



Relação entre potássio na solução do solo, umidade e condutividade elétrica aparente do solo¹

Gessionei da S. Santana², Eugênio F. Coelho³, Tibério S. M. da Silva³ & Márcio M. Ramos⁴

RESUMO

Através de modelos que relacionam umidade (θ), condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e condutividade elétrica da solução do solo (CEw), objetivou-se avaliar, para condição de laboratório, a viabilidade de se estimar a concentração de potássio na solução do solo (K), para solos de classe textural franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}). Cinco soluções de cloreto de potássio, referentes a cinco condutividades elétricas (1,0, 2,5, 4,0, 5,5 e 7,0 dS m⁻¹), foram aplicadas sobre o solo acondicionado em colunas de PVC, de forma a se obter cinco θ do solo ($17,0 \pm 1,4$, $19,0 \pm 1,8$, $21,4 \pm 2,2$, $23,4 \pm 2,2$ e $26,0 \pm 3,0\%$, em volume). Efetuaram-se leituras de θ e CEa com um aparelho de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e se extraiu solução do solo com extrator de cápsula de cerâmica, para determinar a CEw e o K. Três modelos foram ajustados aos dados, por meio de planilha eletrônica. É viável estimar a concentração de K na solução do solo, a partir de θ e CEa, para condição de laboratório, por meio dos modelos de Rhoades et al. (1976), Vogeler et al. (1996) e Mualen & Friedman (1991), adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência, nas faixas de 0 a 60 e 0 a 120 mg L⁻¹, para solos de CT_f e CT_{fa}, respectivamente.

Palavras-chave: concentração iônica, TDR, manejo da fertirrigação

Relationship between potassium in the soil solution, soil water content and bulk electrical conductivity

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the feasibility of estimating the potassium (K) concentration in the soil solution, under laboratory conditions, for loamy (CT_f) and sandy loam (CT_{fa}) soils, through models that relate soil water content (θ), bulk electrical conductivity (CEa) and soil solution electrical conductivity (CEw). Five potassium chloride solutions with electrical conductivities of 1.0, 2.5, 4.0, 5.5 and 7.0 dS m⁻¹, were applied in a soil packed in PVC columns in order to obtain five soil water contents (17.0 ± 1.4 , 19.0 ± 1.8 , 21.4 ± 2.2 , 23.4 ± 2.2 and $26.0 \pm 3.0\%$, on volume basis). Readings of θ and CEa were obtained by using time domain reflectometry (TDR) equipment and soil solution was extracted by a water sampler to determine CEw and K. Three models were fitted to the data by an electronic sheet. It is possible to estimate potassium concentration in the soil solution from θ and CEa under laboratory conditions by the models of Rhoades et al. (1976), Vogeler et al. (1996) and Mualen & Friedman (1991) using a potential relationship between CEw and K in the range of 0 to 60 and 0 to 120 mg L⁻¹, for soils of CT_f and CT_{fa}, respectively.

Key words: ionic concentration, TDR, fertirrigation management

¹ Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor

² Escola Agrotécnica Federal de Salinas, Fazenda Varginha, km 02, Rodovia Salinas-Taiobeiras, CP 71, CEP 39560-000, Salinas, MG. Fone: (38) 3841 - 1599. E-mail: gessionei@gmail.com

³ Embrapa Mandioca e Fruticultura, CP 07, CEP 44380-000, Cruz das Almas, BA. Fone: (75) 3621 - 8021. E-mail: ecoelho@cnpmf.embrapa.br; tibério_s@hotmail.com

⁴ DEA/UFV, CEP 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899 - 1914. E-mail: mmramos@ufv.br

INTRODUÇÃO

A técnica de fertirrigação vem sendo utilizada, em todo o País, especialmente na Região Nordeste, em pólos agrícolas de produção de frutas e hortaliças. O uso desta técnica é crescente, sobretudo em condições de irrigação localizada. Com a expansão do uso desta tecnologia, a demanda por informações voltadas para o seu correto manejo tem aumentando sensivelmente; não obstante, tais informações ainda são escassas (Folegatti, 1999).

Os estudos a respeito de fertirrigação têm-se direcionado para a definição de frequências de aplicação de fertilizantes e de doses e fontes de nutrientes, para condição de fertirrigação; aliado a isto, a preocupação com possíveis impactos do uso intensivo dessa técnica sobre o solo e a água, face à possibilidade de contaminação de lençóis freáticos devido à lixiviação de sais e de ocorrência de desbalanço químico e de alterações no pH do solo, é cada vez maior (Pinto, 2001).

O monitoramento de íons no solo constitui-se em um ponto chave no manejo da fertirrigação. Dessa forma, a implementação de um sistema automatizado capaz de monitorar, de forma contínua, a distribuição de água e de íons em áreas agrícolas, faz-se necessária para o correto manejo da fertirrigação nos solos cultivados. Uma alternativa viável para tal fim, é a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) que, além de possibilitar, com o uso de uma única sonda, a determinação simultânea da umidade (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), em tempo real e de forma automatizada, rápida e com o mínimo distúrbio da estrutura do solo viabiliza, de forma indireta, o conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) e da concentração de nutrientes nesta solução (Dalton et al., 1984; Wraith & Das, 1998; Mmolawa & Or, 2000; Muñoz-Carpena et al. 2001; Noborio, 2001).

A técnica da TDR foi aplicada, inicialmente, ao solo, por Topp & Davis (1980) objetivando medir a sua umidade, com base no tempo de deslocamento de pulsos eletromagnéticos, através de uma linha de transmissão (sonda), composta de hastes de aço de comprimento conhecido, introduzidas no solo (Tommaselli & Bacchi, 2001). Posteriormente, esta técnica foi utilizada com sucesso em várias pesquisas, objetivando-se a determinação da θ e CEa (Rhoades et al., 1976; Rhoades et al., 1989; Vogeler et al. (1996); Heimovaara et al., 1995; Persson & Uvo, 2003), a modelagem da dinâmica de água e solutos iônicos na zona radicular (Mmolawa & Or, 2000), a identificação do perfil de extração de água pelo sistema radicular das culturas (Coelho & Or, 1996) e a estimativa da evapotranspiração das culturas (Ward & Dunin, 2001).

Wraith & Das (1998) e Persson & Uvo (2003) relatam que, devido à relação existente entre a CEa e a CEw e entre CEw e

concentração iônica (Ci), é possível usar a TDR para monitorar a distribuição de água e solutos iônicos no solo; contudo, a TDR não determina, de forma direta, CEw e Ci, mas diversos modelos propostos na literatura relacionam θ , CEa e CEw (Rhoades et al., 1976; Rhoades et al., 1989; Mualen & Friedman, 1991; Heimovaara et al., 1995; Vogeler et al., 1996). Pesquisas recentes revelaram que é possível relacionar, satisfatoriamente, a CEw com a Ci (Wraith & Das, 1998; Mmolawa & Or, 2000; Muñoz-Carpena et al. 2001). Heimovaara et al. (1995) e Vogeler et al. (1996) relatam que a maioria dos autores concorda que é possível relacionar a CEw estimada com a Ci de um íon predominante na solução do solo, obtendo-se bons ajustes para modelos lineares; mas, estudos revelaram a necessidade de calibração de modelos para tal fim (Wraith & Das, 1998; Persson & Uvo, 2003).

Desenvolveu-se este trabalho objetivando-se avaliar, para condições de laboratório, a viabilidade de se estimar a concentração de potássio na solução do solo (K), para solos aluviais de textura franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}), a partir de dados de θ e CEa, determinados por meio da técnica da TDR.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido com um solo aluvial, coletado no Município de Nova Porteirinha, MG, situado nas seguintes coordenadas geográficas: altitude 533 m, latitude 15° 48' 09" e longitude 43° 18' 32". A coleta do solo foi efetuada por camada de 0,20 m de espessura, a partir da superfície do solo até 0,80 m de profundidade, o que resultou em duas classes texturais para serem estudadas (Tabela 1). O solo coletado na camada superficial (0-0,20 m), resultou na classe textural franco-arenosa (CT_{fa}), ao passo que o solo coletado na profundidade de 0,20-0,80 m resultou na classe textural franca (CT_f). O solo foi secado ao ar, destorroado e peneirado em peneira com malha de 2 mm. Segmentos de tubo de PVC com 0,19 m de altura e 0,10 m de diâmetro foram preenchidos com 1,90 kg de terra fina secada ao ar (TFSA), até a altura de 0,17 m, perfazendo um volume de solo no tubo de PVC de 0,00133518 m³.

O experimento consistiu de cinco soluções de cloreto de potássio, referentes a cinco condutividades elétricas (CE) (1,0; 2,5, 4,0, 5,5 e 7,0 dS m⁻¹), que foram aplicadas sobre o solo, de forma a se obter cinco umidades do solo (θ) (17,0 ± 1,4, 19,0 ± 1,8, 21,4 ± 2,2, 23,4 ± 2,2 e 26,0 ± 3,0%, em base de volume), resultando em 25 tratamentos (Figura 1), que foram repetidos duas vezes, para a CT_f, obtendo-se 50 observações enquanto para a CT_{fa}, os tratamentos não foram repetidos e, portanto, obtiveram-se apenas 25 observações.

Tabela 1. Características físico-hídricas das classes texturais do solo estudado

Classe Textural	Areia	Silte	Argila	Densidade		Umidade	
				Solo	Partículas	-10 kPa	-1.500 kPa
	(g kg ⁻¹)			(kg dm ⁻³)		(kg kg ⁻¹)	
Franca	427,3	417,3	155,3	1,47	2,39	0,2226	0,1608
Franco-arenosa	544,0	355,0	101,0	1,45	2,43	0,2013	0,1503

A umidade do solo referente à umidade residual (θ_r), foi obtida pelo método padrão de estufa (Bernardo, 1995), possibilitando a correta complementação do nível de água do solo para os níveis desejados.

A fim de se conhecer a relação entre concentrações de cloreto de potássio (KCl) e condutividades elétricas (CE) de soluções de KCl, realizou-se um ensaio preliminar que consistiu na preparação de soluções de KCl, mediante a solubilização de quantidades crescentes de KCl em água destilada; em seguida, determinaram-se as CE por meio de condutímetro de mesa. Submetendo-se os valores de concentrações de KCl e CE das soluções de KCl à análise de regressão, chegou-se à Eq. 1:

$$[KCl] = \frac{CE - 0,0900}{1,6257} \quad (1)$$

com $R^2 = 1,00$

em que:

KCl e CE correspondem, respectivamente, a concentrações de cloreto de potássio nas soluções de cloreto de potássio,

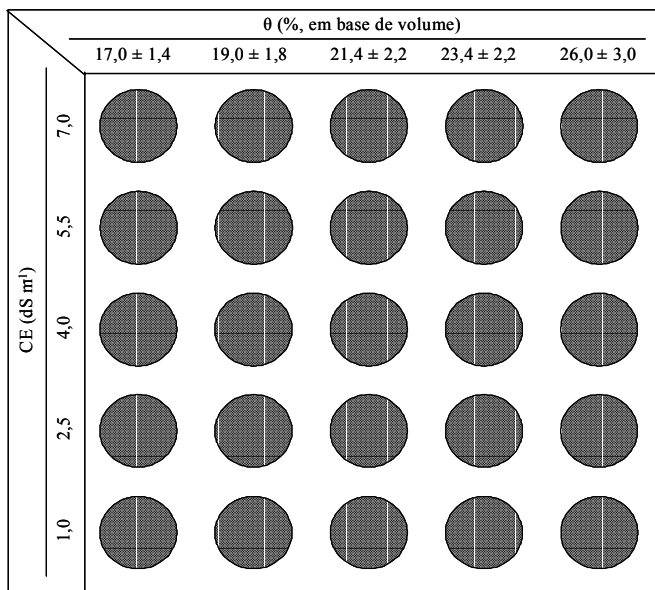


Figura 1. Croqui dos tratamentos provenientes da combinação de cinco θ com cinco CE

em $g L^{-1}$, e condutividades elétricas das soluções de cloreto de potássio, em $dS m^{-1}$.

A umidade do solo foi determinada por meio da equação de Ledieu et al. (1986) e a CEa por meio da equação proposta por Giese & Tiemann (1975), cujos valores foram corrigidos para a temperatura de 25 °C, conforme a Eq. 2 (Richards, 1954):

$$f_T = 1 + \frac{(25 - T)}{49,7} + \frac{(25 - T)^2}{3.728} \quad (2)$$

¹ A menção da marca do equipamento não representa endosso pelos autores

para $20 < T < 47$ °C

em que:

- f_T - fator de correção da CE quanto aos efeitos da temperatura, adimensional
- T - corresponde à temperatura da solução do solo, em °C.

Logo após as leituras de θ e CEa pela TDR, retirou-se a sonda do solo e se introduziu um segmento de tubo PVC de 12 mm até a profundidade correspondente ao comprimento da haste da sonda. No orifício feito pelo tubo de PVC, introduziu-se um extrator de solução do solo, provido de cápsula de cerâmica, devidamente limpo, e se lhe aplicou uma sucção equivalente a -70 kPa (Rhoades et al., 1976; Heimovaara et al., 1995; Wraith & Das, 1998; Vogeler et al., 1996; Muñoz-Carpena et al. 2001); após a sucção de cerca de 15 mL de solução do solo, retirou-se o extrator, homogeneizou-se a solução armazenando-a em frascos de vidro previamente lavados para posterior determinação da sua condutividade elétrica (CEw), por meio de condutímetro de mesa.

Preliminarmente, seis modelos matemáticos foram avaliados quanto à sua capacidade de relacionar θ , CEa e CEw; a partir desta avaliação, selecionaram-se os três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados de θ , CEa e CEw, para fins de estimativa da concentração de K na solução do solo (Tabela 2).

A umidade de saturação (θ_s) foi obtida conforme a Eq. 3:

$$\theta_s = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (3)$$

em que:

- D_s e D_p - correspondem, respectivamente, à densidade do solo e de partículas e são expressas em $kg dm^{-3}$

Os ajustes dos modelos utilizados para se estimar a concentração de K na solução do solo (Tabela 2), foram otimizados explicitando-se a variável CEw (Tabela 3); em seguida, relacionaram-se os valores medidos de CEw e de K, obtendo-se equações do tipo potência (Mmolawa & Or, 2000) e linear (Muñoz-Carpena et al., 2001; Heimovaara et al., 1995; Vogeler et al, 1996; Vogeler et al., 1997 e Wraith & Das, 1998):

$$CEw = \alpha K^\rho \quad (4)$$

$$CEw = \alpha + \rho K \quad (5)$$

em que:

- α e ρ - parâmetros adimensionais das equações

Substituindo-se as Eqs. 4 e 5 nas Eqs. 9, 10 e 11, obtive-

Tabela 2. Modelos utilizados para se estimar a concentração de K na solução do solo¹, na sua forma original

Autor	Modelo	Parâmetros ²	Equação n ^o
Rhoades et al. (1976)	$CEa = (a\theta^2 + b\theta)CEw + CE_s$	a, b, CE _s ³	(6)
Mualen & Friedman (1991)	$CEa = CEw \left(\frac{\theta^\beta}{\theta_s} \right) + CE_s$	β , CE _s ³	(7)
Vogeler et al. (1996)	$CEa = (c\theta - d)CEw + (a\theta - b)$	a, b, c, d	(8)

¹ Sendo CEa, CEw e CE_s, em dS m⁻¹ e θ e θ_s em cm³ cm⁻³² Obtidos por otimização pelo método dos mínimos quadrados³ CE_s - corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada às trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada uma constante para cada solo**Tabela 3.** Modelos utilizados para se estimar a concentração de K na solução do solo¹, tendo a variável CEw explicitada

Autor	Modelo	Parâmetros ²	Equação n ^o
Rhoades et al. (1976)	$CEw = \frac{(CEa - CE_s)}{(a\theta^2 + b\theta)}$	a, b, CE _s ³	(9)
Mualen & Friedman (1991)	$CEw = \frac{(CEa - CE_s)\theta_s}{\theta^\beta}$	β , CE _s ³	(10)
Vogeler et al. (1996)	$CEw = \frac{[CEa - (a\theta - b)]}{(c\theta - d)}$	a, b, c, d	(11)

¹ Sendo CEa, CEw e CE_s, em dS m⁻¹ e θ e θ_s em cm³ cm⁻³² Obtidos por otimização pelo método dos mínimos quadrados³ CE_s - corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada às trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada uma constante para cada solo**Tabela 4.** Modelos adaptados para se estimar a concentração de K na solução do solo¹, em mg L⁻¹, tendo a variável K explicitada

Autor	Modelo	Parâmetros ²	Equação n ^o
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	$K = \left[\frac{1}{\alpha} \frac{(CEa - CE_s)}{(a\theta^2 + b\theta)} \right]^{\frac{1}{\rho}}$	a, b, CE _s ³ , α , ρ	(12)
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	$K = \left[\frac{(CEa - CE_s)}{(a\theta^2 + b\theta)} - \alpha \right]^{\frac{1}{\rho}}$	a, b, CE _s ³ , α , ρ	(13)
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	$K = \left[\frac{1}{\alpha} \frac{(CEa - CE_s)\theta_s}{\theta^\beta} \right]^{\frac{1}{\rho}}$	β , CE _s ³ , α , ρ	(14)
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	$K = \left[\frac{(CEa - CE_s)\theta_s}{\theta^\beta} - \alpha \right]^{\frac{1}{\rho}}$	β , CE _s ³ , α , ρ	(15)
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	$K = \left\{ \frac{1}{\alpha} \frac{[CEa - (a\theta - b)]}{(c\theta - d)} \right\}^{\frac{1}{\rho}}$	a, b, c, d, α , ρ	(16)
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	$K = \left\{ \frac{[CEa - (a\theta - b)]}{(c\theta - d)} - \alpha \right\}^{\frac{1}{\rho}}$	a, b, c, d, α , ρ	(17)

¹ Sendo CEa, CEw e CE_s, em dS m⁻¹ e θ e θ_s em cm³ cm⁻³² Obtidos por otimização pelo método dos mínimos quadrados³ CE_s corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada às trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada uma constante para cada solo

ram-se as Eqs. 12, 13, 14, 15, 16 e 17 (Tabela 4) que, em seguida, tiveram seus ajustes otimizados, explicitando K.

A avaliação dos modelos quanto à sua capacidade de relacionar θ , CEa e K, com vistas à estimativa de K a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR, foi feita com base no coeficiente de concordância (D), proposto por Willmontt (1981) (Eq. 18), no coeficiente de determinação (R²) e no grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação do tipo Y = aX, após otimização de seus ajustes aos dados medidos, por meio de planilha eletrônica.

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}| + |E_i - \bar{M}|)^2} \right] \quad (18)$$

em que:

- M_i - valor medido de ordem i
- E_i - valor estimado de ordem i
- \bar{M} - média dos valores medidos
- n - número de valores medidos

O coeficiente de concordância (D) expressa a exatidão dos

valores estimados em relação aos valores medidos, variando de zero, que indica nulidade, a um que indica perfeita exatidão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos parâmetros dos três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), assim como, os valores do coeficiente de concordância (D), para os solos de classes texturais franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}), são apresentados na Tabela 5. De modo geral, nota-se que os modelos

estimaram melhor a CEw a partir dos dados do solo de CT_f ($R^2 = 0,80$ e $D = 0,94$) que a partir dos dados do solo de CT_{fa} ($R^2 = 0,77$ e $D = 0,93$). Percebe-se, ainda, equivalência entre os três modelos para o solo de CT_f ($R^2 = 0,80$ e $D = 0,94$), ao passo que, para o solo de CT_{fa} , o modelo de Vogeler et al. (1996) se sobressaiu frente aos demais, com $R^2 = 0,80$, contra 0,77 e 0,75 e $D = 0,94$, contra 0,93 e 0,92, dos modelos de Rhoades et al. (1976) e de Mualen & Friedman (1991) respectivamente.

Confeccionada com os valores de CEw estimados a partir dos valores dos parâmetros contidos na Tabela 5, a Figura 2, referente ao solo de classe textural franca (CT_f) (A) e ao solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B), esboça a

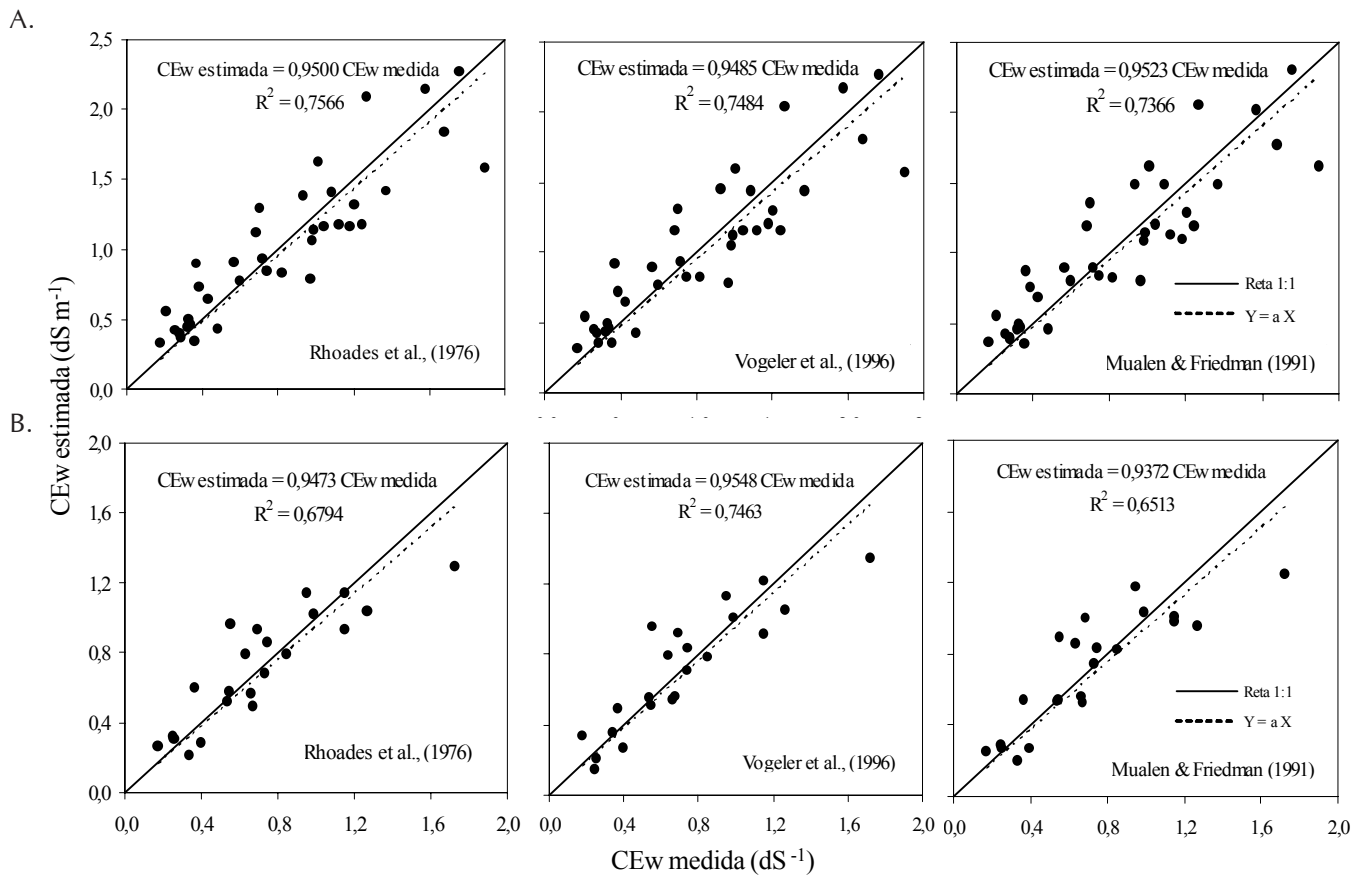


Figura 2. Relação entre a CEw medida e estimada pelos modelos que a relacionam com CEa e θ , para os solos de classe textural franca (CT_f) (A) e de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B)

Tabela 5. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R^2) dos três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados de θ , CEa e CEw, para os solos de CT_f e CT_{fa} , na estimativa da CEw

Autor	D	Parâmetros					CEs	β	R^2
		a	b	c	d				
Solo de classe textural franca (CT_f)									
Rhoades et al. (1976)	0,9404	4,4152	0,2958	-	-	0,0902	-	0,8018	
Vogeler et al. (1996)	0,9384	0,1930	-0,0488	2,0014	0,1577	-	-	0,7960	
Mualen & Friedman (1991)	0,9371	-	-	-	-	0,0844	1,4955	0,7943	
Solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa})									
Rhoades et al. (1976)	0,9252	-2,5186	2,4133	-	-	0,0797	-	0,7667	
Vogeler et al. (1996)	0,9389	2,2220	0,3552	-1,0447	-0,5858	-	-	0,7996	
Mualen & Friedman (1991)	0,9174	-	-	-	-	0,0911	1,2496	0,7463	

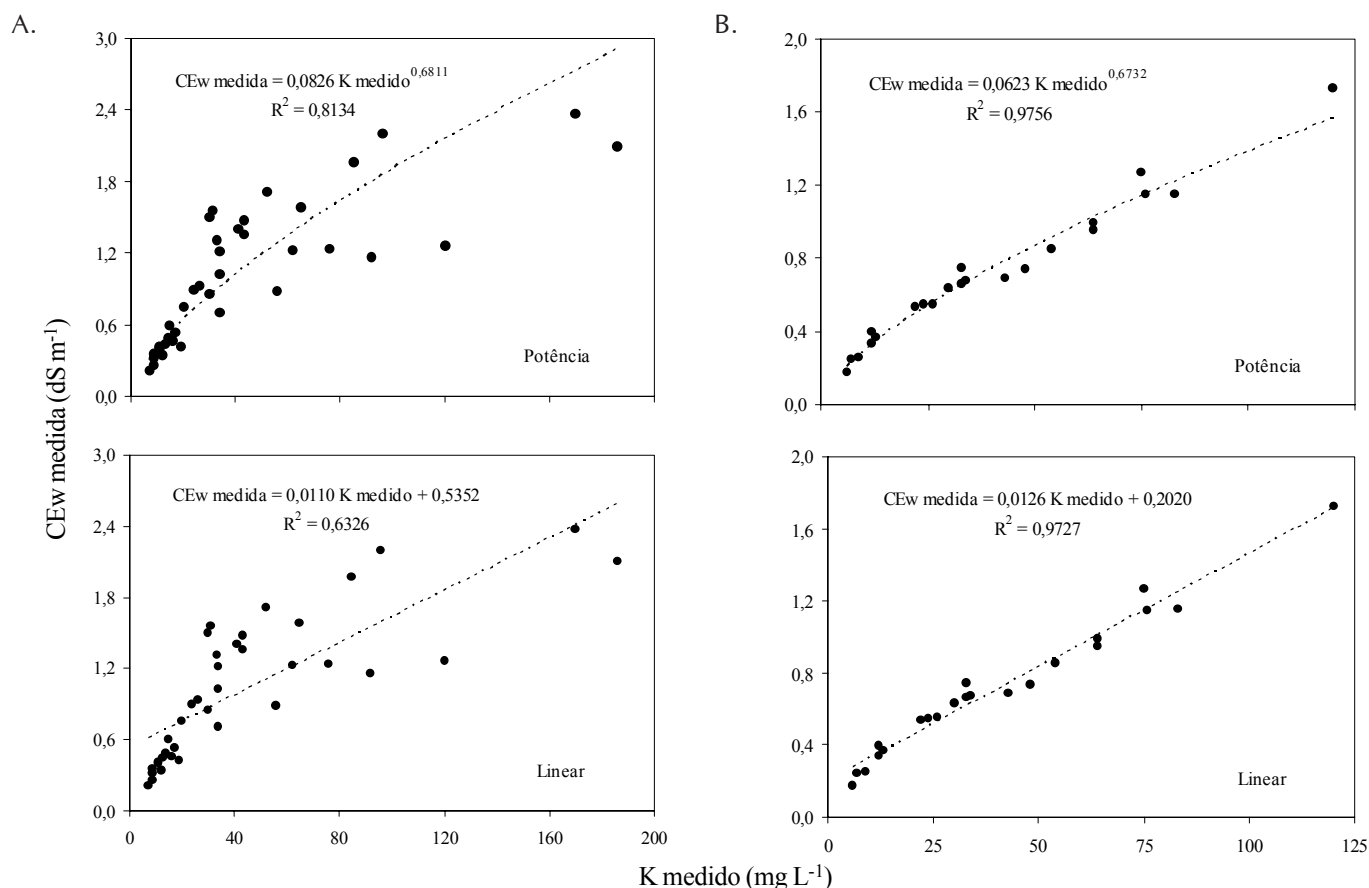


Figura 3. Relação entre CEw e K para os solos de classe textural franca (CT_f) (A) e de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B)

mesma tendência observada nos resultados apresentados na Tabela 5.

Relações do tipo potência e linear entre as variáveis CEw e K medidas na solução do solo, são mostradas na Figura 3, referente ao solo de classe textural franca (CT_f) (A) e ao solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B). Para o solo de CT_f, o modelo que melhor explicou essa relação foi o do tipo potência, com $R^2 = 0,81$; já para o solo de CT_{fa}, os modelos linear e potência foram equivalentes na explicação desta relação, apesar do modelo tipo potência ser ligeiramente superior ($R^2 = 0,98$) ao modelo tipo linear ($R^2 = 0,97$). O ajuste entre CEw e K, para o solo de CT_f, está de acordo com Mmolawa & Or (2000) mas difere daqueles obtidos por Heimovaara et al. (1995), Vogeler et al. (1996), Vogeler et al. (1997) e Wraith & Das (1998), Muñoz-Carpena et al. (2001), que foram do tipo linear; porém para o solo de CT_{fa} o ajuste entre CEw e K está de acordo com todos esses autores, visto que tanto o modelo potência quanto o linear, explicaram bem esta relação. Vogeler et al. (1997) relatam que, para baixas concentrações iônicas, a CEw se relaciona, de forma linear, com a concentração de determinado sal presente na solução do solo.

Vê-se, na Tabela 6, os valores dos parâmetros e dos coeficientes de determinação (R^2) dos modelos adaptados e avaliados para os solos de CT_f e CT_{fa}. Evidencia-se notável supremacia do ajuste dos dados do solo de textura franco-arenosa (CT_{fa}) e com menor percentual de partículas finas e, portanto, com menor superfície específica, por todos

os modelos ($R^2 = 0,79$ e $D = 0,94$), comparativamente àquele obtido para o solo de textura franca (CT_f) e com maior percentual de partículas finas ($R^2 = 0,60$ e $D = 0,85$). Tais constatações podem ser devidas às características físicas e/ou físico-químicas do solo, tal como a capacidade de troca de cátions (CTC), que pode atuar com maior ou menor intensidade na adsorção e/ou dessorção de cátions.

Observa-se, para o solo de CT_{fa}, que uma estimativa melhor da concentração de K na solução do solo a partir de dados de umidade (θ) e condutividade elétrica aparente (CEa), é obtida quando se introduz, nos modelos adaptados, uma relação do tipo potência entre CEw e K ($R^2 = 0,81$ e $D = 0,94$); mas, para o solo de CT_f, percebe-se que as estimativas de K foram equivalentes quando se introduziu, nos modelos adaptados, qualquer uma das relações entre CEw e K (tipo linear ou potência), exceto para o modelo de Rhoades et al. (1976), adaptado com uma relação entre CEw e K do tipo potência, que foi superior aos demais, em cerca de 7%, quanto ao R^2 , porém, quanto ao coeficiente de concordância (D), com valor médio igual a 0,85, não se observa diferença considerável.

Em relação aos modelos adaptados, verifica-se que os de Rhoades et al. (1976) e de Vogeler et al. (1996) proporcionaram as melhores estimativas de concentração de K na solução do solo, a partir de dados de θ e CEa, para o solo de CT_f e CT_{fa}, respectivamente, com valores de R^2 iguais a 0,66 e 0,82 e de D iguais a 0,85 e 0,95.

Tabela 6. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R^2), para o solo de CT_f e de CT_{fa} , na estimativa da concentração de K na solução do solo

Autor	D	Parâmetros								R^2
		a	b	c	d	CEs	β	α	ρ	
Solo de classe textural franca (CT_f)										
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	0,8518	1,8504	0,9550	-	-	0,0920	-	0,0461	0,8425	0,6558
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	0,8462	0,7820	0,0360	-	-	0,1276	-	0,9597	0,0995	0,5863
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	0,8434	0,5178	-0,0508	0,9259	0,0690	-	-	0,0459	0,9383	0,5808
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	0,8448	-16,7941	-1,5471	0,9462	0,0804	-	-	18,1821	0,0358	0,5787
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	0,8462	-	-	-	-	0,1565	1,9905	0,0485	0,9299	0,5864
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	0,8460	-	-	-	-	0,1392	1,9058	0,2041	0,0303	0,5859
Solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa})										
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	0,9432	-1,2478	2,8999	-	-	0,0500	-	0,1023	0,4856	0,8040
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	0,9254	-2,0016	2,8238	-	-	0,0300	-	0,2777	0,0095	0,7619
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	0,9465	2,2670	0,3560	-1,0400	-0,5858	-	-	0,0710	0,6342	0,8178
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	0,9341	1,9918	0,2095	-0,0548	-0,0373	-	-	-0,9437	0,1802	0,7852
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CEw-K do tipo potência	0,9429	-	-	-	-	0,0500	0,9196	0,0878	0,4851	0,8033
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CEw-K do tipo linear	0,9335	-	-	-	-	-3,5209	0,0849	1,5617	0,0019	0,7830

Tendo em vista o baixo desempenho apresentado pelos modelos adaptados na estimativa do K da solução do solo para o solo de CT_f (Tabela 6), plotou-se o K estimado como função do K medido, por meio de uma função do tipo $Y = aX$, apenas para o modelo de Rhoades et al. (1976), adaptado com uma relação entre CEw e K do tipo potência, que foi o que melhor estimou o K da solução do solo. Esta relação pode ser observada na Figura 4, na qual se percebe, também, considerável dispersão dos dados medidos e estimados a partir de uma concentração de K na solução do solo superior a 60 mg L⁻¹. A referida dispersão, além de reforçar os baixos ajustes apresentados na Tabela 6, revela a fragilidade desses modelos na estimativa daquele K, quando a concentração desse íon na solução do solo é superior a 60 mg L⁻¹ para solos com características físico-químicas similares às do solo de CT_f .

No trabalho de Nadler (1997), também se constatou aumento da dispersão dos dados com o incremento do teor de partículas menores; desta forma, o baixo ajuste dos modelos adaptados aos dados do solo de CT_f e, conseqüentemente, com maior teor de silte e argila, comparativamente ao do solo de CT_{fa} , pode ser devido às características físico-químicas desse solo sugerindo, portanto, que tais características influenciam na estimativa da concentração de K na solução do solo, com esses modelos.

Na Figura 5, o K estimado para o solo de CT_{fa} , por meio dos modelos adaptados com uma relação entre CEw e K do

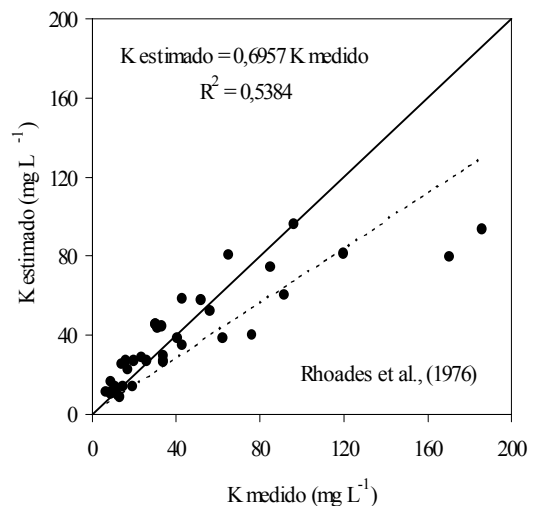


Figura 4. Relação entre o K medido e estimado pela equação 12, para o solo de CT_f

tipo potência (A) e linear (B), é plotado como função da concentração de K medida na solução do solo. Nota-se que os modelos adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência (Figura 5A) proporcionaram melhor estimativa da concentração de K na solução do solo ($R^2 = 0,78$), que quando adaptados com uma relação do tipo linear ($R^2 = 0,72$) (Figura 5B). Para este solo, o modelo adaptado de Vogeler et al.

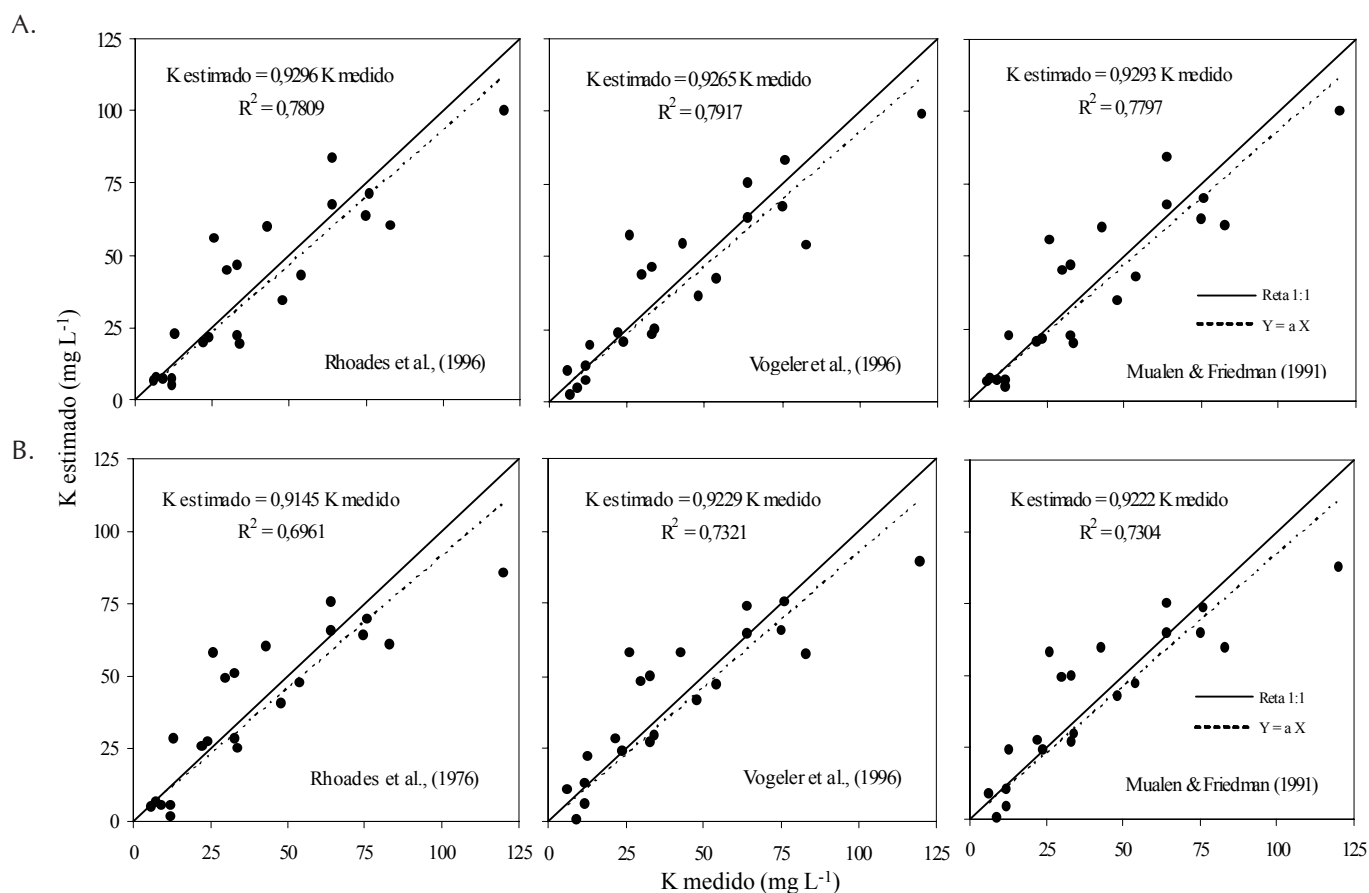


Figura 5. Relação entre o K medido e estimado, para o solo de CT_f

Tabela 7. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R²) dos três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados de θ , CEa e CEw, para o solo de CT_f, na estimativa da CEw, para concentrações de K na solução do solo, inferiores a 60 mg L⁻¹

Autor	D	Solo de classe textural franca (CT _f)						R ²
		Parâmetros						
		a	b	c	d	CEs	β	
Rhoades et al. (1976)	0,9380	6,2464	-0,2887	-	-	0,1232	-	0,7929
Vogeler et al. (1996)	0,9331	-0,4310	-0,2040	2,7124	0,3368	-	-	0,7823
Mualen & Friedman (1991)	0,9190	-	-	-	-	0,0992	1,5417	0,7516

(1996) foi o que melhor se ajustou aos dados observados na estimativa da concentração de K da solução do solo.

No que tange ao coeficiente angular, os ajustes dos modelos adaptados foram equânimes (em torno de 0,92), independentemente da relação entre CEw e K neles introduzida.

Com base no que se constatou na Tabela 6 e na Figura 4, para o solo de CT_f, procedeu-se a uma nova otimização dos ajustes dos modelos adaptados, considerando-se apenas os valores de θ , CEa e CEw, associados a concentrações de K na solução do solo, inferiores a 60 mg L⁻¹. Os valores de D, dos parâmetros e de R² dessa nova otimização, explicitando CEw e K, são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Apesar dos modelos continuarem estimando bem a CEw, comparativamente aos ajustes obtidos e apresentados na Tabela 5 (solo de CT_f), verifica-se ligeira redução dos valores

de R² e de D, quando se explicita CEw (Tabela 7); contudo, quando se explicita o K, substancial melhoria nos ajustes (R² passando de 0,60 para 0,80 e D de 0,85 para 0,94) dos modelos adaptados aos dados de concentração de K na solução do solo é evidenciada (Tabela 8), comparativamente aos obtidos e apresentados na Tabela 6 (solo de CT_f); observa-se, com isso, o quanto esses modelos são frágeis para estimar a concentração de K na solução do solo, quando esta concentração se situa acima de 60 mg L⁻¹. Nota-se, também, que, para concentrações de K na solução do solo inferiores a 60 mg L⁻¹, não há diferença expressiva dos ajustes dos modelos aos dados observados, independentemente do tipo de relação entre CEw e K, neles introduzida (Tabela 8).

Na Figura 6, o K estimado por meio dos modelos adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência (A) e linear (B), para concentrações de K na solução do solo infe-

Tabela 8. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficiente de determinação (R^2) para o solo de CT_f, na estimativa da concentração de K na solução do solo, para concentrações de K inferiores a 60 mg L⁻¹

Autor	D	Parâmetros								R^2
		a	b	c	d	CEs	β	α	ρ	
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CE-K do tipo potência	0,9376	3,7011	1,0854	-	-	0,0457	-	0,0661	0,7217	0,7961
Rhoades et al. (1976) adaptado para a relação CE-K do tipo linear	0,9370	0,8923	0,4041	-	-	0,0350	-	0,6106	0,0622	0,7946
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CE-K do tipo potência	0,9383	-0,1455	-0,0839	2,0490	0,1559	-	-	0,0862	0,7429	0,7972
Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CE-K do tipo linear	0,9373	0,8705	0,0167	0,0729	0,0035	-	-	-4,7204	0,6655	0,7950
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CE-K do tipo potência	0,9378	-	-	-	-	0,0489	1,4382	0,0864	0,7311	0,7964
Mualen & Friedman (1991) adaptado para a relação CE-K do tipo linear	0,9371	-	-	-	-	0,0398	1,3442	0,2140	0,0233	0,7948

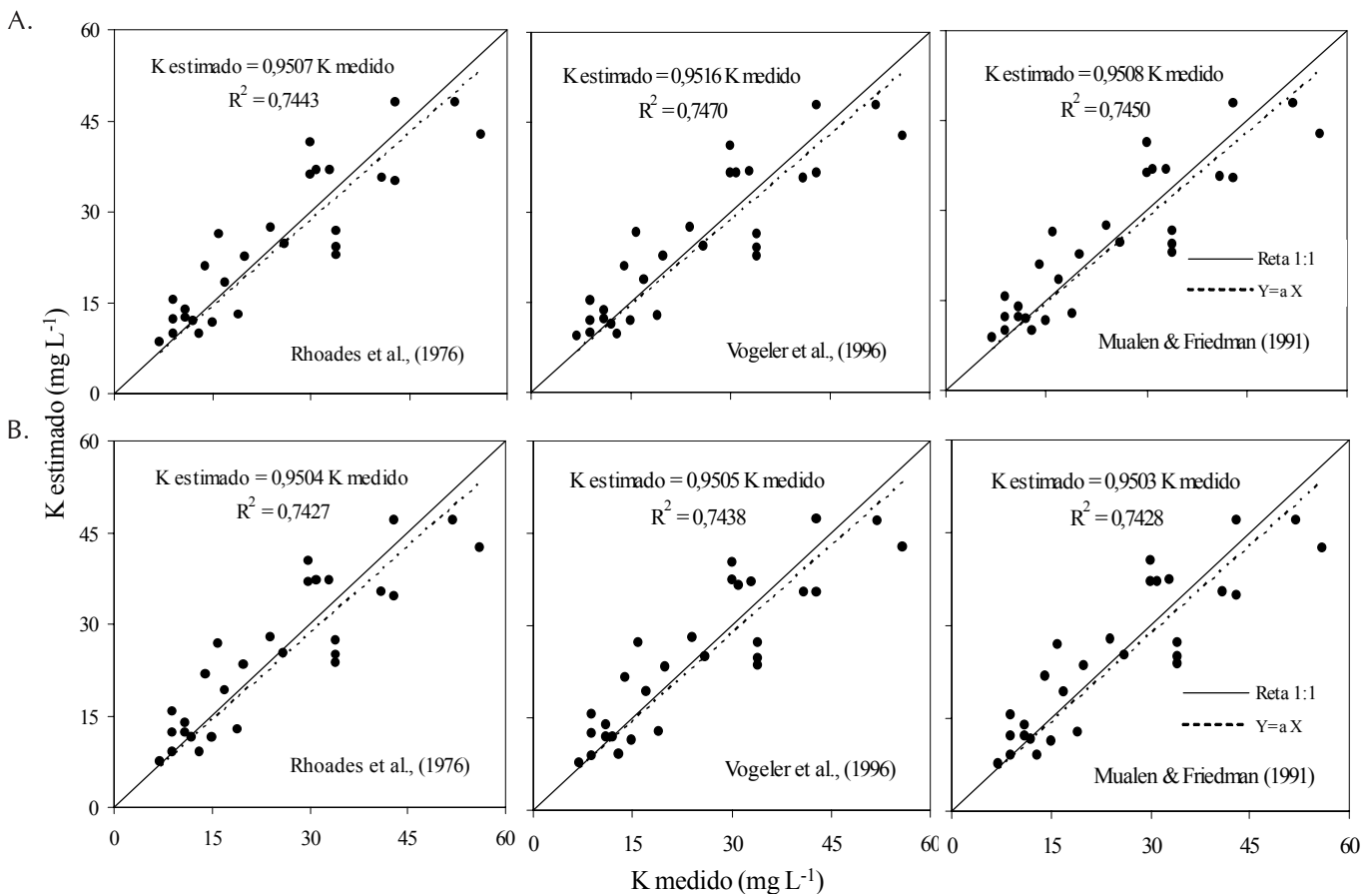


Figura 6. Relação entre o K medido e estimado para o solo de CT_f

riores a 60 mg L⁻¹, é plotado como função do K medido por meio de uma equação do tipo $Y = aX$. Não se observa superioridade expressiva de nenhum dos modelos avaliados nem mesmo efeito do tipo de relação entre CEw e K, neles inserida, significando que qualquer um dos modelos avaliados pode ser utilizado para se estimar a concentração de K na solução do solo, a partir de dados de θ e CEa obtidos pela técnica da TDR, independentemente do tipo de relação entre

CEw e K (potência ou linear) neles introduzida. Observa-se satisfatório ajuste da relação entre o K estimado e medido ($R^2 = 0,75$ e coeficiente angular superior a 0,95) (Figura 6 A e B). Ressalta-se que o fato de se considerar os modelos adaptados capazes de estimar a concentração de K na solução do solo, apenas na faixa de 0 a 60 mg L⁻¹, para o solo de CT_f, além de conferir maior confiabilidade em suas estimativas conferiu, também, melhor ajuste entre dados estimados e

medidos. Essas constatações reforçam a afirmação de que a textura do solo tem influência na estimativa da concentração de K na solução do solo, por esses modelos, tornando esses capazes de estimá-la para solos com características texturais iguais às do solo de CT_f, apenas quando esta concentração se situa abaixo de 60 mg L⁻¹.

CONCLUSÃO

É viável estimar a concentração de K na solução do solo, a partir de dados de θ e CEa, obtidos por meio da técnica da TDR, para condições de laboratório, por meio dos modelos de Rhoades et al. (1976), Vogeler et al. (1996) e Mualen & Friedman (1991) adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência, para as faixas de 0 a 60 e 0 a 120 mg L⁻¹, para solos de textura franca e franco-arenosa, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Bernardo, S. Manual de irrigação. 6.ed. Viçosa: UFV, 1995. 657p.
- Coelho, E.F.; Or, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, n.6, p.1039-1049, 1996.
- Dalton, F.N.; Herkelrath, W.N.; Rawlins, D.S.; Rhoades, J.D. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, Washington, v.224, n.4651, p.989-990, 1984.
- Folegatti, M.V. *Fertirrigação: Citrus, flores e hortaliças*. Guaiaba: Livraria e Editora Agropecuária Ltda., 1999, 460p.
- Giese, K.; Tiemann, R. Determination of the complex permittivity from the sample time domain reflectometry. *Advanced Molex Relaxes Processes*, New York, v.7, n.1, p.45-49, 1975.
- Heimovaara, T.J.; Focke, A.G.; Bouten, W.; Verstraten, J.M. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.59, n.3, p.689-698, 1995.
- Ledieu, J.; De Ridder, P.; De Clerck, P.; Dautrebande, S. A method measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.88, n.1, p.319-328, 1986.
- Mmolawa, K.; Or, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: Review. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.222, n.1-2, p.163-190, 2000.
- Mualen, Y.; Friedman, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resources Research*, Washington, v.27, n.10, p.2771-2777, 1991.
- Muñoz-Carpena, R.; Regalado, C.M.; Alvarez-Benedí, J.; Socorro, A.R.; Pérez, N. Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: López, J.J.; Quemada, M. *Temas de investigación en zona no saturada*. 5.ed., Pamplona: Universidad Pública de Navarra, 2001, p.1-7.
- Nadler, A. Discrepancies between soil solution concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. *Australian Journal Soil Research*, Canberra, v.35, n.3, p.527-537, 1997.
- Noborio, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, Madison, v.31, n.3, p.213-237, 2001.
- Persson, M.; Uvo, C.B. Estimating soil solution electrical conductivity from time domain reflectometry measurements using neural networks. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.273, n.1-4, p.249-256, 2003.
- Pinto, J.M. *Fertirrigação em fruticultura irrigada*. Revista Irrigação & Tecnologia Moderna (ITEM). Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ABID), v.49, n.1, p.14-23, 2001.
- Rhoades, J.D.; Manteghi, N.A.; Shouse, P.J.; Alves, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: New formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.53, n.2, p.433-439, 1989.
- Rhoades, J.D.; Raats, P.A.; Prather, R.J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.40, n.5, p.651-655, 1976.
- Richards, L.A. (ed.). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. USDA Agriculture Handbook 60
- Tommaselli, J.T.G.; Bacchi, O.O.S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.
- Topp, G.C.; Davis, J.L. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, Washington, v.16, n.2, p.574-582, 1980.
- Vogeler, I.; Clothier, B.E.; Green, S.R. TDR estimation of the concentration of electrolyte in the soil solution. *Australian Journal Soil Research*, Canberra, v.35, n.3, p.515-526, 1997.
- Vogeler, I.; Clothier, B.E.; Green, S.R.; Scotter, D.R.; Tillman, R.W. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, n.1, p.5-12, 1996.
- Ward, P.R.; Dunin, F.X. Growing season evapotranspiration from duplex soils in south-western Australia. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.50, n.2, p.141-159, 2001.
- Willmott, C.J. On the validation of models. *Physical Geography*, New York, v.2, p.184-194, 1981.
- Wraith, J. M; Das, B.S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time domain reflectometry. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.47, n.1-2, p.145-150, 1998.