

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

VARIABILIDADE DO POTENCIAL MÁTRICO E DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO EM EXPERIMENTO DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO⁽¹⁾

C. R. MARCIANO⁽²⁾, S. O. MORAES⁽³⁾, A. M. SAAD⁽⁴⁾ & P. L. LIBARDI⁽⁵⁾

RESUMO

Desenvolveu-se um experimento de manejo de irrigação de milho (*Zea mays* L.), cultivado em Latossolo Roxo, de julho a dezembro de 1994, em Guaira (SP). Os tratamentos, com 4 repetições, foram: tr000 - aplicação de metade da lâmina de água recomendada durante todo o ciclo da cultura; tr010 - aplicação da lâmina recomendada somente na fase intermediária da cultura, e metade dessa lâmina na fase inicial e final; e trIII - aplicação da lâmina recomendada durante todo o ciclo da cultura. Utilizando tensiômetros, mediu-se o potencial mátrico de 0,10 a 1,00 m de profundidade, de 0,10 em 0,10 m e, a partir dos valores obtidos, analisaram-se a variabilidade e a propagação desta para o conteúdo de água no solo. Os resultados mostraram que: (1) eventualmente, nas primeiras leituras realizadas após irrigação ou precipitação pluvial, o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo mostraram acréscimos em suas variabilidades, pelo fato de, em alguma repetição, a frente de molhamento não ter atingido a cápsula porosa do tensiômetro; (2) o valor do potencial mátrico aumentou em profundidade, tendência que foi acompanhada de um aumento da estabilidade temporal e de uma redução da variabilidade espacial; (3) o potencial mátrico apresentou variabilidade elevada e heterogeneidade de variância; (4) a variabilidade do conteúdo de água no solo foi menos acentuada que a do potencial mátrico, para toda a faixa estudada. Mediante tais resultados, foi possível concluir que a irrigação pode ser manejada com alto nível de confiança estatística quando os resultados de potencial mátrico são transformados para conteúdo de água no solo, transformação esta que minimiza os problemas de variabilidade.

Termos de indexação: tensiômetro, curva de retenção, propagação de erros.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor apresentada ao Curso de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP. Trabalho apresentado no XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, no Rio de Janeiro (RJ), de 20 a 26 de julho de 1997. Recebido para publicação em setembro de 1997 e aprovado em agosto de 1998.

⁽²⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Física e Meteorologia - ESALQ/USP, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: crmarcia@carpa.ciagri.usp.br. Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP. E-mail: somoraes@carpa.ciagri.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador Doutor colaborador do IPT/Digeo. Em pós-doutoramento em Irrigação e Drenagem. Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. E-mail: amsaad@carpa.ciagri.usp.br

⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP. E-mail: pllibard@carpa.ciagri.usp.br. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: MATRIC POTENTIAL AND SOIL WATER CONTENT VARIABILITY IN IRRIGATION MANAGEMENT EXPERIMENT

A four replicated maize (Zea mays L.) crop irrigation management experiment was carried out in a Typic Haporthox soil of Guaíra (SP), Brazil (20°27'30"S, 48°19'30"W, 495 m) from July to December, 1994. There were three treatments: tr000 - half of the recommended amount of water was applied during the crop cycle; tr010 - the recommended amount of water was applied only during the intermediate stage and half of it during the initial and the final stages; and trIII - the recommended amount of water was applied during the whole period of the crop. The soil water matric potential was assessed by means of tensiometers, from 0.10 to 1.00 m deep, at each 0.10 m to study the variability propagation of matric potential to the soil water content. Ranges of matric potential and soil water content values, with high variability, were also identified. The results showed that: (1) occasionally, measurements of matric potential and soil water content just after irrigation or rain showed a considerable increase of variability due to the fact that in some replications, the wetting front did not reach the tensiometer porous cup; (2) the matric potential and its stability over the time increased with depth, but its spatial variability decreased at depth; (3) the matric potential variability was high and showed variance heterogeneity; (4) the variability of soil water content was less accentuated than that of the matric potential for the whole studied range. According to the results, it was concluded that the irrigation management can be done with a high level of statistical confidence when matric potential values are converted into soil water content values, because the variability problems are minimized by this transformation.

Index terms: tensiometer; retention curve, error propagation.

INTRODUÇÃO

A irrigação permite suplementar o fornecimento de água às culturas. Entretanto, devem-se considerar critérios para racionalizar essa aplicação de água. A suplementação retardada pode resultar em déficits hídricos que reduzem a produção. Por outro lado, aplicações excessivas ou muito freqüentes de água podem agravar problemas fitossanitários, reduzir a aeração do solo e remover nutrientes da zona radicular, diminuindo a produção e a eficiência do uso da água. A irrigação muito freqüente aumenta os custos, além de contribuir para aumentar as perdas por evaporação.

Existem diversos métodos para controlar a irrigação. Destes, o monitoramento do conteúdo de água no solo, até a profundidade de absorção de água pelo sistema radicular, tem sido bem-sucedido, e o uso do tensiômetro é uma opção para esse monitoramento (Libardi & Saad, 1994). Entretanto, o potencial mátrico pode apresentar variabilidade, a qual pode ser maior ou menor, dependendo do teor de água no solo (Hendrickx & Wierenga, 1990).

Neste trabalho, objetivou-se estudar a propagação dessa variabilidade para os valores de conteúdo de água no solo obtidos em um experimento de manejo de irrigação da cultura do milho por meio do tensiômetro.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em Latossolo Roxo (Typic Haplustox), de julho a dezembro de 1994, em Guaíra (SP). Com base em Fancelli (1991), definiram-se três fases da cultura do milho: fase I (desenvolvimento vegetativo), fase II (do florescimento ao estágio de grãos pastosos-farináceos) e fase III (maturação). Os tratamentos foram tr000 - aplicação de metade da lâmina de água recomendada durante todo o ciclo da cultura; tr010 - aplicação da lâmina recomendada somente na fase II da cultura, aplicando-se metade dessa lâmina nas fases I e III, e trIII - aplicação da lâmina recomendada durante todo o ciclo da cultura. Os tratamentos foram repetidos em quatro blocos, somando 12 parcelas experimentais de 72 m² cada, numa área experimental de 22 x 45,2 m, ou seja, 994,4 m² (Figura 1). A irrigação foi por microaspersão suspensa em uma estrutura metálica.

O monitoramento da água no solo ao longo do tempo foi realizado por meio de tensiômetros de manômetro de mercúrio (Libardi, 1995) instalados a 0,20 m do centro geométrico da 6ª linha de cada parcela. As profundidades de instalação foram de: 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90 e 1,00 m. A altura da cuba de mercúrio em relação à superfície do solo foi de 0,30 m para todas as baterias de tensiômetros.

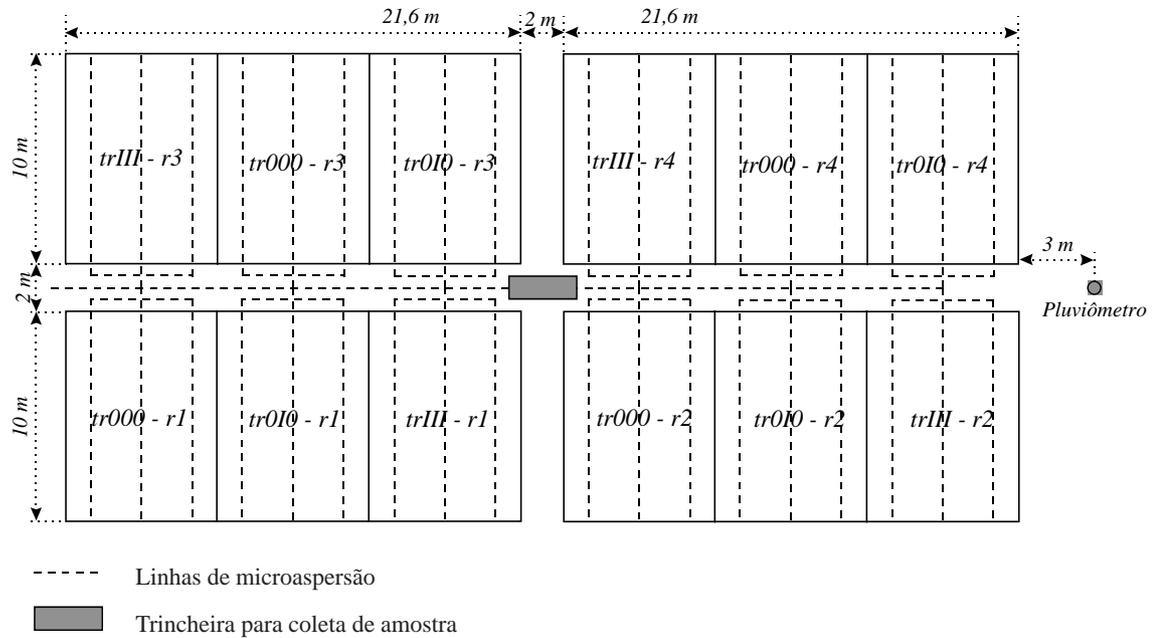


Figura 1. Esquema da área experimental.

O critério utilizado para aplicação das lâminas de água obedeceu às fases de desenvolvimento da cultura. Na fase I (desenvolvimento vegetativo), a irrigação era realizada quando o valor médio do potencial mátrico a 0,20 m, do tratamento *trIII*, fosse de -50 kPa. Nessa condição, o valor da lâmina aplicada para a elevação do conteúdo de água no solo à capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico de -8 kPa) na camada de irrigação (0,0 a 0,30 m) era de 20 mm. Os tratamentos com déficit de água recebiam metade dessa lâmina, ou seja, 10 mm. Na fase II (período reprodutivo), a irrigação era realizada quando o valor médio do potencial mátrico a 0,30 m, do tratamento *trIII*, fosse de -30 kPa. Nessa fase, a partir da qual a camada de irrigação considerada era de 0,0 a 0,45 m, o valor da lâmina aplicada nos tratamentos sem déficit de água era de 24 mm e, no tratamento com déficit, de 12 mm. Na fase III (maturação), a irrigação era feita quando o valor médio do potencial mátrico a 0,30 m, do tratamento *trIII*, fosse de -70 kPa. Nessa condição, o valor da lâmina aplicada no tratamento sem déficit de água era de 34 mm e no tratamento com déficit de água era de 17 mm. As leituras de altura da coluna de mercúrio foram realizadas diariamente às 17:00 h, obtendo-se o potencial mátrico (ϕ_m , em kPa), pela equação:

$$\phi_m = -126H + 10h_c + 10z \quad (1)$$

em que H , h_c e z representam, respectivamente, a altura do mercúrio no manômetro, a altura da superfície do mercúrio na cuba em relação à superfície do solo e a profundidade de instalação do

tensiômetro, em m. Na equação 1, está-se considerando o valor da aceleração da gravidade igual a 10 m s^{-2} , a massa específica do mercúrio igual a 13.600 kg m^{-3} e a massa específica da água igual a 1.000 kg m^{-3} .

A partir de amostras com estrutura indeformada, coletadas em uma trincheira aberta no centro da área experimental, elaboraram-se curvas de retenção da água no solo para cada profundidade, conforme Klute (1986). Os resultados foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\phi_m / \alpha)^n \right]^{-m} \quad (2)$$

em que θ_s é o conteúdo de água no solo na saturação; θ_r o conteúdo de água residual no solo a 1,5 MPa, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; α (em kPa^{-1}), m e n são parâmetros empíricos de ajuste. Os valores do conteúdo de água no solo (θ , em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), correspondentes a cada valor de ϕ_m obtido, foram calculados a partir da equação 2, substituindo-se os parâmetros correspondentes a cada profundidade (Quadro 1).

A variabilidade foi estudada por meio de desvios-padrões e coeficientes de variação. Para o potencial mátrico, o desvio-padrão (dp_{ϕ_m} , em kPa) e o coeficiente de variação (CV_{ϕ_m} , em %) foram calculados diretamente a partir dos quatro valores diários de ϕ_m , obtidos para cada tratamento e profundidade pela equação 1, e de seu valor médio $\bar{\phi}_m$. As equações são, respectivamente,

$$dp_{\phi_m} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\phi_{m_i} - \bar{\phi}_m)^2}{3}} \quad (3)$$

Quadro 1. Parâmetros da equação de van Genuchten (1980), obtidos do ajuste aos dados experimentais para as profundidades estudadas

Profundidade	θ_s	θ_r	α	m	n
m	— m ³ m ⁻³ —		kPa ⁻¹		
0,10	0,600	0,266	0,9651	0,3057	1,440
0,20	0,532	0,282	1,4833	0,2530	1,338
0,30	0,571	0,247	3,3617	0,2116	1,268
0,40	0,581	0,268	2,5741	0,2435	1,321
0,50	0,579	0,268	2,5741	0,2435	1,321
0,60	0,592	0,278	0,5801	0,4200	1,724
0,70	0,591	0,244	0,5321	0,3773	1,605
0,80	0,608	0,255	0,5963	0,3892	1,637
0,90	0,619	0,252	0,6057	0,3585	1,558
1,00	0,621	0,241	0,5342	0,3600	1,562

e

$$CV_{\phi_m} = \frac{dp_m \cdot 100}{\phi_m} \quad (4)$$

Para o conteúdo de água no solo, tanto o desvio-padrão ($dp\theta$, em m³ m⁻³) quanto o coeficiente de variação ($CV\theta$, em %) foram calculados de duas maneiras. A primeira foi diretamente, a partir dos quatro valores diários de θ , obtidos pela equação 2 para cada tratamento e profundidade, e de seu valor médio $\bar{\theta}$. As equações são, respectivamente,

$$dp\theta = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\theta_i - \bar{\theta})^2}{3}} \quad (5)$$

e

$$CV_{\theta} = \frac{dp_{\theta} \cdot 100}{\theta} \quad (6)$$

A segunda maneira foi analiticamente, por meio da lei da propagação de erros. Para isto, deve-se conhecer a equação diferencial de θ em relação a ϕ_m , que pode ser calculada a partir da equação 2, resultando

$$\frac{d\theta}{d|\phi_m|} = (\theta_r - \theta_s) \cdot [1 + (\phi_m |\alpha|^n)]^{-m-1} \cdot m \cdot n \cdot \alpha^n \cdot |\phi_m|^{n-1} \quad (7)$$

em que ϕ_m é considerado em termos de valor absoluto $|\phi_m|$ por exigência do modelo apresentado. Esta equação rearranjada fornece

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

ou seja, conhecendo-se um desvio $d|\phi_m|$, pode-se determinar, pela equação supra, o desvio $d\theta$

correspondente. Se o desvio $d|\phi_m|$ considerado for o desvio-padrão dp_{ϕ_m} ($= d^p |\phi_m|$), o desvio $d\theta$ correspondente será o desvio-padrão dp_{θ} , como se segue

$$dp_{\theta} = dp_{\phi_m} \cdot (\theta_r - \theta_s) \cdot [1 + (\phi_m |\alpha|^n)]^{-m-1} \cdot m \cdot n \cdot \alpha^n \cdot |\phi_m|^{n-1} \quad (9)$$

No entanto, para determinar o coeficiente de variação CV_{θ} a partir do coeficiente de variação CV_{ϕ_m} , devem-se rearranjar as equações 4 e 6 de maneira a isolar dp_{ϕ_m} e dp_{θ} , respectivamente, e substituí-las na equação 9, obtendo

$$CV_{\theta} = \frac{\bar{\phi}_m}{\theta} \cdot CV_{\phi_m} \cdot (\theta_r - \theta_s) \cdot [1 + (\phi_m |\alpha|^n)]^{-m-1} \cdot m \cdot n \cdot \alpha^n \cdot |\phi_m|^{n-1} \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta as médias diárias do potencial mátrico (pontos no centro das barras verticais no corpo do gráfico) para duas profundidades (0,10 e 0,80 m) do tratamento *tr010*, bem como os respectivos desvios-padrões (barras verticais). Verifica-se que, em geral, o valor médio do potencial mátrico a 0,10 m (Figura 2a) de profundidade foi menor que a 0,80 m (Figura 2 b). Calculando, a partir das médias diárias, as médias gerais para todo o período, as quais são representadas por linhas horizontais tracejadas no corpo dos gráficos, confirma-se esse fato. O mesmo cálculo feito para as demais profundidades desse e dos outros tratamentos (cujos resultados são apresentados no Quadro 2) mostram que as médias gerais do potencial mátrico de todo o período sempre aumentaram em profundidade. Quanto à estabilidade temporal do potencial mátrico, a figura 2 evidencia o seu aumento em profundidade. Os desvios-padrões calculados a partir do conjunto de valores de médias diárias de potencial mátrico ao longo do ciclo da cultura, apresentados no quadro 2 para cada tratamento, confirmam esse aumento da estabilidade temporal, pois seus valores diminuem em profundidade. Por outro lado, sendo os desvios padrões diários (barras verticais, Figura 2) medidas da variabilidade espacial, verifica-se que, em geral, esta foi maior a 0,10 do que a 0,80 m de profundidade. As médias gerais desses desvios-padrões diários para todo o período, também apresentadas no quadro 2 para cada tratamento, mostram que essa tendência pode ser generalizada, ou seja, a variabilidade espacial foi decrescente em profundidade.

Cabe ressaltar, ainda, que os maiores valores de desvio-padrão ou coeficientes de variação encontrados foram obtidos de leituras feitas logo após a realização de irrigações ou da ocorrência de precipitações pluviais. Isto ocorreu, principalmente, em profundidades próximas ao limite inferior da camada de irrigação (0,30 m, para a fase I, ou 0,45 m, para

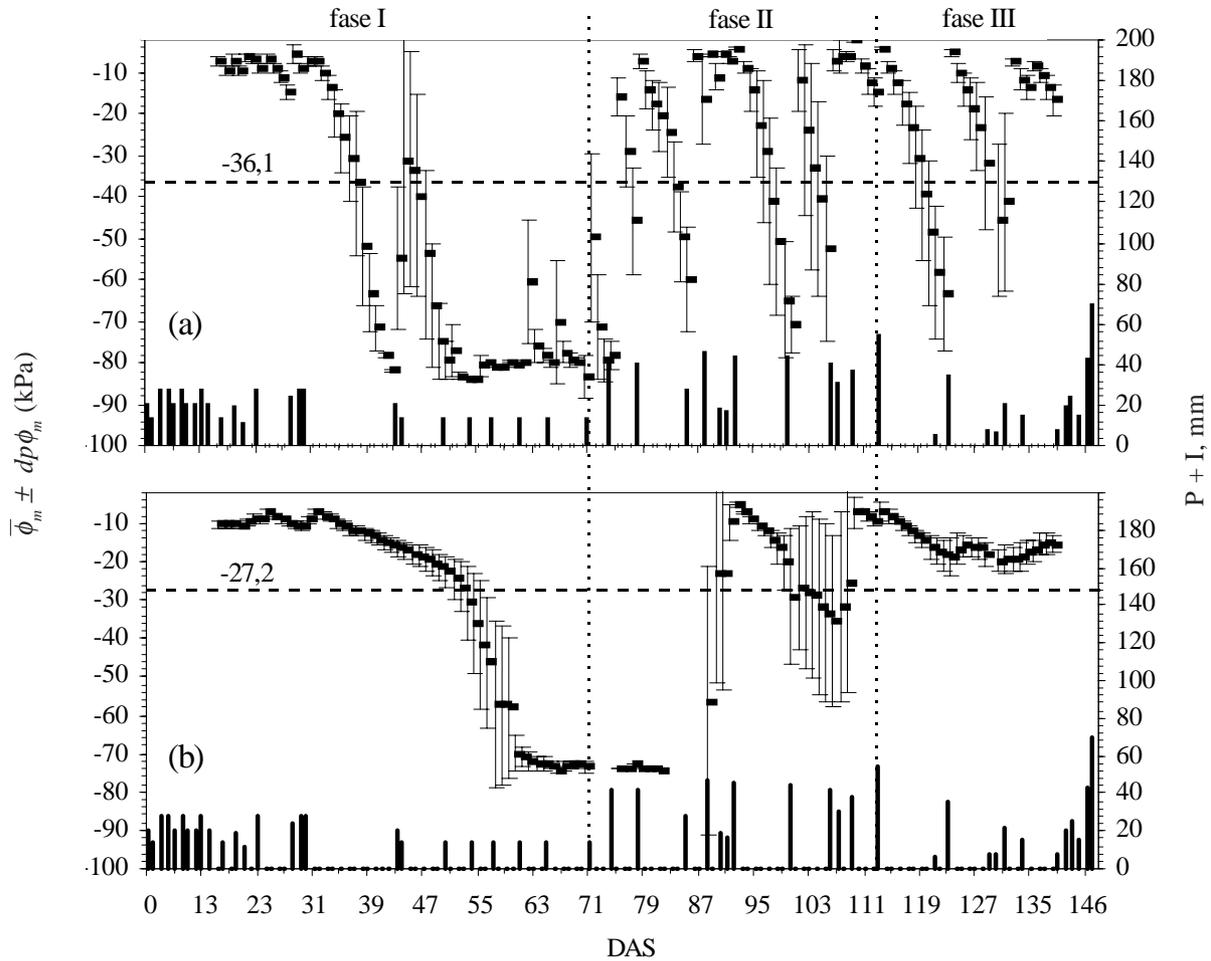


Figura 2. Desvios-padrões (dp_{ϕ_m} - barras verticais no corpo do gráfico), potencial mátrico médio diário ($\bar{\phi}_m$, pontos no centro das barras verticais) e médias gerais (linhas horizontais cruzando o gráfico), em kPa, e lâminas de água precipitada ou irrigada (P + I, mm), ao longo do tempo (DAS, dias após a semeadura): tratamento tr010, (a) 0,10 m e (b) 0,80 m de profundidade.

Quadro 2. Médias gerais dos potenciais mátricos para todo o ciclo (\bar{m} , calculadas a partir das médias diárias), desvios-padrões das médias diárias ($dp_{\bar{m}}$) e médias dos desvios-padrões diários (\bar{dp})

Profundidade	tr000			tr010			trIII		
	\bar{m}	$dp_{\bar{m}}$	\bar{dp}	\bar{m}	$dp_{\bar{m}}$	\bar{dp}	\bar{m}	$dp_{\bar{m}}$	\bar{dp}
m	kPa								
0,10	-38,7	27,7	7,6	-36,1	28,5	7,1	-22,8	17,4	7,3
0,20	-30,6	24,0	7,5	-33,7	27,6	5,6	-22,1	16,7	5,5
0,30	-30,9	25,4	5,9	-31,5	25,3	7,6	-21,4	14,4	6,5
0,40	-29,4	25,5	4,0	-29,0	24,7	5,0	-22,9	16,6	7,7
0,50	-28,1	23,8	5,1	-26,8	23,2	4,9	-22,3	16,5	7,5
0,60	-27,8	23,5	4,2	-29,6	24,5	5,4	-21,0	14,3	7,8
0,70	-27,6	22,9	4,8	-25,7	22,2	5,1	-19,8	13,3	6,9
0,80	-24,9	18,7	7,2	-27,2	22,9	5,4	-18,4	10,7	6,1
0,90	-27,3	21,9	4,6	-25,9	21,6	6,0	-18,4	10,6	6,2
1,00	-27,3	20,7	4,6	-24,3	20,0	5,6	-18,2	9,5	6,2

as fases II e III), em profundidades menores, nas situações de subaplicação de água, em que a frente de molhamento realmente não deve ter atingido o limite inferior da camada de irrigação, ou em outras profundidades, conseqüência de precipitações pluviais. Essa variabilidade não tem importância relevante para o manejo da irrigação, justamente por ser decorrente de uma aplicação de água, mas pode servir como indicativo da qualidade da irrigação efetuada.

Exemplos dessas situações são apresentados nos quadros 3 e 4. No quadro 3, verifica-se que no 85º dia após semeadura (DAS) a média foi de -60,1 kPa e o desvio-padrão de 6,7 kPa. Uma irrigação no 85º DAS elevou o potencial mátrico médio no 86º DAS para -23,0 kPa, o que, no entanto, foi acompanhado de um aumento do desvio-padrão para 33,3 kPa. Em termos do coeficiente de variação, esse aumento foi de 11,1 para 144,8%. Vê-se que a causa desse aumento de variabilidade foi que o tensiômetro da repetição r4 não foi atingido pela frente de molhamento, não tendo havido aumento de ϕ_m . No quadro 4, apresenta-se um exemplo semelhante, tendo, no entanto, ocorrido o aumento da variabilidade após uma precipitação pluvial, e não uma irrigação. Considerando a alta uniformidade espacial freqüentemente encontrada para as chuvas em áreas pequenas (Dourado Neto, 1989), essa elevação da

variabilidade do potencial mátrico obtido é um indicativo de diferenças nas condições hídricas do solo anteriores à precipitação, de tal forma que a mesma lâmina aplicada atingiu profundidades de penetração diferentes.

Calculando médias e desvios-padrões para os valores de θ obtidos a partir de ϕ_m , verificou-se comportamento similar ao discutido, porém com níveis de variabilidade de θ bastante inferiores aos de ϕ_m . Essas variabilidades puderam ser comparadas, utilizando-se como índice o coeficiente de variação. Para θ , os coeficientes de variação raramente atingiram 10%, enquanto, para ϕ_m chegaram a ultrapassar 100%. Uma análise da propagação da variabilidade de ϕ_m para θ , seja esta variabilidade de θ determinada diretamente pela equação 6 ou analiticamente pela equação 10, mostra que realmente há diminuição acentuada da variabilidade na conversão. Por exemplo, do quadro 5 (mesmo tratamento, profundidade e período retratado no Quadro 3), para o 87º DAS, em que $\bar{\phi}_m = -23,2$ kPa e $CV_{\phi_m} = 103,4\%$, estimam-se um valor de $\bar{\theta} = 0,357$ m³ m⁻³ (equação 2 aplicada ao $\bar{\phi}_m$) e um coeficiente de variação $CV_{\theta} = 7,3\%$ (equação 10). Tais valores estão relativamente próximos aos de $\bar{\theta}$ e CV_{θ} calculados diretamente a partir dos valores de θ de cada repetição (respectivamente, 0,367 m³ m⁻³ e 5,6%).

Quadro 3. Aumento da variabilidade do potencial mátrico após irrigação (I): tratamento tr010, profundidade de 0,20 m

Tempo após semeadura	Repetição				Média aritmética	Desvio-padrão	CV	I
	r1	r2	r3	r4				
dia	kPa						%	mm
85	-63,0	-56,8	-52,7	-68,0	-60,1	6,7	11,1	28
86	-5,7	-5,5	-7,7	-72,9	-23,0	33,3	144,8	
87	-10,6	-10,6	-12,3	-59,2	-23,2	24,0	103,4	

Quadro 4. Aumento da variabilidade do potencial mátrico após precipitação (P): tratamento tr000, profundidade de 0,10 m

Tempo após semeadura	Repetição				Média aritmética	Desvio-padrão	CV	P
	r1	r2	r3	r4				
dia	kPa						%	mm
86	-79,1	-81,6	-38,4	-78,5	-69,4	20,7	29,8	
87	-80,5	-80,4	-40,6	-77,2	-69,7	19,4	27,8	
88	-6,5	-80,5	-5,7	-36,1	-32,2	35,1	109,0	47
89	-13,6	-14,5	-12,8	-13,2	-13,5	0,7	5,2	

Este comportamento pode ser explicado matematicamente pela equação 10, donde

$$CV_{\theta} = \frac{\bar{\phi}_m}{\theta} CV_{\phi_m} \frac{d\theta}{d|\phi_m|} \quad (11)$$

ou seja, $CV_{\theta} = CV_{\phi_m}$ somente se $\frac{\bar{\phi}_m}{\theta} \frac{d\theta}{d|\phi_m|} = 1$. No entanto, a igualdade $CV_{\theta} = CV_{\phi_m}$ não se verifica porque, em geral, o produto $\frac{\bar{\phi}_m}{\theta} \frac{d\theta}{d|\phi_m|}$ é muito menor que a unidade

(Figura 3) e, portanto, CV_{ϕ_m} é muito maior que CV_{θ} . O formato da curva mostra, ainda, que a relação $CV_{\theta} / CV_{\phi_m}$ não é constante em função de $\bar{\phi}_m$, sendo crescente numa porção inicial e decrescente em sua maior parte. Isto evidencia que, se o CV_{θ} for assumido como constante em relação a $\bar{\theta}$ (e conseqüentemente em relação a $\bar{\phi}_m$), CV_{ϕ_m} variará de maneira inversa a $\frac{\bar{\phi}_m}{\theta} \frac{d\theta}{d|\phi_m|}$, ou seja, será decrescente numa porção inicial e crescente na maior parte.

Quadro 5. Propagação da variabilidade de ϕ_m para θ : tratamento tr010, profundidade de 0,20 m

Tempo após semeadura	ϕ_m (Valores calculados)			θ (Valores calculados*)			θ (Valores estimados**)		
	Média	dp	CV	Média	dp	CV	Média	dp	CV
dia	kPa			m ³ m ⁻³			m ³ m ⁻³		
			%			%			%
85	-60,1	6,7	11,1	0,336	0,0021	0,6	0,336	0,0020	0,6
86	-23,0	33,3	144,8	0,381	0,0327	8,6	0,357	0,0364	10,2
87	-23,2	24,0	103,4	0,367	0,0205	5,6	0,357	0,0259	7,3

* Calculados diretamente a partir dos valores de θ de cada repetição; ** $\bar{\theta}$ estimado a partir de $\bar{\phi}_m$; dp_{θ} estimado pela equação 9; CV_{θ} estimado pela equação 10.

0,10 m

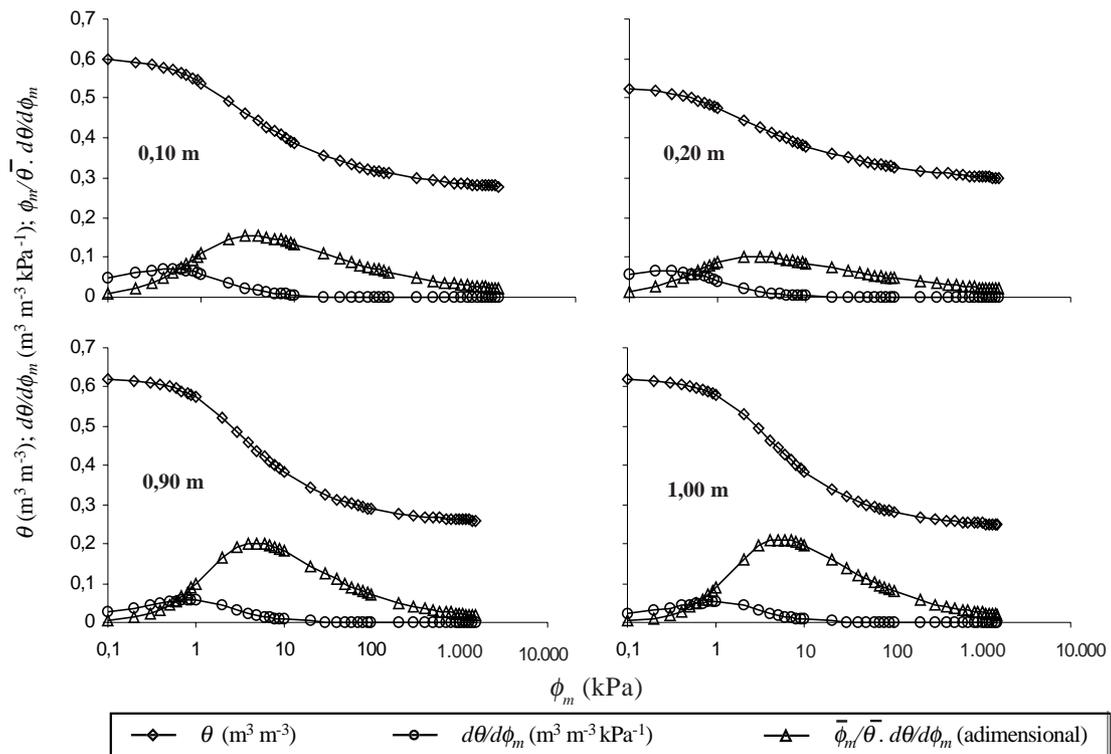


Figura 3. Curva de retenção da água no solo, $d\theta/d\phi_m$ e $\bar{\phi}_m / \bar{\theta} \cdot d\theta/d\phi_m$ para as profundidades de 0,10, 0,20, 0,90 e 1,00 m.

Para o desvio-padrão, tem-se da equação 9 que

$$dp_{\theta} = dp_{\phi_m} \frac{d\theta}{d|\phi_m|} \quad (12)$$

donde $dp_{\theta} = dp_{\phi_m}$ somente se $\frac{d\theta}{d|\phi_m|} = 1$. No entanto, da mesma forma que $\frac{\phi_m}{\theta} \frac{d\theta}{d|\phi_m|}$, também $\frac{d\theta}{d|\phi_m|}$ é, em geral, muito menor que a unidade, e variável em função de ϕ_m , sendo crescente numa porção inicial e decrescente na maior parte. Se agora dp_{θ} for assumido como constante em relação a θ (e conseqüentemente em relação a ϕ_m), dp_{ϕ_m} variará de maneira inversa a $\frac{d\theta}{d|\phi_m|}$, ou seja, será decrescente numa porção inicial e crescente na maior parte.

A figura 4a mostra a variabilidade espacial, expressa como desvio-padrão diário, em função do valor médio do potencial mátrico da água no solo obtido no experimento. Quase a totalidade desses valores encontra-se fora da faixa inicial da curva discutida anteriormente onde a variabilidade seria

decrecente, restringindo-se à parte da curva onde a previsão para dp_{ϕ_m} é que fosse crescente. Em concordância com a análise anterior e com os resultados obtidos por Hendrickx & Wierenga (1990), este aumento de variabilidade se confirmou. No entanto, a partir de $\phi_m \leq -50$ kPa, verificou-se uma tendência inversa, ou seja, de decréscimo da variabilidade, o que contraria a análise anterior. Deve-se considerar, com relação a este fato, que os resultados de ϕ_m , quando se aproximam do potencial mátrico limite de funcionamento do tensiômetro (aproximadamente -85 kPa), perdem a confiabilidade, uma vez que é freqüente o fenômeno da cavitação, ou seja, a formação de bolhas a partir do ar dissolvido ou do próprio vapor d'água no interior do tubo de náilon (Libardi, 1995).

Verificou-se, então, para o potencial mátrico, a ocorrência de efeito proporcional, que evidencia a heterogeneidade de variâncias. Nesse caso, uma comparação dos resultados deveria considerar que a confiabilidade depende do valor médio do parâmetro. Assim, a tomada de decisão para irrigar

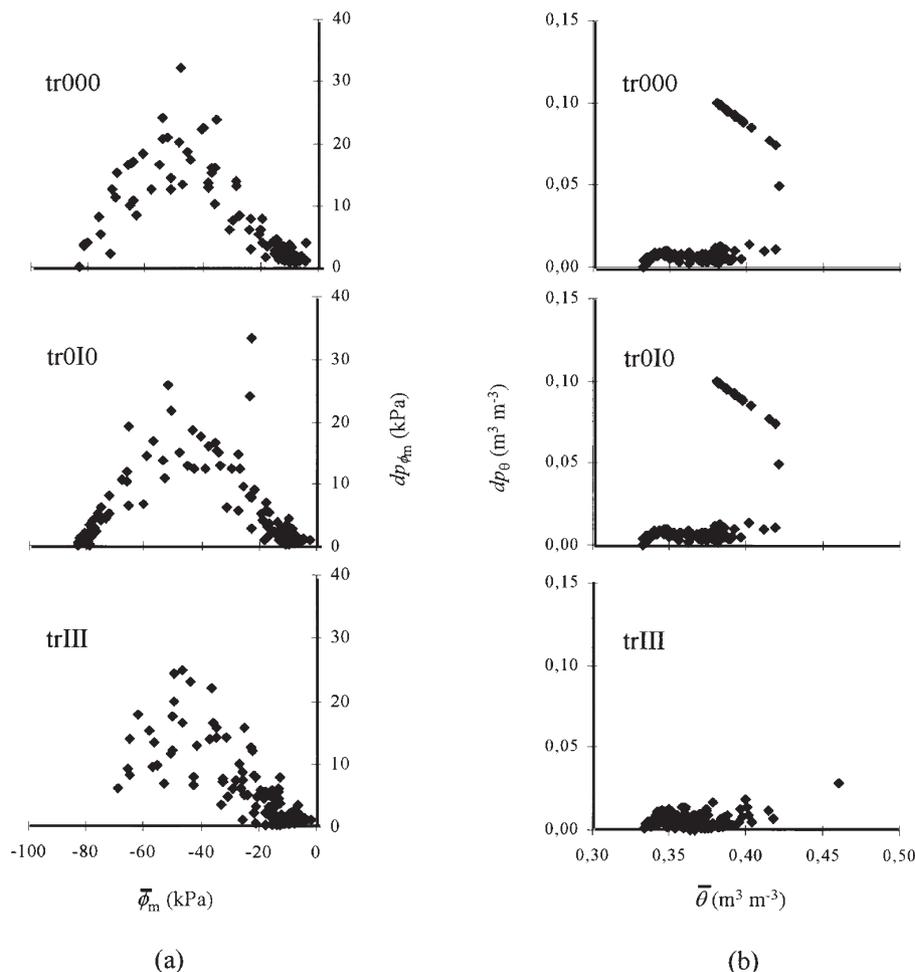


Figura 4. Variabilidade, expressa em termos de desvio-padrão: (a) do potencial mátrico (dp_{ϕ_m}) e (b) da umidade do solo (dp_{θ}), para profundidade de 0,20 m.

e o cálculo da lâmina de água poderiam ser feitos com base no potencial mátrico médio, sendo este -30 kPa, e ter-se-ia determinado número de repetições. No entanto, se o valor do potencial mátrico médio for -60 kPa, poderia ser necessário que se tivesse um número de repetições diferente do anterior para manter a mesma significância. Preocupados com este problema, Hendrickx et al. (1990) recomendaram a utilização dos valores log-transformados da tensão da água no solo.

No entanto, para o controle da irrigação, é obrigatória a transformação de ϕ_m para θ . Hendrickx et al. (1990) encontraram tendência significativa de aumento de variabilidade com o secamento do solo, tanto para ϕ_m quanto para θ . No presente caso, porém, isto não ocorreu. Tendo em vista a figura 4b, a tomada de dp_θ como constante em relação a $\bar{\theta}$, como assumido em discussão anterior, mostra-se bastante razoável. Portanto, a não-manifestação do efeito proporcional e a baixa variabilidade verificada para θ indicam que a irrigação pode ser manejada com alto nível de confiança. Nesse caso, ϕ_m é utilizado indiretamente, e seus diversos problemas de variabilidade discutidos não se propagam para θ , sendo minimizados na conversão. Essa variabilidade provavelmente seja mais crítica em situações em que ϕ_m é usado diretamente, como, por exemplo, no cálculo do gradiente de potencial, utilizado em equações de fluxo.

CONCLUSÃO

1. A elevada variabilidade e a heterogeneidade de variância de ϕ_m obtidas com o tensiômetro não são críticas para o manejo da irrigação, pois sua utilização é feita de maneira indireta. Na conversão

de ϕ_m para θ , essa variabilidade é minimizada, de tal forma que θ apresenta baixa variabilidade e homogeneidade de variância, podendo a irrigação ser manejada com alto nível de confiança estatística.

LITERATURA CITADA

- DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva de irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 1989. 180p. (Tese de Mestrado)
- FANCELLI, A.L. Milho e feijão: Elementos de manejo em agricultura irrigada. In: DOURADO NETO, D.; SAAD, A.M. & JONG VAN LIER, Q., eds. Curso de agricultura irrigada. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1991. p.156-167.
- HENDRICKX, J.M.H. & WIERENGA, P.J. Variability of soil water tension in a trickle irrigated Chile pepper field. *Irrig. Sci.*, 11:23-30, 1990.
- HENDRICKX, J.M.H.; WIERENGA, P.J. & NASH, M.S. Variability of soil water tension and soil water content. *Agr. Water Manag.*, 18:135-148, 1990.
- KLUTE, A. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison-Wisconsin, American Society of Agronomy, Inc. & Soil Science Society of America, Inc. 1188p. 1986. (USA Agronomy Series, 9)
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba, O Autor, 1995. 497p.
- LIBARDI, P.L. & SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigado por pivô central em Latossolo Roxo. *R. Bras. Ci. Solo*, 18: 529-532, 1994.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.