



Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.4, n.4, p.226–233, 2010  
 ISSN 1982-7679 (On-line)  
 Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br>  
 Protocolo 034.09

## AValiação DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO

Tirzah Moreira de Melo<sup>1</sup>, Ingo Wottrich<sup>2</sup>, José Antônio Louzada<sup>3</sup> e Fernanda Helfer<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Eng. Bioprocessos e Biotecnologia, Mestre em Rec. Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, RS, [tirzah\\_melo@yahoo.com.br](mailto:tirzah_melo@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Eng. Minas, Mestrando em em Rec. Hídricos e Saneamento Ambiental, I PH, UFRGS, [ingowt@gmail.com](mailto:ingowt@gmail.com)

<sup>3</sup> Eng. Civil, Doutor em Rec. Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, [louzada@iph.ufrgs.br](mailto:louzada@iph.ufrgs.br)

<sup>4</sup> Eng. Agrônoma, Mestre em Rec. Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, [f.helfer@griffith.edu.au](mailto:f.helfer@griffith.edu.au)

**Resumo:** A rotação de culturas é uma prática para reduzir a deterioração do solo, infestação de pragas, doenças e plantas daninhas e para aumentar a renda do produtor. Sua introdução nos solos de várzea do Rio Grande do Sul pode ser favorecida pela existência da atual estrutura de drenagem usada para o cultivo do arroz, que proporciona o uso da subirrigação para as culturas de sequeiro. Este artigo avaliou o atendimento da demanda da cultura do milho pela subirrigação em um solo de várzea na Depressão Central do Rio Grande do Sul. A metodologia empregada combinou a equação de Darcy com os modelos de van Genuchten (1980) e de Vogel *et al.* (2001) para representar a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo. Os resultados se mostraram bastante sensíveis ao emprego de um ou outro modelo e à profundidade da camada impermeável. Em todos os casos os resultados mais confortáveis foram obtidos com a aplicação do modelo de Vogel *et al.* (2001) com horizonte B profundo. Para as condições atuais, representadas por drenos espaçados por 50 m, a contribuição da subirrigação atinge cerca de 20% da demanda total quando a camada impermeável é profunda. Quando a camada é superficial, essa contribuição torna-se desprezível. Com espaçamento de 25 m, o que significa duplicar a densidade de drenagem, a irrigação suplementar proporcionada pela subirrigação atinge 70% da demanda total no cenário mais favorável e 12% no menos favorável.

Palavras-chave: Demanda Hídrica, Drenagem, Condutividade Hidráulica, Rotação de Culturas

## MEETING WATER DEMAND OF A MAIZE CROP BY SUBIRRIGATION

**Abstract:** Crop rotation is a strategy for reducing soil deterioration, spread of diseases, pests and weeds, and to stabilize farm income. Including of an upland crop, such as maize, in rotation with flooded rice could become a common practice in Rio Grande do Sul, Brazil, as the existing infrastructure for rice cultivation allows a sub-irrigation system to provide water to the upland crop. In this study we evaluate the performance of a sub-irrigation system for maize cultivated on a lowland soil in the Central Lowland of Rio Grande do Sul, Brazil, where cultivation of flooded rice predominates. The approach combines Darcy's equation and the models of van Genuchten (1980) and Vogel *et al.* (2001) to represent the relationship between hydraulic conductivity and soil moisture. Results were shown to be very sensitive to the choice of model, and to the depth of the impermeable soil layer. Best results were

## AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO

obtained from the Vogel *et al.* (2001) model on a deep B horizon. In the present scenario, where drains are spaced at 50 m, the contribution of water through subirrigation reaches around 20% of the total maize water requirement when the impermeable soil layer is deep. When it is shallow, the contribution is insignificant. At 25-m spacing (i.e. twice the drainage density) the supplementary irrigation via subirrigation reaches 70% and 12% respectively, of the total water requirement in the more optimistic and less optimistic scenarios, respectively.

Keywords: Water Requirement, Drainage, Hydraulic Conductivity, Crop Rotation

### INTRODUÇÃO

A técnica de subirrigação está associada à manutenção do lençol freático a certa profundidade de forma que um fluxo vertical ascendente possa ser mantido. Este sistema de irrigação é comumente associado a um sistema de drenagem e, em condições satisfatórias, pode ser o método de irrigação de menor custo.

Muitos autores apontam a subirrigação como uma das técnicas de irrigação mais vantajosas, não somente por atender as necessidades hídricas da cultura em questão, mas também por garantir reduzidas perdas de nitrato e agroquímicos para águas subterrâneas, melhorando a qualidade da água para ingestão (Elmi *et al.* 2002; Fisher *et al.* 1999; Gaynor *et al.* 2001). Além disso, a subirrigação, por minimizar a utilização de água, tem sido apontada por muitos pesquisadores como um meio de promover a conservação de recursos hídricos e diminuir a poluição, sem afetar a produtividade agrícola (Mejia *et al.* 2000).

No Rio Grande do Sul, os solos de várzea localizados na Depressão Central apresentam ótimo potencial produtivo e são extensivamente utilizados para a produção de arroz irrigado por inundação. A cultura do arroz, no entanto, vem apresentando necessidade de diversificação agrícola em decorrência da alta infestação de invasores, pragas e doenças, além da necessidade de aumento de produção e renda por parte dos produtores. Neste sentido, a cultura do milho pode ser utilizada como alternativa de rotação com o arroz em solos de várzea. O sucesso dessa prática pode ser favorecido com o uso da subirrigação, uma vez que a demanda hídrica do milho pode

ser, pelo menos em parte, suprida por este método.

O milho é um dos cereais mais amplamente cultivados e utilizados no mundo. Isto se deve a sua extensa gama de aplicações, incluindo alimentação humana, ração animal, bicomustível, entre muitas outras. A produtividade desta cultura, no entanto, depende de vários fatores, principalmente da disponibilidade hídrica. As oscilações nas safras de milho nas principais regiões produtoras do Brasil estão definitivamente associadas à disponibilidade de água, sobretudo no período crítico da cultura, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (Matzenauer 1994; Bergonci *et al.* 2001; Bergamaschi *et al.* 2004). Se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, a recuperação da capacidade produtiva da cultura não ocorrerá de forma satisfatória, e a produção final será severamente afetada.

Avaliando as variáveis *ET* (evapotranspiração real) e *ETP* (evapotranspiração potencial), Matzenauer *et al.* (1995) concluíram que o consumo relativo de água (índice *ET/ETP*) é o principal parâmetro para indicar a variação do rendimento de grãos de milho no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo Bergamaschi *et al.* (2006), as reduções mais severas na produção ocorrem em decorrência de déficit hídrico nas fases de polinização, formação do zigoto e desenvolvimento inicial do grão. Nesse período a razão *ET/ETP* explica quase 80% das variações na produção de grãos, que se estabiliza acima de uma razão de 0,7.

Há muitas dificuldades para implementação de um sistema de irrigação

## AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO

tradicional, as quais decorrem dos custos (Bergamaschi *et al.* 2006) e da necessidade de compatibilizá-lo com a irrigação do arroz. Dado estes problemas, o uso da subirrigação em solos de várzeas com infra-estrutura de drenagem já existente parece ser uma alternativa vantajosa, visto que o sistema envolve otimização do uso da água e baixos custos para implantação, operação e manutenção.

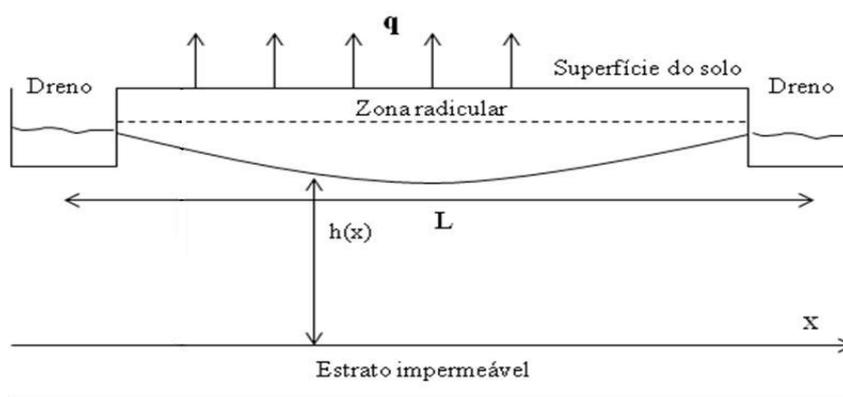
Em solos de várzea cultivados com culturas de sequeiro, a produtividade agrícola está diretamente associada à altura do lençol freático mantida durante o ciclo de desenvolvimento das plantas. Diversos autores têm estudado a influência da altura do lençol freático na produção de culturas de sequeiro, para fins de dimensionamento de sistemas de drenagem e subirrigação. No caso da cultura do milho, Lal e Taylor (1969), verificando a influência da profundidade do lençol freático no rendimento de grãos, obtiveram melhores resultados em situações em que, durante todo o ciclo da cultura, o lençol esteve mantido a 0,9 m de profundidade. Já Chaudhary *et al.* (1975), também

trabalhando com milho, obtiveram melhores rendimentos durante um ano com baixo índice pluviométrico para uma situação em que o lençol freático ficou mantido entre 0,6 e 0,9 metros de profundidade. No caso de precipitações elevadas, os melhores rendimentos ocorreram com lençol freático a 1,2 m de profundidade. Williamson e Kriz (1970) *apud* Cruciani (1980) apresentaram profundidades de lençol freático de 0,9 m, 0,3 m e 0,75 m como adequadas à produção de milho sob regime de subirrigação em solos franco argilo-siltosos, areia franca e franco-arenoso, respectivamente.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar o percentual da demanda hídrica (evapotranspiração) da cultura do milho que pode ser atendida por subirrigação, admitindo-se que a alimentação do lençol freático ocorra através dos drenos que compõem a infra-estrutura das áreas cultivadas com arroz irrigado na Depressão Central do Rio Grande do Sul.

### MATERIAL E MÉTODOS

A configuração idealizada, incluindo os drenos, o lençol freático, a zona radicular e o fluxo ascendente, está representada na Figura 1.



**Figura 1.** Representação esquemática da subirrigação

Teoricamente a demanda da cultura é suprida pelo fluxo que tem origem no lençol freático, sendo este realimentado pela água mantida no interior dos drenos.

A formulação matemática tem como referência a Equação de Darcy.

**AValiação DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO  
ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO**

$$q = -K(h) \left( \frac{dh}{dz} + 1 \right) \quad (01)$$

onde  $q$  é o fluxo ascendente [L/T],  $K(h)$  é a condutividade hidráulica não-saturada [L/T],  $h$  é o potencial matricial [L] e  $z$  é a coordena vertical [L].

A integração da Equação (1) na vertical depende da representação paramétrica da relação  $K(h)$ . Inicialmente considerou-se o conjunto de equações proposto por van Genuchten (1980):

$$K(S_e) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (02)$$

$$S_e(\theta) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (03)$$

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + |ah|^n \right]^m} \quad (04)$$

sendo  $\theta$  a umidade volumétrica [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] e  $\theta_r$  e  $\theta_s$  as umidades residual e de saturação respectivamente [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>]. O termo  $S_e(\theta)$ , denominado saturação efetiva, está definido pela Equação (3) e  $\alpha$  [1/L],  $m$ ,  $n$  e  $\lambda$  são parâmetros, sendo  $m = 1 - (1/n)$ . As limitações matemáticas da Equação (4) transferem à Equação (2) um comportamento insatisfatório próximo à saturação, especialmente quando o parâmetro  $n$  se aproxima de 1 (Vogel *et al.* 2001).

Posteriormente foram consideradas as equações propostas por Vogel *et al.* (2001), as quais reduzem drasticamente a não linearidade da função que representa a

condutividade hidráulica próximo à saturação. Estas equações são apresentadas a seguir:

$$\theta_m = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( 1 + |\alpha h_s|^n \right)^m \quad (05)$$

$$S_e^*(\theta) = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} S_e \quad (06)$$

$$F(S_e^*) = \left[ 1 - (S_e^*)^{1/m} \right]^m \quad (07)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^\lambda \left[ (1 - F(S_e^*)) / (1 - F(1)) \right]^2 \quad (08)$$

O parâmetro  $h_s$  que aparece na Equação (5) representa o potencial matricial até o qual  $\theta = \theta_s$ .

Para definir a demanda diária a ser suprida pelo fluxo ascendente ( $q = ET$ ) foi empregada a Equação (9).

$$ET = K_c ETP \quad (09)$$

onde  $ETP$  é a evapotranspiração potencial [L/T],  $K_c$  o coeficiente da cultura (adimensional) e  $ET$  a evapotranspiração do milho [L/T]. Foram considerados valores de  $K_c$  variáveis de acordo com os sub-períodos de cultivo e estimados para plantio convencional (Tabela 1), ciclo de 122 dias e início de semeadura em 20 de novembro, conforme sugerido por Helfer *et al.* (2003). A evapotranspiração potencial média da área do estudo foi admitida constante e igual a 4,6 mm/dia, conforme Beltrame *et al.* (1994).

**Tabela 1.** Valores de  $K_c$  para a cultura do milho ao longo do período de cultivo (122 dias)

Subperíodo	Duração média (dias)	$K_c$
Semeadura – Emergência	6	0,50
Emergência – 30 dias após emergência	30	0,70
30 dias após emergência - Pendoamento	31	1,10
Pendoamento – Maturação leitosa	17	1,25
Maturação leitosa – Maturação fisiológica	38	1,00

(Fonte: Bergamaschi *et al.* 2001)

A partir dos dados de curvas de retenção apresentados por Beltrame e Louzada (1996) para os solos de várzea da Depressão Central, foram ajustados os parâmetros para emprego das Equações (2)

e (8) na Equação (1). A condutividade hidráulica saturada,  $K_s = 13,3$  cm/dia, foi estimada em laboratório e a umidade correspondente à saturação,  $\theta_s = 0,3900$  (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), admitida igual à porosidade

## AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO

total. Os demais parâmetros têm seus valores apresentados a seguir:  $\theta_r = 0,1880$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\alpha = 0,5000$  ( $1/\text{cm}$ ),  $n = 1,4236$  e  $m = 0,2976$ . Em ambas as equações adotou-se  $\lambda = -2,5$ , valor esse indicado para solos franco-arenosos. O parâmetro  $h_s$  foi admitido igual a  $-4$  cm, valor sugerido por Schaap e van Genuchten (2006).

A profundidade  $z$  exigida para que o lençol freático atenda a demanda  $q$  foi obtida através do rearranjo da Equação (1), resultando na Equação (10), e sua posterior integração numérica. O limite superior de integração,  $H_3$ , é o potencial matricial na zona radicular que assegura o pleno desenvolvimento do milho. Seu valor foi assumido igual a  $-600$  cm, como sugerido por Helfer *et al.* (2003). Admitiu-se ainda que este potencial ocorre a uma profundidade de  $25$  cm abaixo da superfície do solo.

$$z = \int_0^{H_3} \frac{I}{1 + \frac{q}{K(h)}} dh \quad (10)$$

A manutenção da profundidade  $z$  ao longo do tempo exige a alimentação contínua do lençol freático de um valor igual à demanda, o que pode ser feito através do sistema de drenagem. Admitindo-se válidas as hipóteses de Dupuit, o espaçamento necessário foi calculado pela Equação (11).

$$L = [4K_s(h_0 - h_1)(2d_e - (h_0 - h_1))/q]^{1/2} \quad (11)$$

onde  $L$  é o espaçamento entre os drenos [L],  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada [L/T],  $q$  é a demanda [L/T],  $h_0$  é o nível d'água nos drenos [L] e  $h_1$  é a posição do lençol freático no ponto médio entre dois drenos consecutivos [L]. Tanto  $h_0$  como  $h_1$  têm como referência o limite inferior do aquífero (camada impermeável).

As hipóteses de Dupuit não contemplam satisfatoriamente as condições que se verificam na vizinhança dos drenos, onde o fluxo é nitidamente não horizontal. Por isso, a espessura real da região de fluxo, que tem a camada impermeável como seu limite inferior, foi substituída por uma espessura fictícia menor do que a real. As equações que seguem demonstram como essa espessura foi calculada.

$$d_e = \frac{d}{\left(\frac{8d}{\pi L} \ln \frac{d}{u}\right) + 1}, \quad d/L \leq 0,25 \quad (12)$$

$$d_e = \frac{L \pi}{8[\ln(L/u)]}, \quad d/L > 0,25 \quad (13)$$

onde  $d$  é a espessura real [L],  $d_e$  a espessura equivalente [L],  $u$  é o perímetro molhado dos drenos [L] e  $L$  é o espaçamento entre os drenos [L]. A Equação (11) ainda será insuficiente quando a profundidade do lençol freático situar-se abaixo de  $d_e$ , o que é possível já que  $d_e$  representa uma espessura fictícia. Como isso não aconteceu em nenhuma das situações consideradas, não houve necessidade de qualquer outro tipo de correção. Por fim, como  $d_e$  é uma função de  $L$ , a Equação (11), quando combinada com as Equações (12) ou (13), foi resolvida iterativamente. Os drenos foram considerados com  $50$  cm de profundidade e perímetro molhado de  $1,5$  m. A definição desses valores foi feita com base em informações sobre as condições médias que prevalecem nas áreas da Depressão Central exploradas com arroz irrigado. Já o nível d'água nos drenos foi suposto junto à superfície. Os resultados foram obtidos para dois cenários relacionados à profundidade do horizonte B (impermeável): profundo ( $\geq 10$  m) e superficial ( $= 1$  m).

## RESULTADO E DISCUSSÃO

### Profundidade do lençol freático e espaçamento entre os drenos

Os resultados de profundidade do lençol freático e espaçamento entre drenos, considerando o maior e o menor valor de demanda durante o período de

**AValiação DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO  
ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO**

desenvolvimento da cultura, estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Profundidade do lençol freático e espaçamento entre drenos considerando os modelos de van Genuchten (1980) e Vogel *et al.* (2001)

ET (cm/d)	van Genuchten			Vogel		
	z (cm)	L (m) B profundo	L (m) B superficial	z (cm)	L (m) B profundo	L (m) B superficial
0,230	32,5	21,1	11,2	61,2	33,2	14,0
0,575	29,5	10,3	6,8	52,8	15,0	8,5

Os resultados relativos à profundidade do lençol freático indicam que a Equação (10) mostrou-se bastante sensível ao modelo utilizado para estimativa da condutividade hidráulica não saturada. Esses resultados, quando obtidos com a Equação (10) combinada com a Equação (8) representam praticamente o dobro dos que foram obtidos com a combinação das Equações (10) e (2). No que diz respeito ao espaçamento entre os drenos, a Equação (11), combinada com as Equações (12) ou (13), foi muito sensível à profundidade do lençol freático, onde uma pequena variação desta resultou numa grande variação do espaçamento. Essa situação se repetiu para os cenários relativos à profundidade do horizonte B. A baixa transmissividade, decorrente da presença da camada impermeável próxima à superfície (1 m de profundidade), resultou em uma redução drástica nos espaçamentos calculados se comparados aos obtidos para a situação em que a camada impermeável foi admitida a 10 m ou mais de profundidade.

Se os espaçamentos inferiores a 20,0 m forem desconsiderados, pode-se constatar que com um valor dentro do intervalo 21,1 - 33,2 m (por exemplo, 25 m) a subirrigação proporciona lâminas de 390,4 e 231,8 mm, quando aplicados respectivamente os modelos de Vogel *et al.* (2001) e de van Genuchten (1980). Essas lâminas representam 70,0 e 41,5% da demanda total (557,5 mm). Esse intervalo para os valores de espaçamento só se verificou com horizonte B profundo. No caso de horizonte B superficial e com o mesmo espaçamento de 25 m, a subirrigação poderia suplementar 16,4% (91,5 mm) quando aplicado o modelo de Vogel *et al.* (2001) e 12% (67 mm) quando aplicado o modelo de van Genuchten (1980).

A infra-estrutura de drenagem já existente nas áreas de produção de arroz irrigado apresenta, em média, drenos espaçados de 50 m. Na Tabela 3 são apresentados os resultados para esse cenário.

**Tabela 3.** Profundidade do lençol freático e atendimento da demanda considerando o modelo de van Genuchten (1980) e Vogel *et al.* (2001)

L/B	van Genuchten		Vogel	
	z (cm)	% atendimento da demanda	z (cm)	% atendimento da demanda
L = 50 m B profundo	38,5	17,5	65,5	28,5
L = 50 m B superficial	50,5	3,5	73,0	4,4

Independentemente do modelo usado, em solos com horizonte B superficial e drenos espaçados de 50 m (condição média atual) a suplementação da demanda do milho

através da subirrigação é praticamente desprezível. A situação é bem mais confortável em solos com horizonte B profundo, quando a demanda pode ser

**AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO  
ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO**

atendida com um valor próximo de 20% do total (17,5 e 28,5%).

### CONCLUSÕES

As profundidades do lençol freático calculadas se mostraram muito sensíveis ao modelo de condutividade hidráulica adotado em conjunto com a equação (10). Já os espaçamentos entre drenos foram bastante sensíveis à essas profundidade e à profundidade da camada impermeável.

A suplementação da demanda hídrica do milho através da subirrigação teve seus valores mais significativos quando se supôs drenos espaçados de 25m e horizonte B profundo ( $\geq 10$  m). Quando se considerou a infra-estrutura atualmente existente nas lavouras de arroz irrigado (espaçamento médio entre drenos igual à 50m) houve uma queda acentuada no atendimento da demanda mesmo quando se admitiu o horizonte B profundo. No cenário em que esse horizonte foi suposto

superficial a contribuição da subirrigação se tornou desprezível.

O conjunto de resultados apresentado é preliminar e foi obtido a partir de parâmetros médios dos solos de várzea que ocupam a Depressão Central do Rio Grande do Sul. Como a relação  $K(S_e)$  apresenta acentuada não-linearidade, valores médios podem ser pouco representativos da variabilidade espacial desses solos. Por outro lado, a subirrigação apresenta custos relativos de implantação, operação e manutenção baixos. Isso justifica preliminarmente a continuidade de estudos dessa natureza, quando seria possível avançar na qualidade da estimativa dos parâmetros e na própria concepção da simulação, onde as equações poderiam ser aplicadas segundo uma ótica estocástica.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELTRAME, L. S.; LOUZADA, J. A. **Caracterização físico-hídrica dos solos formadores da várzea arrozeira do Rio Grande do Sul**. Relatório Técnico. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1996. 31 p.

BELTRAME, L. F. S.; LOUZADA, J. A. S.; LANNA, A. E. L.; CAUDURO, F. A.; ROSA, S. M.; MIRANDA, T. L. G. **Evapotranspiração Potencial no Rio Grande do Sul**. Relatório Técnico, Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1994. 49 p.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F. HECKLER, B. M. M. Distribuição Hídrica no Período Crítico do Milho e Produção de Grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI,

C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit Hídrico e Produtividade na Cultura do Milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H.; RADIN, B.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I.; SANTOS, A. O.; ARAGONES, R. S.; FRANÇA, S.; LANGENSIEPEN, M. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, v.1, n. 1, p. 23-28, 2001.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001.

CHAUDHARY, T. N.; BHATNAGAR, V. K.; PRIHAR, S. S. Corn yield and nutrient uptake as affected by water table depth and soil submergence. **Agronomy Journal**, v. 67, n. 6, p. 745-749, 1975.

**AVALIAÇÃO DO ATENDIMENTO DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO  
ATRAVÉS DA SUBIRRIGAÇÃO**

- CRUCIANI, D. E. Perdas de Água Por Drenagem Profunda Em Cultura de Milho Irrigado (*Zea mays*, L.). **O Solo**, v. 72, n. 2, p. 10-18, 1980.
- ELMI, A. A.; MADRAMOOTOO, C.; EGEH, M.; DODDS, G.; HAMEL, C. Water Table Management as a Natural Bioremediation Technique of Nitrate Pollution. **Water Quality Research Journal of Canada**, v. 37, n. 3, p. 563-576, 2002.
- FISHER, M. J.; FAUSEY, N. R.; SUBLER, S. E.; BROWN, L. C.; BIERMAN, P. M. Water table management, nitrogen dynamics and yields of corn and soybean. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1786-1795, 1999.
- GAYNOR, J. D.; TAN, C. S.; DRURY, C. F.; NG, H. Y. F.; WELACKY, T. W.; VAN WESENBEECK, I. J. Tillage, intercrop, and controlled drainage-subirrigation influence on atrazine, metribuzin, and metolachlor loss. **J. Environ. Qual.**, v. 30, p. 561-572, 2001.
- HELPER, F.; LOUZADA, J. A.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A. Determinação da necessidade de irrigação para a cultura do milho na Depressão Central do Rio Grande do Sul em sistemas de plantio direto e preparo convencional utilizando o modelo SWAP. In: AGUASUL - SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: ABRH, 2003. 1 cd-rom.
- LAL, R.; TAYLOR, G. S. Drainage and Nutrient Effects in a Field Lysimeter Study: I. Corn Yield and Soil Conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, n. 6, p. 937-941, 1969.
- MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. 1994. 172 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 85-92, 1995.
- MEJIA, M. N.; MADRAMOOTOO, C. A.; BROUGHTON, R. S. Influence of water table management on corn and soybean yields. **Agricultural Water Management**, v. 46, p. 73-89, 2000.
- SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation. **Vadose Zone Journal**, v. 5, p. 27-34, 2006.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VOGEL, T.; VAN GENUCHTEN, M. T.; CISLEROVA, M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. **Advances in Water Resources**, v. 24, p. 133-144, 2001.