima irrigação (I4) e não irrigado (I0), em função de graus-dia, altura de plantas e número de folhas, com os respectivos coeficientes de determinação dos modelos (r^2). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02.

Sistema	Nível irrigação	Coeficientes dos modelos			r^2
		a	b	X_0	
.....Para X = graus-dia ($^{\circ}$ C).....					
PD	I0	4,1636	73,844	399,969	0,99
PD	I4	4,9448	85,081	432,106	0,99
PC	I0	4,2328	74,576	407,747	0,99
PC	I4	4,6871	79,359	422,881	0,99
.....Para X = altura de plantas (m).....					
PD	I0	4,1623	0,307	1,051	0,99
PD	I4	5,0224	0,408	1,268	0,99
PC	I0	4,2189	0,316	1,089	0,99
PC	I4	4,6758	0,383	1,122	0,99
.....Para X = número de folhas.....					
PD	I0	4,3194	1,249	9,962	0,98
PD	I4	5,2029	1,456	10,585	0,99
PC	I0	4,4043	1,106	10,137	0,98
PC	I4	4,8863	1,318	10,736	0,99

APÊNDICE 7. Evolução da cobertura do solo em plantio direto e preparo convencional de milho. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2001/02 e 2002/03.

Data de amostragem	Plantio direto (%)		Preparo convencional (%)	
	solo	palha	solo	palha
.....Experimento 2001/02.....				
27/11/2001	9,6	90,4	90,0	10,0
09/12/2001	8,0	92,0	94,5	5,5
30/01/2002	9,0	91,0	96,7	3,3
.....Experimento 2002/03.....				
28/12/2002	10,4	89,6	95,3	4,7
27/01/2003	15,0	85,0	97,5	2,5

OBS: valores médios da áreas com e sem plantas

APÊNDICE 8. Temperatura do ar, precipitação pluvial, radiação solar global (Rg) e evapotranspiração de referência (ETo) decendial, observadas nos dois experimentos e médias climatológicas do período de 1970 a 2000. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2001/02 e 2002/03.

Mês	Decêndio	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	ETo (mm)	Rg (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
.....Experimento 2001/2002.....					
Novembro	1	20,5	13	43	20,5
	2	20,6	56	48	22,6
	3	21,7	102	38	17,6
Dezembro	1	20,3	29	33	15,20
	2	22,5	5,0	45	20,6
	3	22,8	59	56	24,2
Janeiro	1	23,6	44	55	25,2
	2	23,4	0,0	54	24,5
	3	24,6	85	35	14,7
Fevereiro	1	21,5	30	43	20,6
	2	22,9	7,0	39	18,3
	3	23,0	37	38	22,1
Março	1	24,9	36	34	15,6
	2	25,8	46	32	14,7
	3	24,0	74	32	13,4
.....Experimento 2002/03.....					
Novembro	1	19,4	48	42	19,2
	2	22,0	73	45	20,1
	3	22,4	22	31	14,0
Dezembro	1	22,5	115	37	15,8
	2	23,2	72,	48	21,2
	3	23,2	37	50	20,4
Janeiro	1	23,9	17	44	19,8
	2	24,4	24	55	24,2
	3	24,1	23	59	24,2
Fevereiro	1	26,5	45	46	19,7
	2	22,2	114	34	15,5
	3	24,3	37	32	17,9
Março	1	25,5	24	39	17,6
	2	22,1	68	33	15,9
	3	21,0	0,0	40	16,8

Fonte: Boletim Agrometeorológico-UFRGS.

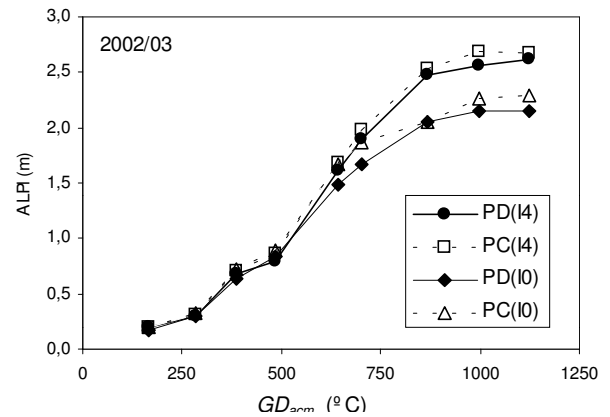
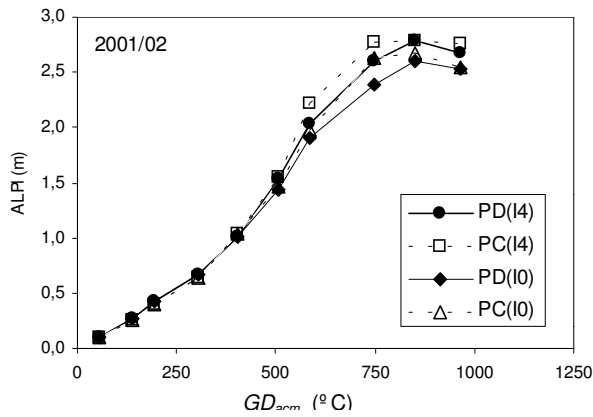
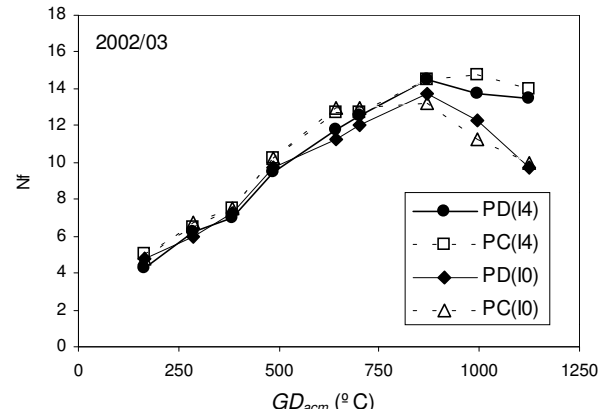
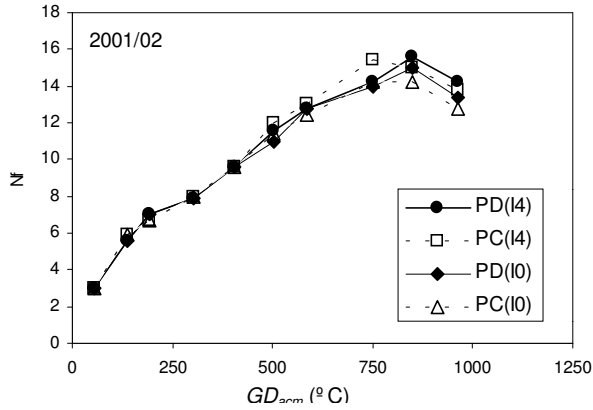
APÊNDICE 8. Continuação...

Médias climatológicas do período 1970-2000.

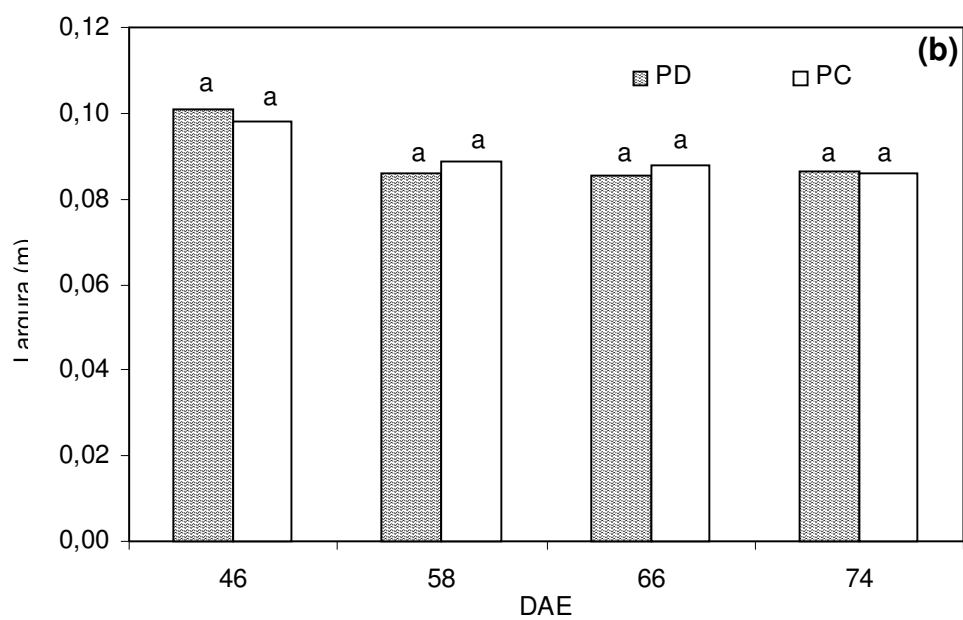
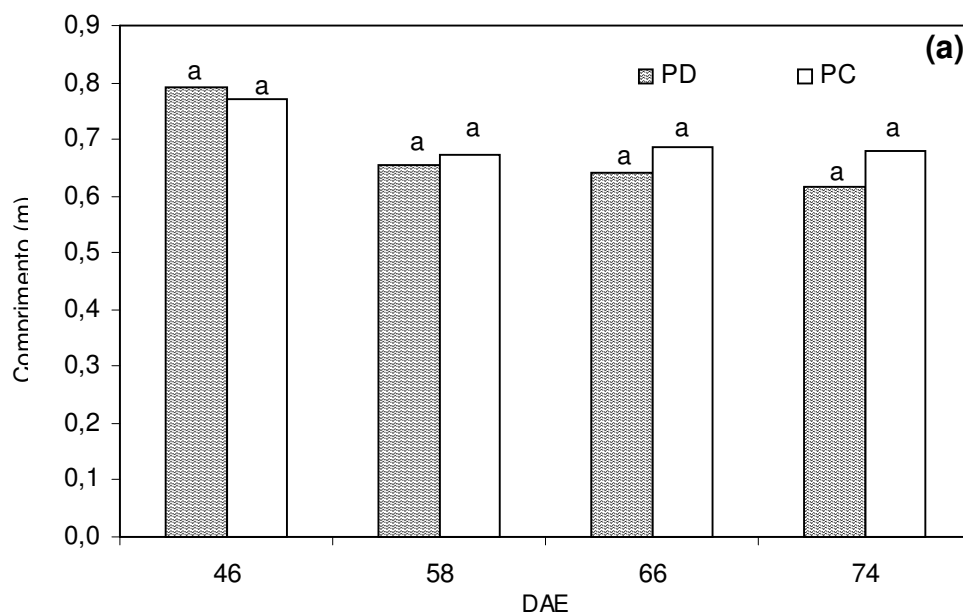
Mês	Decêndio	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	ETo (mm)	Rg (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
Novembro	1	20,4	45	42	19,0
	2	21,3	33	46	20,1
	3	21,5	32	48	20,8
Dezembro	1	22,7	41	49	21,0
	2	23,4	36	50	21,4
	3	24,1	33	59	21,1
Janeiro	1	24,2	34	51	21,2
	2	24,7	39	50	20,9
	3	24,8	38	53	19,9
Fevereiro	1	24,5	43	45	19,0
	2	24,4	37	43	18,5
	3	24,1	31	31	17,2

Fonte: Bergamaschi et al. (2003).

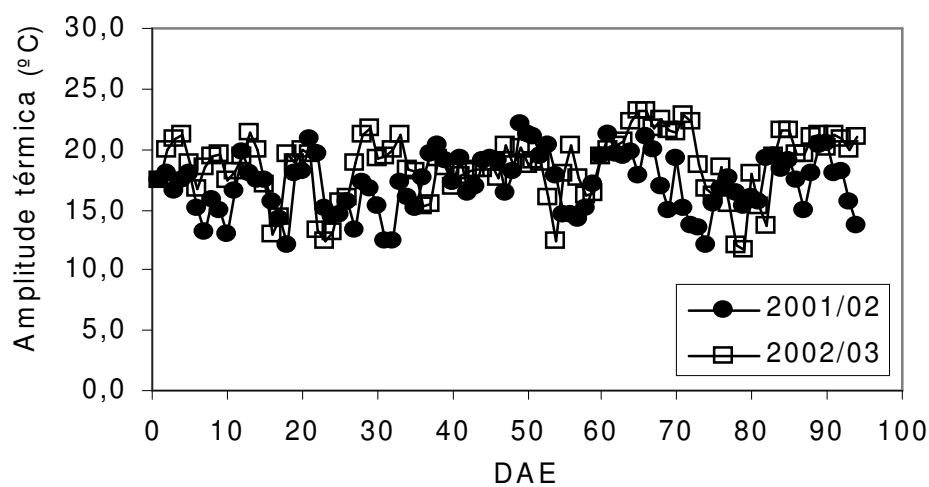
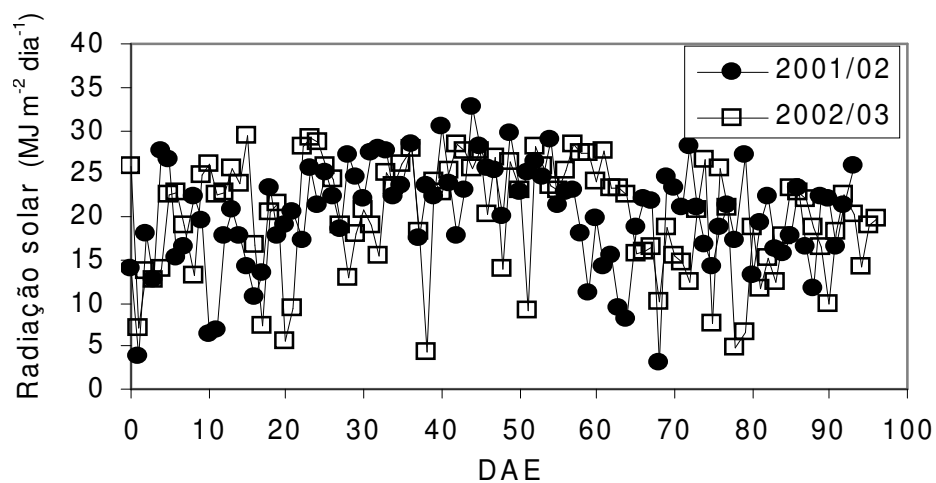
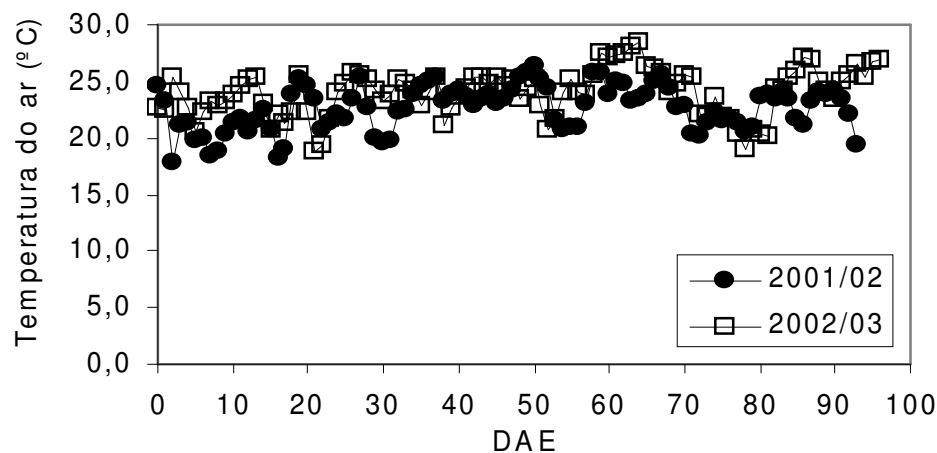
APÊNDICE 9. Número de folhas (Nf) e da altura de plantas (ALPI) de milho cultivado em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), com irrigação (I4) e não irrigado (I0), em função de graus-dia acumulados (GD_{acm}). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2001/02 e 2002/03.



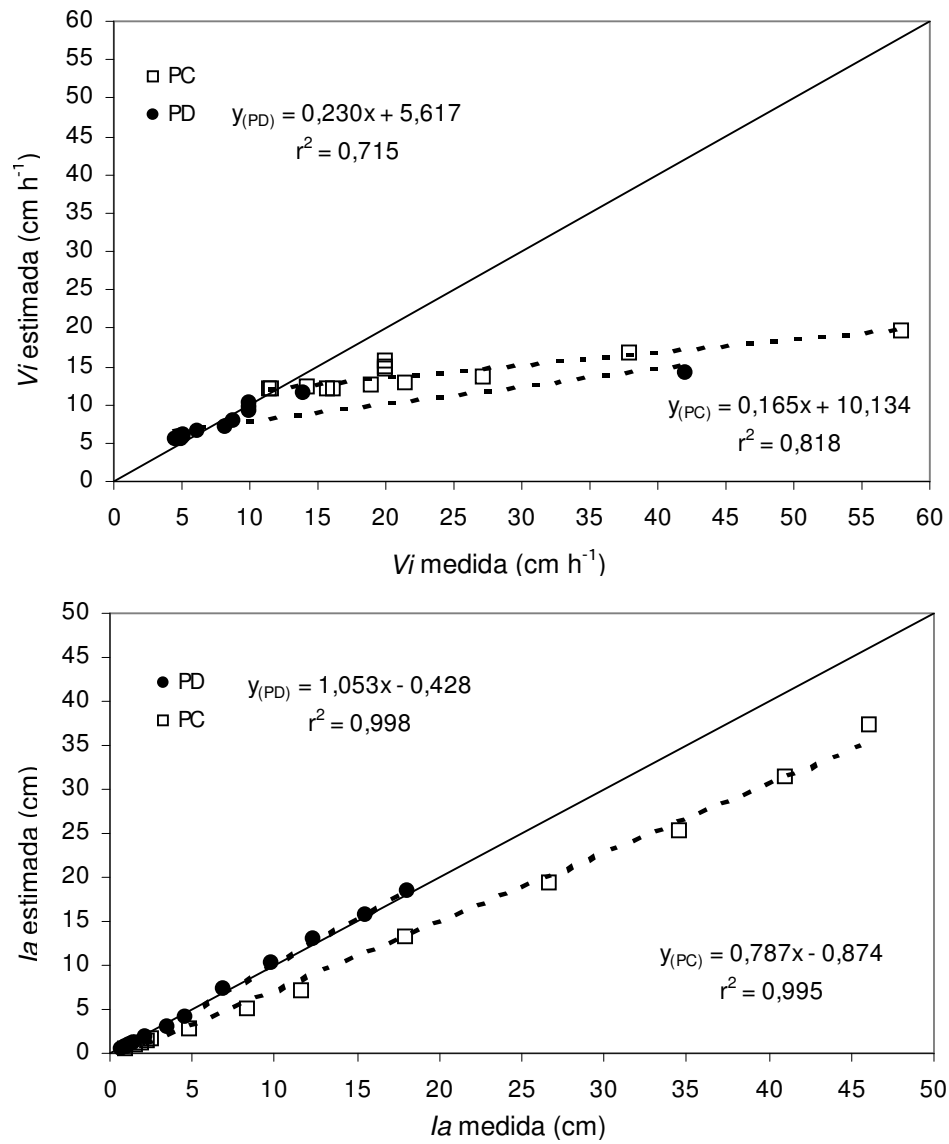
APÊNDICE 10. Comprimento (a) e largura (b) de folhas de milho irrigado (I4) em diferentes dias após a emergência (DAE) em sistemas de plantio direto (PD) e preparo convencional (PC). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2002/03.



APÊNDICE 11. Temperatura do ar, radiação solar global (Rg) e amplitude térmica em função de dias após a emergência (DAE) do milho. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS, 2001/02 e 2002/03.



APÊNDICE 12. Taxa de infiltração (V_i) e infiltração acumulada (I_a) medida e ajustada pelo modelo de Kostiakov-Lewis (Figura 10) em solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

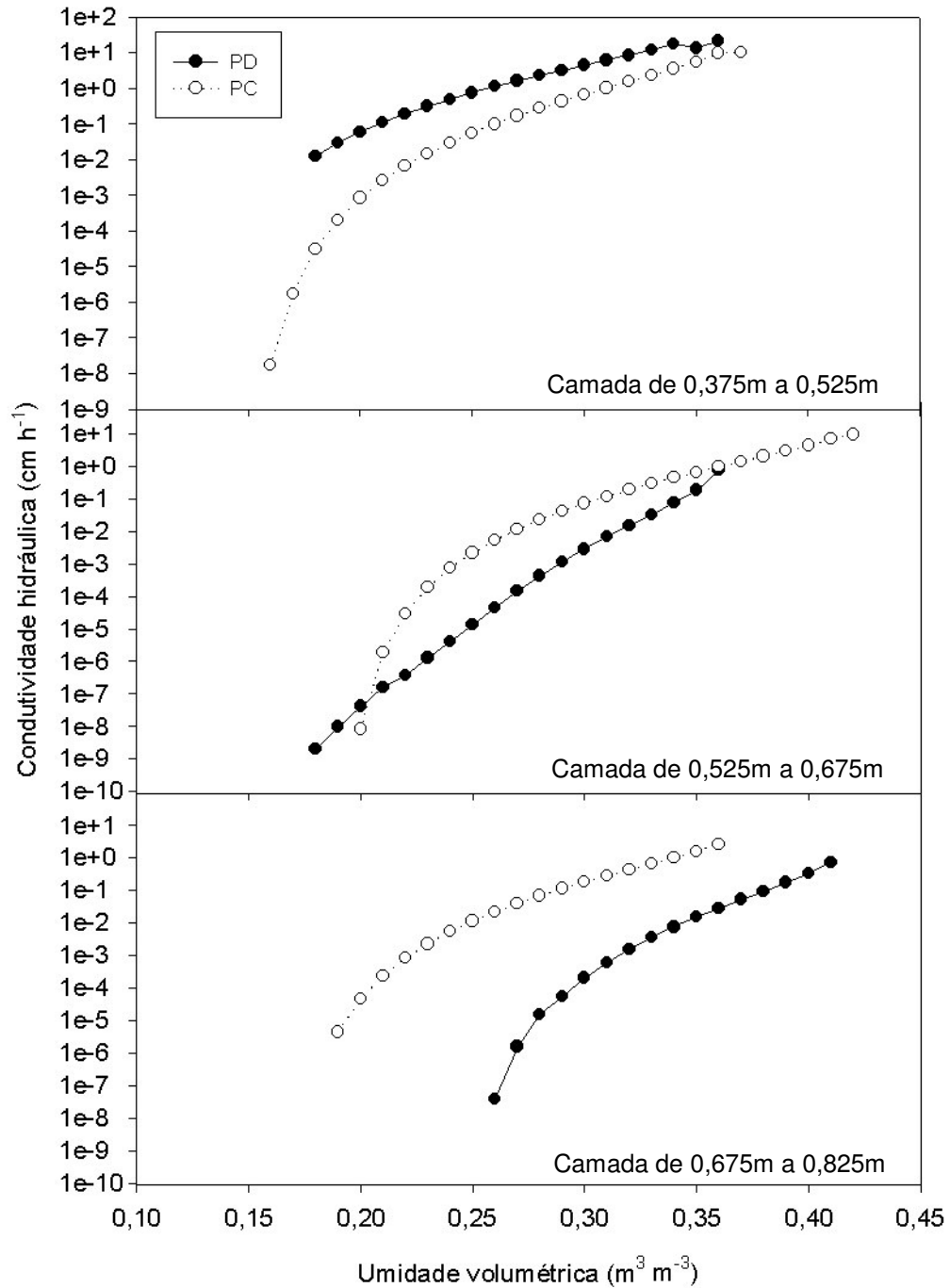


APÊNDICE 13. Coeficientes da equação de estimativa da condutividade hidráulica do solo não saturado ($K(\theta)$), sob plantio direto e preparo convencional, em diferentes profundidades no perfil EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

Profundidade (m)	Parâmetros da equação de estimativa da $K(\theta)$			
	Ko (cm h ⁻¹)	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	m
.....Plantio direto.....				
0,025	3,07*	0,129	0,422	0,3234
0,075	3,07*	0,106	0,337	0,2608
0,15	10,38	0,110	0,334	0,1310
0,3	26,65	0,046	0,372	0,0827
0,45	57,30	0,148	0,397	0,5158
0,6	37,10	0,132	0,403	0,1437
0,75	5,72	0,260	0,449	0,2605
.....Preparo convencional.....				
0,025	7,70*	0,099	0,379	0,1239
0,075	7,70*	0,052	0,345	0,1055
0,15	10,21	-0,129	0,362	0,0502
0,3	10,47	0,073	0,431	0,1506
0,45	26,98	0,157	0,373	0,4091
0,6	18,95	0,199	0,424	0,4376
0,75	9,74	0,260	0,377	0,2951

Ko = condutividade hidráulica saturada, θ_r = umidade residual do solo, θ_s = umidade de saturação do solo, * valores médios da camada 0 a 0,1m.

APÊNDICE 14. Condutividade hidráulica do solo não saturado, estimada para diferentes valores de umidade volumétrica do solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em três diferentes camadas no perfil. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

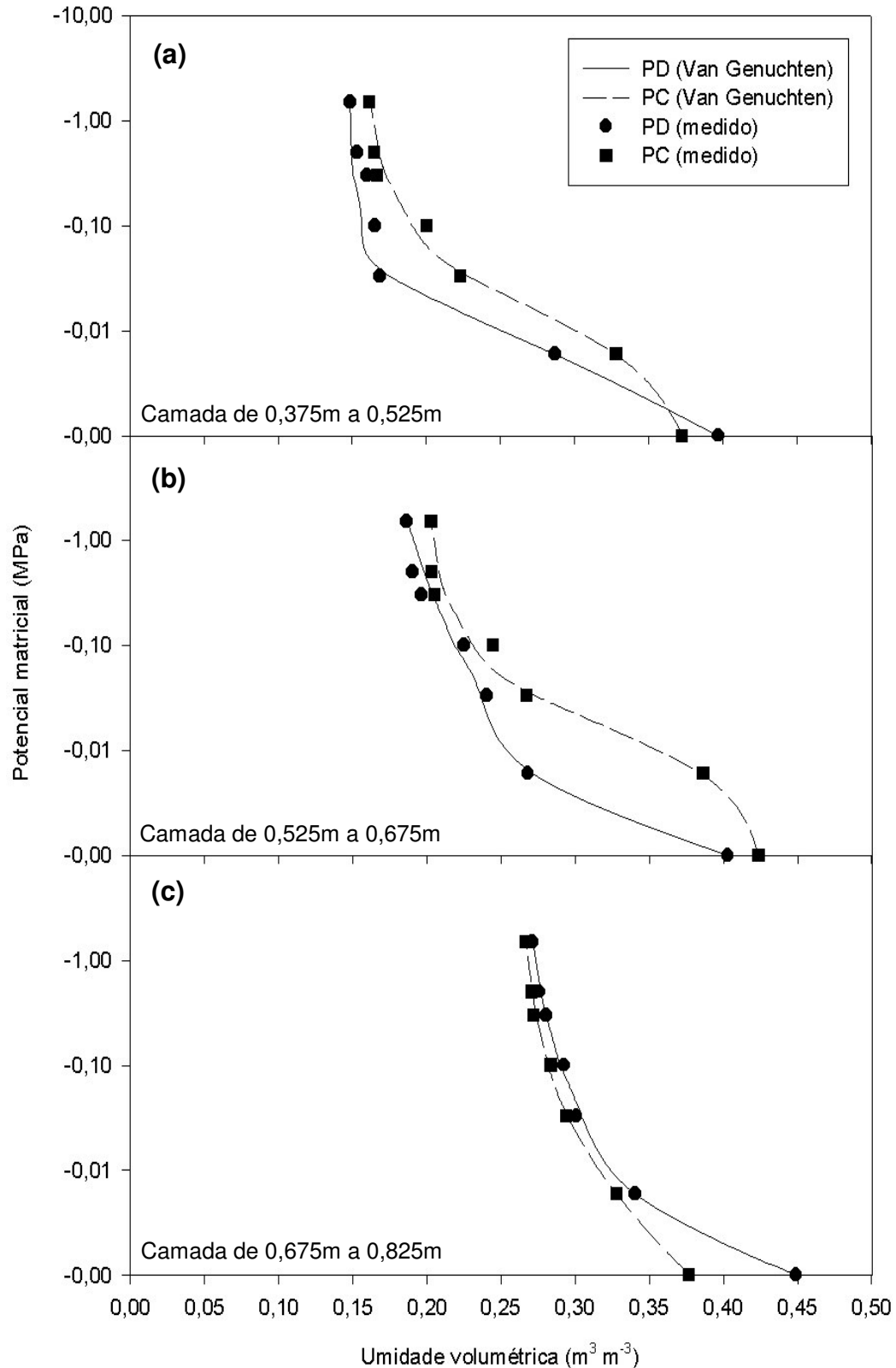


APÊNDICE 15. Coeficientes de ajuste da equação de Van Genuchten para estimativa da retenção de água no solo sob plantio direto e preparo convencional, em diferentes profundidades, com respectivo coeficiente de determinação do ajuste (r^2). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS, 2002.

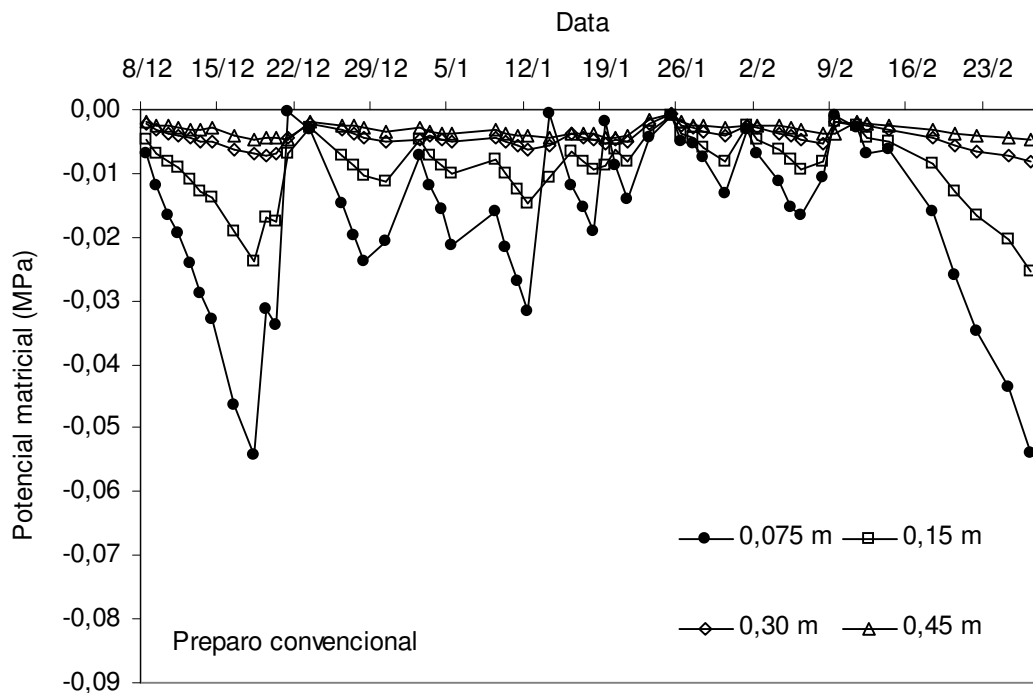
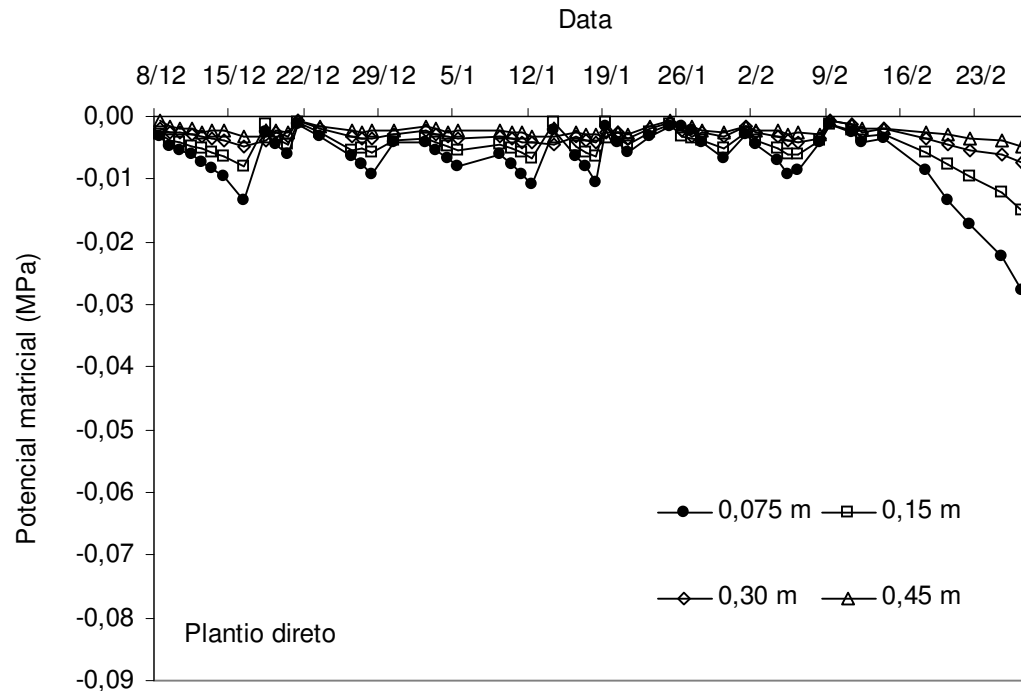
Profundidade (m)	Parâmetros de ajuste de equação de van Genuchten					r^2
	α (MPa ⁻¹)	m	n	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	
.....Plantio direto.....						
0,025	229	0,3234	1,4780	0,129	0,422	0,99
0,075	578	0,2608	1,3529	0,106	0,337	0,99
0,15	17201	0,1310	1,1508	0,110	0,334	0,99
0,3	21483	0,0827	1,0902	0,046	0,372	0,99
0,45	241	0,5158	2,0651	0,148	0,397	0,99
0,6	876	0,1437	1,1678	0,132	0,403	0,99
0,75	1832	0,2605	1,3523	0,260	0,449	0,99
.....Preparo convencional.....						
0,025	1556	0,1239	1,1414	0,099	0,379	0,98
0,075	2868	0,1255	1,1179	0,052	0,345	0,99
0,15	7532	0,0502	1,0529	-0,129	0,362	0,98
0,3	1516	0,1506	1,1773	0,073	0,431	0,98
0,45	145	0,4091	1,6923	0,157	0,373	0,99
0,6	12	0,4376	1,7780	0,199	0,424	0,99
0,75	00054	0,2951	1,4187	0,260	0,377	0,99

OBS: n dependente de m ; θ_r e θ_s obtidos por extrapolação.

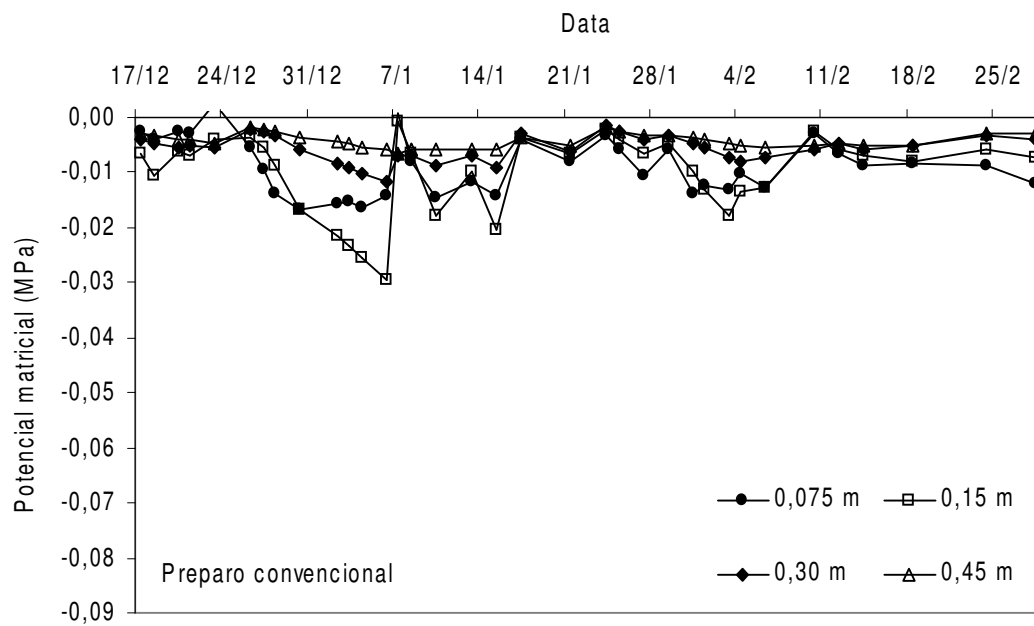
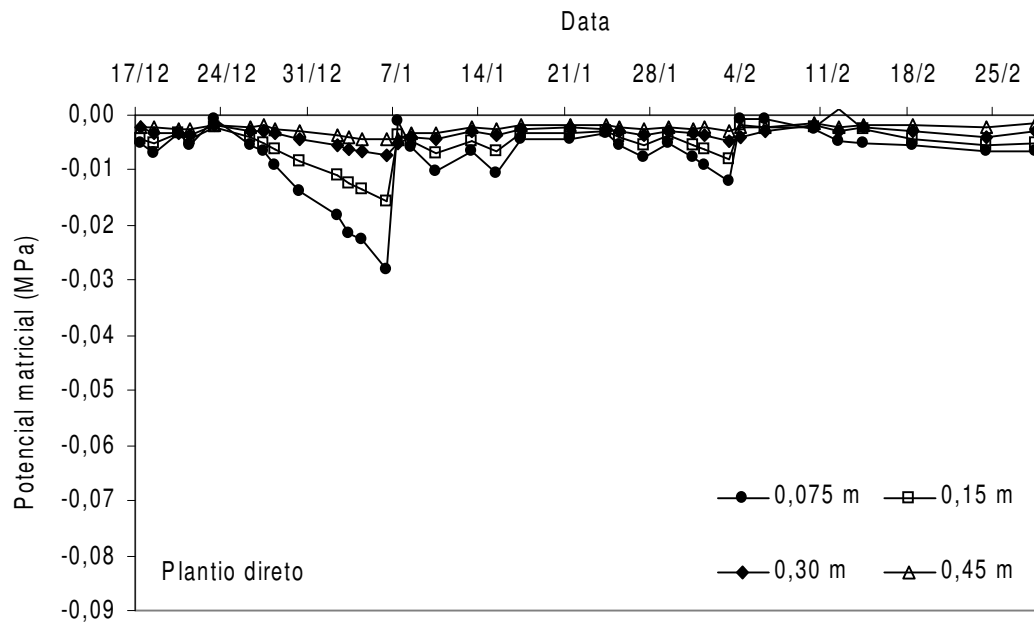
APÊNDICE 16. Curvas características de retenção de água no solo sob plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), para as camadas de 0,375m a 0,525m (a), 0,525m a 0,675m (b) e 0,675m a 0,825m (c) de profundidade – valores medidos e ajustados pelo modelo de Van Genuchten. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS – 2002.



APÊNDICE 17. Evolução do potencial matricial da água no solo em plantio direto e preparo convencional de milho em função do tempo, em quatro profundidades, nos experimentos de 2001/02 (a) e (b) e de 2002/03 (c) e (d) (área sem plantas e com aplicação de irrigação). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS.



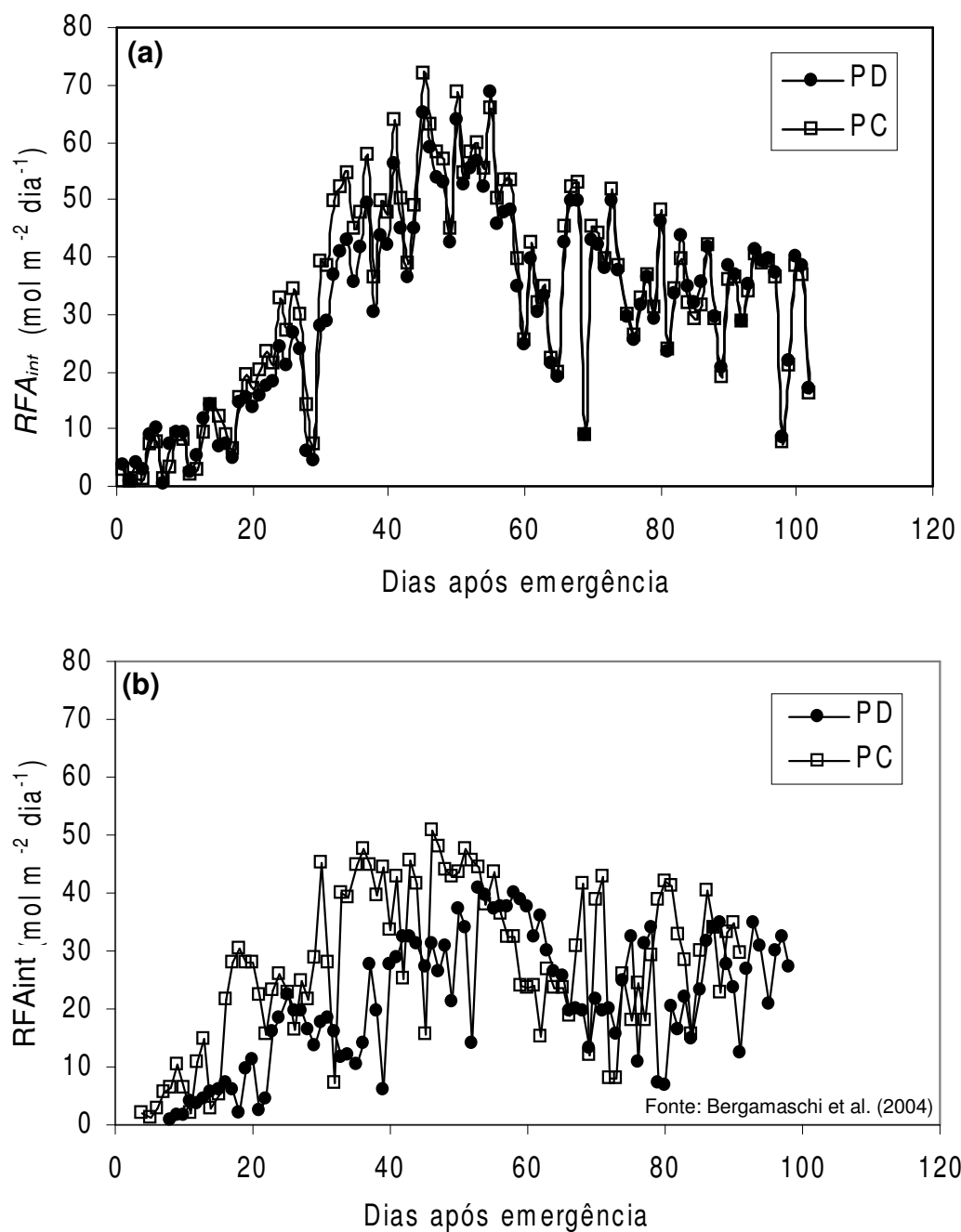
APÊNDICE 17. Continuação.....



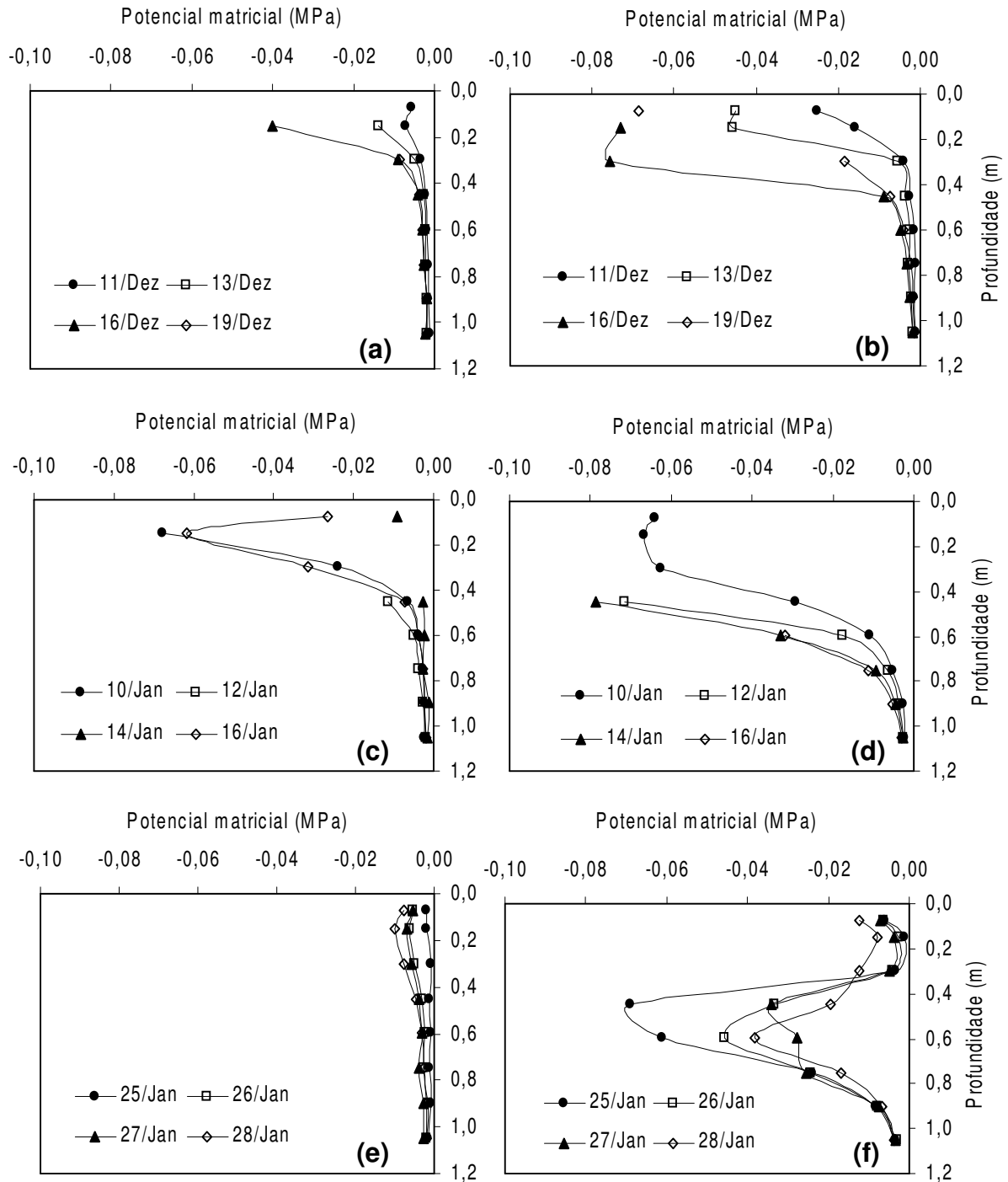
APÊNDICE 18. Graus-dia acumulados (GD_{acm}) até a maturação fisiológica do milho, em função de dias após a emergência (DAE), nos experimentos de 2001/02 e de 2002/03. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul – RS.

DAE	2001/02		2002/03		DAE	Data	GD_{acm}	Data	GD_{acm}
	Data	GD_{acm}	Data	GD_{acm}					
1	24/11	17	03/12	15	52	14/01	749	23/01	809
2	25/11	32	04/12	29	53	15/01	765	24/01	822
3	26/11	42	05/12	46	54	16/01	779	25/01	836
4	27/11	55	06/12	62	55	17/01	792	26/01	852
5	28/11	68	07/12	77	56	18/01	804	27/01	869
6	29/11	80	08/12	90	57	19/01	817	28/01	885
7	30/11	92	09/12	104	58	20/01	832	29/01	901
8	01/12	102	10/12	119	59	21/01	850	30/01	918
9	02/12	113	11/12	134	60	22/01	868	31/01	938
10	03/12	125	12/12	149	61	23/01	884	01/02	957
11	04/12	138	13/12	165	62	24/01	901	02/02	976
12	05/12	152	14/12	181	63	25/01	917	03/02	996
13	06/12	164	15/12	199	64	26/01	932	04/02	1016
14	07/12	178	16/12	216	65	27/01	948	05/02	1036
15	08/12	192	17/12	231	66	28/01	964	06/02	1055
16	09/12	205	18/12	243	67	29/01	981	07/02	1073
17	10/12	215	19/12	257	68	30/01	998	08/02	1091
18	11/12	226	20/12	271	69	31/01	1015	09/02	1106
19	12/12	242	21/12	285	70	01/02	1029	10/02	1123
20	13/12	259	22/12	303	71	02/02	1044	11/02	1141
21	14/12	275	23/12	317	72	03/02	1057	12/02	1158
22	15/12	291	24/12	328	73	04/02	1069	13/02	1172
23	16/12	304	25/12	339	74	05/02	1082	14/02	1186
24	17/12	317	26/12	353	75	06/02	1096	15/02	1201
25	18/12	331	27/12	369	76	07/02	1110	16/02	1215
26	19/12	345	28/12	385	77	08/02	1123	17/02	1229
27	20/12	360	29/12	403	78	09/02	1137	18/02	1241
28	21/12	377	30/12	421	79	10/02	1149	19/02	1252
29	22/12	392	31/12	438	80	11/02	1162	20/02	1265
30	23/12	404	01/01	454	81	12/02	1178	21/02	1277
31	24/12	415	02/01	469	82	13/02	1193	22/02	1289
32	25/12	427	03/01	485	83	14/02	1209	23/02	1306
33	26/12	441	04/01	502	84	15/02	1225	24/02	1322
34	27/12	456	05/01	519	85	16/02	1240	25/02	1339
35	28/12	472	06/01	535	86	17/02	1254	26/02	1357
36	29/12	488	07/01	550	87	18/02	1267	27/02	1376
37	30/12	505	08/01	566	88	19/02	1282	28/02	1395
38	31/12	523	09/01	583	89	20/02	1298	01/03	1412
39	01/01	538	10/01	597	90	21/02	1314	02/03	1428
40	02/01	554	11/01	611	91	22/02	1330	03/03	1444
41	03/01	570	12/01	627	92	23/02	1346	04/03	1461
42	04/01	586	13/01	643	93	24/02	1360	05/03	1478
43	05/01	601	14/01	661	94			06/03	1497
44	06/01	616	15/01	678	95			07/03	1514
45	07/01	632	16/01	695	96			08/03	1533
46	08/01	647	17/01	712	97			09/03	1552
47	09/01	662	18/01	729					
48	10/01	678	19/01	746					
49	11/01	696	20/01	761					
50	12/01	713	21/01	777					
51	13/01	732	22/01	795					

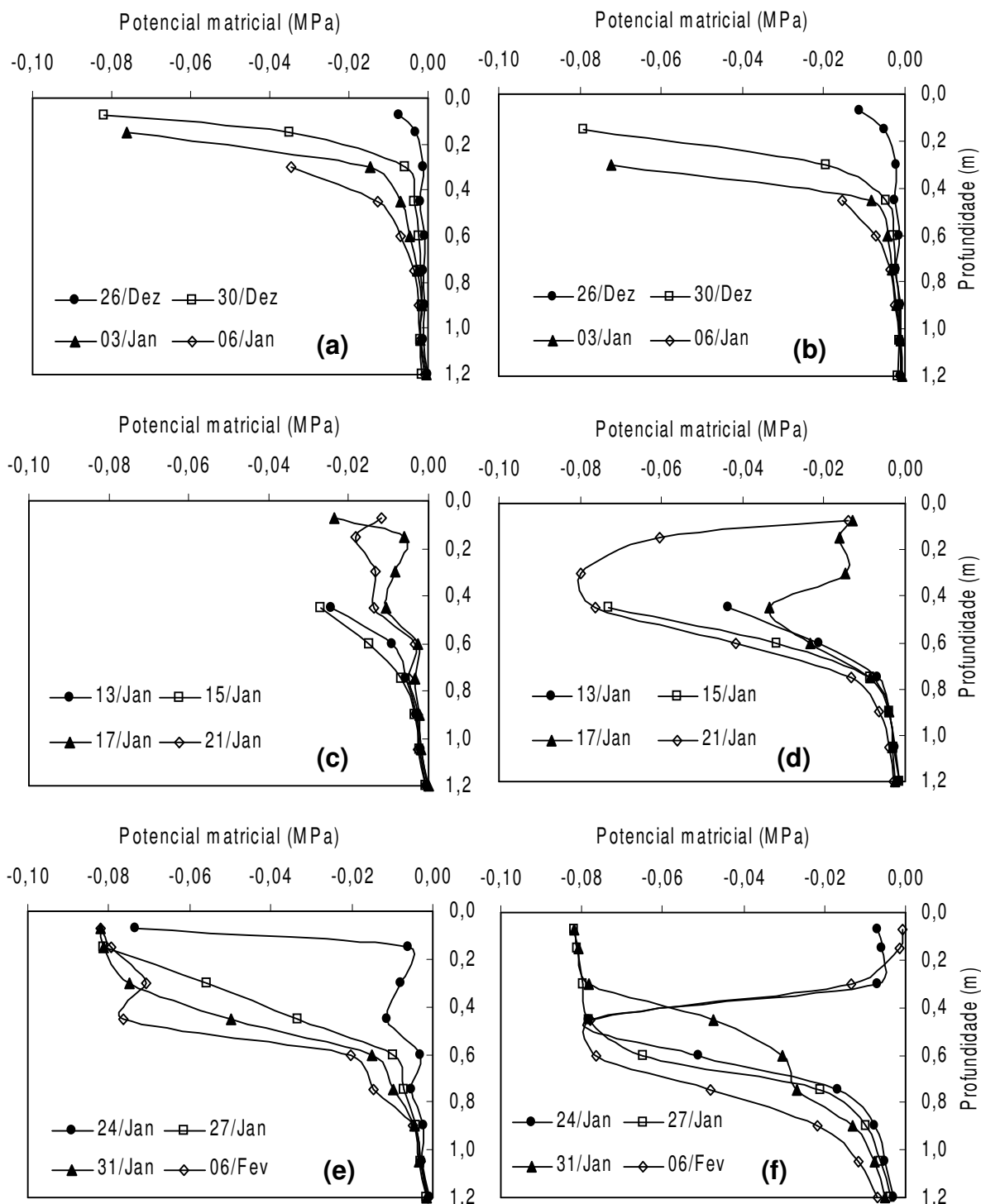
APÊNDICE 19. Radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_{int}) pelo milho cultivado no solo em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) sem irrigação, durante o ciclo da cultura nos experimentos de 2001/02 (a) e 2002/03 (b), respectivamente. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.



APÊNDICE 20. Potencial matricial da água no solo em plantio direto [(a), (c), (e)] e preparo convencional [(b), (d), (f)], no crescimento vegetativo [(a), (b)], pendoamento/espigamento [(c), (d)] e no enchimento de grãos [(e), (f)] do milho, numa seqüência de quatro dias durante o experimento de 2001/02. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul.



APÊNDICE 21. Potencial matricial da água no solo em plantio direto [(a), (c), (e)] e preparo convencional [(b), (d), (f)], no crescimento vegetativo [(a), (b)], pendoamento/espigamento [(c), (d)] e no enchimento de grãos [(e), (f)] do milho, numa seqüência de quatro dias, durante o experimento de 2002/03. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

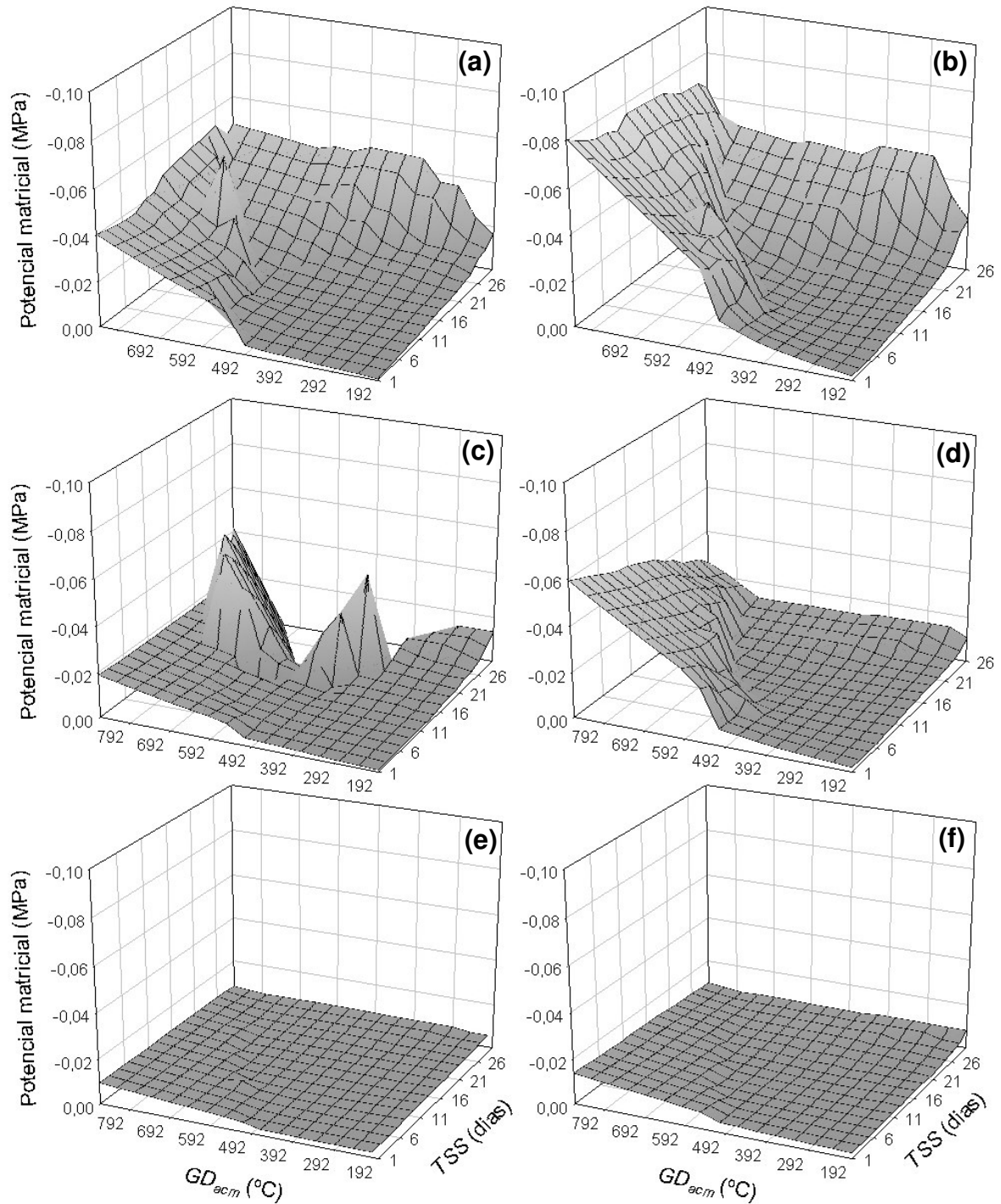


APÊNDICE 22. Valores máximos e mínimos e número de observações (n°) para variáveis de ajuste de modelos de estimativa da secagem e extração de água do solo, para o plantio direto e preparo convencional, em diferentes profundidades no solo (z), apresentados na Tabela 10. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

z (m)	n°	TSS (dias)		GD_{acm} ($^{\circ}C$)	
		Mínimo	Máximo	mínimo	máximo
.....Plantio direto.....					
0,075	18	1	11	215	421
0,150	23	1	12	215	481
0,300	31	1	16	205	550
0,450	36	1	24	192	678
0,600	34	1	30	192	777
0,750	37	1	30	192	777
0,900	35	1	30	192	777
.....Preparo convencional.....					
0,075	13	1	9	192	441
0,150	20	1	11	192	441
0,300	25	1	15	192	441
0,450	33	1	19	192	597
0,600	37	1	24	192	678
0,750	32	1	22	192	643
0,900	34	1	30	192	777

OBS: TSS = tempo de secagem do solo, GD_{acm} = graus-dia acumulados.

APÊNDICE 23. Evolução do potencial matricial da água no solo sob plantio direto (esquerda) e preparo convencional (direita), em função do tempo de secagem do solo (TSS) e de graus-dia acumulados (GD_{acm}) após a emergência do milho, para as profundidades de 0,6m (a) e (b), 0,75m (c) e (d) e 0,9m (e) e (f). EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.



APÊNDICE 24. Massa de solo média no interior dos microlisímetros instalados no solo em PD e PC, nos experimentos de 2001/02 e 2002/03. EEA/UFRGS, Eldorado do Sul - RS, 2001/02 e 2002/03.

Sistema de Manejo do solo	Experimento 2001/02		Experimento 2002/03	
	Massa (g)	Densidade (Mg m ⁻³)	Massa (g)	Densidade (Mg m ⁻³)
PD	3487 a	1,54 a	3367 a	1,53 a
PC	3182 b	1,40 b	3328 a	1,44 b

OBS: valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.