

# MODELO AGROCLIMÁTICO PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MILHO NA REGIÃO DOS CERRADOS<sup>1</sup>

FRANÇOIS AFFHOLDER<sup>2</sup>, GUSTAVO COSTA RODRIGUES<sup>3</sup> e EDUARDO DELGADO ASSAD<sup>4</sup>

**RESUMO** - O objetivo deste trabalho foi descrever, calibrar e validar um modelo de estimativa da produtividade potencial do milho na região dos Cerrados brasileiros, com base nas variações meteorológicas (precipitação e evapotranspiração) e do solo (variação do armazenamento de água). O modelo considera a transpiração como o componente de maior importância na determinação do rendimento potencial, e é composto de um módulo de balanço hídrico e de uma função empírica simplificada que relaciona os termos do balanço hídrico com a produção. Foi observada uma relação entre os valores estimados e os valores medidos da variação do armazenamento de água no solo, com  $r^2 = 0,78$ , e uma boa relação entre o rendimento estimado e o medido.

Termos para indexação: modelagem, balanço hídrico, *Zea mays*, rendimento.

## AGROCLIMATIC MODEL FOR EVALUATION OF MAIZE BEHAVIOR IN THE CERRADO REGION

**ABSTRACT** - A study was performed to describe, calibrate and validate a model to estimate the potential yield of the maize crop in the Cerrado region of Brazil. The model is based on meteorological (precipitation and evapotranspiration) and soil (variation in the water stock) parameters and considers the transpiration the most important determinant of the yield potential. The model combines a water balance sub-model and a simplified empirical function that relates the water balance variables with the crop yield. It was observed a good relation ( $r^2 = 0,78$ ) between the simulated and the measured values of the water stock variation, as well as a good relation between the simulated and measured yield.

Index terms: modelling, water balance, *Zea mays*, yield.

## INTRODUÇÃO

A noção de produção potencial tem essencialmente dois tipos de aplicação em agronomia: em uma escala regional, nos zoneamentos agroclimáticos, que podem auxiliar a definição de políticas agrícolas considerando a variabilidade espacial dos fatores do

meio ambiente; em uma outra escala, na parcela cultivada, a identificação de diferenças entre a produção observada e a produção potencial forma a base necessária para diagnosticar os problemas limitantes, e indica a possível margem de ganho advinda da eliminação destas limitações.

A produção potencial pode ser definida como a que é obtida considerando-se os fatores do meio físico sobre os quais o agricultor não tem possibilidade de ação, principalmente os relacionados ao clima; os outros fatores determinantes (fertilidade do solo, material genético etc.) são fixados em níveis não limitantes. Em geral, somente alguns fatores climáticos são levados em consideração no cálculo da produção potencial, principalmente em função de sua variabilidade na região específica que está sendo estudada.

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 10 de junho de 1997.

<sup>2</sup> Eng. Agr., CIRAD/Embrapa-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), Caixa Postal 08223, CEP 73301-970 Planaltina, DF.

<sup>3</sup> Eng. Agr., M.Sc., Embrapa-CPAC.

<sup>4</sup> Eng. Agríc., Dr., Embrapa-CPAC.

No caso da região dos cerrados do Brasil, com gradientes de altitude pouco acentuados, a temperatura e a radiação solar são, em geral, consideradas não limitantes ao desenvolvimento do milho. Entretanto, a variabilidade espaço-temporal das chuvas é elevada.

Com o uso de modelos de balanço hídrico, pode-se levar em consideração não somente a variabilidade de espaço-temporal das chuvas, mas também a variação espacial dos solos.

Modelos de balanço hídrico com base no conceito de diferentes reservatórios de água no solo têm a vantagem de serem pouco exigentes em parâmetros de entrada, sem, no entanto, comprometer a precisão de suas simulações. Estes tipos de modelos têm sido aplicados em solos com as mais diversas propriedades físicas, havendo, entretanto, restrições à sua aplicação em solos com características especiais como os andossolos, vertissolos ou solos com altas taxas de ascensão capilar (Marchand, 1988; Leenhardt, 1991; Maraux, 1994). Estes modelos são melhor adaptados para análises regionais, pois são os que menos propagam erros de estimativa dos parâmetros do solo, comparativamente aos modelos baseados na equação de Richards, os chamados modelos conceituais (Leenhardt, 1991). Na parcela agrícola, uma estimativa precisa dos parâmetros de entrada do modelo é necessária, mas no caso de simulações determinísticas, a utilização das médias dos parâmetros gera poucos desvios em relação à utilização de parâmetros individuais, o que não ocorre com os modelos conceituais, nos quais simulações estocásticas são preferíveis (Marchand, 1988).

É necessário um maior entendimento do processo de funcionamento hídrico da cultura do milho nas condições do cerrado. O presente trabalho tem por objetivo descrever, calibrar e validar um modelo de cálculo do rendimento potencial do milho adaptado à região dos cerrados do Brasil central, com base nas variações edafoclimáticas.

## MATERIAL E MÉTODOS

O modelo SARRA-Br (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático-Brasil) se deriva do modelo SARRA proposto por Forest & Clopes (1994) para a cultura do milho no Senegal; é composto de um módulo de balanço hídrico relacionado à produção por uma função empírica.

### Módulo de balanço hídrico

O módulo de balanço hídrico BRASDHC (Brasil-Diagnóstico Hídrico das Culturas) é um modelo clássico de reservatórios, com escala de simulação diária, derivado do modelo BIP desenvolvido por Forest (1984), testado preliminarmente nos cerrados por Assad (1986) e modificado por Fréteaud et al. (1987), Vaksman (1990) e Affholder (1995). As principais variáveis são a lâmina infiltrada,  $L_i$  (mm), a evapotranspiração de referência,  $ET_o$  (mm dia<sup>-1</sup>), o índice de área foliar (IAF) e a profundidade máxima atingida pelo sistema radicular,  $Z_{rad}$  (cm). Os parâmetros de entrada do modelo são a capacidade de água disponível do solo,  $CAD$  (mm m<sup>-1</sup> de solo), e a profundidade máxima do solo explorada pelas raízes,  $P_{max}$  (cm). A cada ciclo de simulação (um dia), o modelo calcula os valores da evapotranspiração da cultura sem limitação hídrica,  $ET^*$  (mm dia<sup>-1</sup>), da evapotranspiração real,  $ETR$  (mm dia<sup>-1</sup>), a profundidade da frente de umidificação do solo,  $Z_{um}$  (cm), o armazenamento atual de água disponível na zona de solo, que pode potencialmente ser explorada pelas raízes,  $W$  (mm), o armazenamento que é efetivamente explorado pelo sistema radicular,  $S_{rad}$  (mm), e na camada superficial do solo,  $S_{sup}$  (mm), além da água percolando sob a zona radicular,  $PZR$  (mm).

O coeficiente cultural,  $K_c$ , a razão  $ET^*/ET_o$  que permite a dedução da  $ET^*$ , é calculado a partir do IAF, conforme Ritchie & Burnett (1971):

$$K_c = ET^*/ET_o = (a \cdot IAF) / (b + IAF) \quad (1)$$

onde  $a$  e  $b$  são parâmetros de calibração.

A evaporação do solo,  $ES$  (mm dia<sup>-1</sup>) é determinada da forma proposta por Vaksman (1990), que considera o efeito do *self-mulching* da camada superior do solo, sendo expressa na seguinte forma:

$$ES = m \cdot ET_o \cdot S_{sup} / (CAD \cdot Z_{sup}), \quad (2)$$

sendo  $Z_{sup}$  a espessura da camada de solo superficial considerada no processo de *self-mulching*, e  $m$ , um parâmetro de calibração.

$ETR$  é calculada pela generalização introduzida por Forest (1984) na função proposta por Eagleman (1971), que descreve a evolução da  $ETR$  em função da  $ET_o$  e da umidificação relativa do solo,  $UR$  (Fig. 1). Desta forma,

$$ETR = \text{Max}(ES, ET^* \cdot f(UR, ET_o)) \quad (3)$$

onde  $UR = S_{rad} / CAD \cdot Z_{rad}$ , e  $f$  é a função de Eagleman:  $f(UR, ET_o) = A + B + C \cdot UR + D \cdot UR^2 + E \cdot UR^3$ , sendo:

$$A = 0,732 / ET_o;$$

$$B = -0,05;$$

$$C = 4,97 - 0,661 \cdot ET_o;$$

$$D = 8,57 + 1,56 \cdot ET_o; \text{ e}$$

$$E = 4,35 - 0,88 \cdot ET_o.$$

Cronologicamente, e em cada ciclo de tempo, o modelo inicialmente calcula W para o dia d em relação ao cálculo da variação para o dia d+1,

$$W = W(d) + Li(d+1).$$

Zum é então calculada por:

$$Zum(d+1) = Zum(d), \text{ se } W/CAD < Zum(d) \text{ e}$$

$$Zum(d+1) = W / CAD, \text{ se } W/CAD > Zum(d)$$

e a percolação sob a zona radicular corresponde a

$$PZR(d+1) = 0, \text{ se } Zum(d+1) < Pmax \text{ e}$$

$$PZR(d+1) = (W - CAD.Pmax), \text{ se } Zum(d+1) > Pmax.$$

O balanço dos armazenamentos de água no solo é avaliado provisoriamente por

$$W' = W - PZR(d+1),$$

$$Ssup = \text{Min}(Ssup(d) + Li(d); CAD.Zsup),$$

$$Srad = \text{Min}(Srad(d) + Li(d); CAD.Zrad(d).$$

A ETR é calculada em seguida pela equação 3, e posteriormente é feito um balanço em cada um dos reservatórios, da forma,

$$Ssup(d+1) = Ssup - ETR, \text{ se } Ssup > ETR \text{ e}$$

$$Ssup(d+1) = 0, \text{ se } Ssup < ETR;$$

$$Srad(d+1) = Srad - ETR, \text{ se } Srad > ETR \text{ e}$$

$$Srad(d+1) = 0, \text{ se } Srad < ETR;$$

$$W(d+1) = W' - ETR.$$

### Função de produção

A função empírica que relaciona os termos do balanço hídrico à produção foi proposta por Reyniers & Forest (1990) e calibrada para diversas situações agrícolas na África por Forest & Clopes (1994). De acordo com esta função o rendimento (Rdt) é :

$$Rdt = 10000 \cdot IRESP,$$

sendo IRESP um índice de rendimento esperado e expresso como:

$$IRESP = SATciclo \cdot SATpc,$$

onde SATciclo é o índice de satisfação hídrica ao longo de todo o ciclo da cultura, calculada pela razão da ETR pela ET\* acumuladas,

$$SATciclo = \sum_{ciclo} ETR / \sum_{ciclo} ET*,$$

e SATpc é o índice de satisfação hídrica na fase crítica de formação dos componentes determinantes da produção, considerada como antes do início da fase de maturação dos grãos, calculada pela razão entre a ETR e a ET\* acumuladas neste período,

$$SATpc = \sum_{pc} ETR / \sum_{pc} ET*.$$

O índice IRESP acima descrito pode ser considerado uma forma simplificada do modelo de Jensen (1968) utilizado com resultados satisfatórios em condições brasileiras por Matzenauer et al. (1995).

### Calibração do módulo de balanço hídrico

No módulo de balanço hídrico, os parâmetros a e b da função que relaciona o IAF ao Kc, bem como os parâmetros m e Zsup da função de evaporação do solo, foram obtidos na calibração do modelo. Esta calibração foi realizada utilizando-se dados experimentais obtidos por Buttler (1989) em ensaio realizado em 1987 no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa-CPAC), em Planaltina, DF. Neste ensaio, foi utilizada a cv. Cargill 111, semeada na estação seca, em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob um sistema de irrigação tipo *line-source* (Hanks et al., 1976). Os tratamentos consistiram na aplicação de quatro regimes hídricos, correspondentes à reposição em cada irrigação de 160, 100, 60 e 30% da evapotranspiração potencial (tratamentos 1,6, 1,0, 0,6 e 0,3 ETo) a determinada distância da linha de aspersão. Somente foram utilizados os dados das parcelas que receberam 200 kg N/ha, além das parcelas em que não houve semeadura (solo nu), mas que recebiam os mesmos regimes hídricos.

Utilizou-se, no processo de calibração, os dados das medições *in situ* do armazenamento hídrico do solo, medido a cada 15 dias até a profundidade de 180 cm por método gravimétrico e através de uma sonda de nêutrons, e as medidas de área foliar ao longo do ciclo de crescimento.

O perfil de umidade do solo observado após a murcha nas plantas mais distantes da linha de aspersão no tratamento 0,3 ETo foi considerado como o conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente, PMP. O armazenamento total de água acumulado em 180 cm correspondente ao PMP foi de 365 mm. A capacidade de água disponível do solo utilizada nas simulações foi de

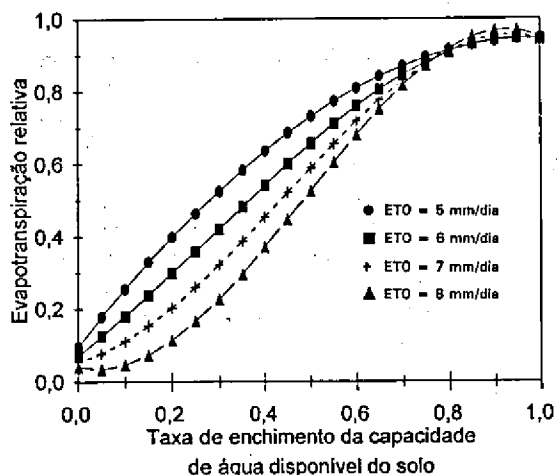


FIG. 1. Relação entre a evapotranspiração relativa da cultura (ETR/ET\*) e a taxa de enchimento da capacidade de água disponível do solo (UR) conforme calculada pela função de Eagleman.

110 mm/m, conforme os dados apresentados por Luchiari Júnior et al. (1985). A curva diária da evolução do IAF foi obtida por interpolação linear entre os valores observados no ensaio acima descrito.

Os dados da evapotranspiração de referência utilizados nas simulações foram os do tanque classe "A" da estação agroclimatológica do CPAC, localizada a 50 m da área experimental. Estes valores foram corrigidos pelo fator 0,85, conforme relação média entre a evapotranspiração calculada pela fórmula de Penman e a evaporação do tanque classe "A" obtida por Martins et al. (1988).

As simulações para calibração do modelo de balanço hídrico se iniciaram na data da primeira medição da umidade do solo, sendo este valor utilizado no modelo como o armazenamento inicial de água no solo.

A calibração do modelo foi feita utilizando-se um programa de regressão não linear acoplado ao módulo de simulação do balanço hídrico. Este programa procurava os valores dos parâmetros de calibração que, fornecidos ao modelo, minimizavam a soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados e simulados do armazenamento hídrico acumulado até a profundidade de 180 cm. Os armazenamentos atuais de água disponível no solo foram então deduzidos dos armazenamentos totais medidos, subtraindo-se os valores do armazenamento total no PMP. Inicialmente, a calibração da função de evaporação do solo foi realizada com os valores do solo sem vegetação, sendo os parâmetros  $m$  e  $Z_{sup}$  assim obtidos, posteriormente introduzidos no modelo, juntamente aos dados das parcelas cultivadas, para a calibração dos parâmetros  $a$  e  $b$  da função que relaciona o IAF com o coeficiente cultural.

#### Validação do módulo de balanço hídrico

A validação do módulo de balanço hídrico foi realizada em áreas agrícolas cultivadas com milho (cv. Cargill 125) no município de Silvânia (GO). Estas áreas estão sendo acompanhadas com o interesse de utilizar o modelo como instrumento no diagnóstico da variabilidade da produção. Foram selecionadas três parcelas em partes altas da topossequência, e três nas partes baixas, sob Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo endopetrolítico e solos aluviais, de forma a se abranger a maior parte das situações representativas do cultivo de milho na região. Em cada uma das parcelas selecionadas foi instalado um tubo de acesso para a sonda de nêutrons que permitisse medição até a profundidade de 180 centímetros.

As leituras da sonda de nêutrons foram calibradas por gravimetria, em duas ocasiões. Na primeira, as amostras para determinação do teor de água no solo por gravimetria foram coletadas no ponto de instalação dos tubos de acesso da sonda, em condições de solo úmido, e imediatamente após a colocação dos tubos foram realizadas leituras. A

segunda aferição foi feita após o ciclo da cultura, em condições de solo seco, coletando-se as amostras em um triângulo equilátero de 50 cm, com o tubo de acesso localizado no seu centro. A densidade aparente, utilizada no cálculo da umidade volumétrica a partir das medidas gravimétricas, foi determinada em amostras coletadas em cilindros. As medições com a sonda foram realizadas a cada 15 dias, aproximadamente, até 180 cm de profundidade, em camadas de 10 cm, prolongando-se além da data de colheita, de forma a permitir a validação da função de evaporação do solo sem vegetação.

As medições do IAF foram realizadas em plantas localizadas próximo ao tubo de acesso, no período de crescimento vegetativo, entre o espigamento e o início da senescência foliar e ao longo do enchimento dos grãos. Em cada uma destas datas foram amostradas quatro plantas, além de todas as folhas de quatro outras plantas. Estas folhas foram utilizadas no cálculo da área foliar específica, após medição da área foliar em um planímetro ótico e determinação de sua matéria seca. Este parâmetro foi utilizado no cálculo da área foliar das plantas amostradas próximo ao tubo de acesso, a partir da determinação da matéria seca da área foliar destas plantas. Os valores diários do IAF, necessários ao ajuste do modelo, foram calculados por interpolação linear entre as datas de amostragem, considerando-se o IAF constante entre 60 dias após a semeadura, data teórica de máximo desenvolvimento da cultivar utilizada, até a data (observada) de espigamento.

As observações da profundidade máxima do sistema radicular foram feitas em trincheiras abertas no fim do ciclo da cultura. A capacidade de água disponível foi determinada para cada tipo de solo e em cada horizonte pedológico em amostras não deformadas.

Cada parcela de medição se localizava a 500 m, aproximadamente, de um pluviômetro. A lâmina de água infiltrada no solo foi considerada, em todas as situações, como a precipitação ocorrida. Os dados de evapotranspiração de referência utilizados foram os dados do tanque classe "A" do CPAC, corrigidos conforme fator acima citado, sendo este o valor de evaporação mais próximo das parcelas experimentais. A data de início da simulação corresponde à data da primeira medição do armazenamento hídrico de água no solo, sendo este valor introduzido no modelo como armazenamento inicial.

#### Validação do módulo de cálculo do rendimento potencial

Para a validação da simulação do rendimento potencial, utilizou-se uma série de dados obtidos experimentalmente no CPAC. Além dos rendimentos obtidos nos diferentes regimes hídricos do experimento de Buttler (1989), foram utilizados os resultados de um ensaio de longa duração

(1982 a 1988) com o milho cv. Cargill 111 sob diferentes regimes hídricos e com a aplicação de 6 t/ha de gesso. Somente os anos de 1985 a 1988 foram utilizados, época em que não havia mais limitação química ao aprofundamento do sistema radicular. Foram excluídos da análise os resultados das parcelas em que a calagem havia sido feita havia mais de três anos, bem como as parcelas com menos de um ano de calagem. Todos estes ensaios foram conduzidos sem limitação nutricional e com controle adequado de pragas, doenças e invasoras. Desta forma, considera-se que a variabilidade no rendimento observado foi devida unicamente aos diferentes regimes de aplicação de água.

Os parâmetros da reserva útil do solo, lâmina infiltrada (precipitação) e evapotranspiração de referência foram obtidos nos próprios ensaios. As simulações foram efetuadas considerando-se a profundidade máxima do solo que pode ser explorada pelas raízes de 180 cm, valor comum para o milho em solos sem impedimento físico ou químico ao crescimento radicular (Tardieu, 1984). O armazenamento inicial de água no solo foi fixado em zero para os cultivos conduzidos durante a estação chuvosa, e as simulações se iniciaram com as primeiras chuvas da estação. Nos cultivos durante a estação seca as simulações se iniciaram três meses antes da data de semeadura da cultura, e considerou-se o solo com sua capacidade máxima de retenção em todo o perfil.

A velocidade do crescimento radicular em profundidade foi fixada em 2,5 cm/dia nos primeiros 60 dias após o plantio, e considerada nula a partir desta data. Para todas as situações observadas considerou-se que a evolução do IAF seguia o padrão descrito na Fig. 2, sendo a duração dos subperíodos dependentes da duração do ciclo da semeadura à maturação e atingindo um IAF de 5 na floração.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Calibração do módulo de balanço hídrico

Os parâmetros da função de evaporação do solo nu obtidos na calibração foram  $Z_{sup} = 100$  cm, com  $CAD.Z_{sup}$  fixada em 110 mm nos ensaios utilizados, e  $m = 0,72$ . Com estes valores, a evolução da evaporação do solo ao longo do tempo, a partir da capacidade de campo e sem nenhum aporte posterior de água, é mostrado na Fig. 3. Nota-se que os solos utilizados na calibração praticamente não possuem capacidade de *self-mulching*, sendo a diminuição da evaporação quase linear ao longo do tempo. O valor obtido para  $Z_{sup}$  é relativamente alto, na medida que signifique um secamento do solo até 1 m de profundidade causado por perdas evaporativas.

A comparação entre os armazenamentos hídricos úteis medidos em solo nu, e simulados com os parâmetros acima determinados, é mostrada na Fig. 4. Observa-se que nos tratamentos com regimes de irrigação correspondentes a 0,6 e 0,3 ETo os armazenamentos simulados se aproximam dos valores observados, ao passo que nos tratamentos com maiores níveis de aplicação de água (1,0 e 1,6 ETo) o modelo superestimou o armazenamento. Nestes dois tratamentos, os valores medidos diminuem no período entre 40 e 70 dias após a semeadura (considerando as parcelas cultivadas), aumentando em seguida.

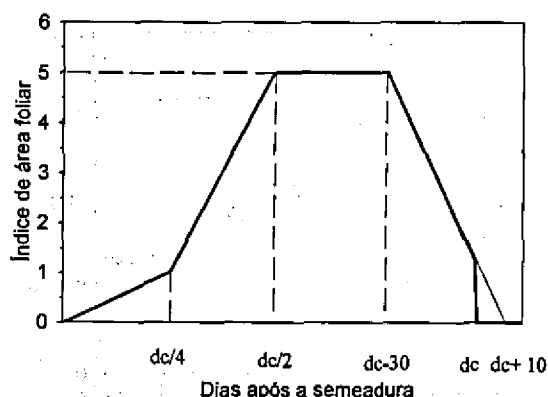


FIG. 2. Curva de referência da evolução do índice de área foliar (IAF) ao longo do tempo, utilizada no ajuste do modelo de validação da função de produção ( $dc$  = duração do ciclo).

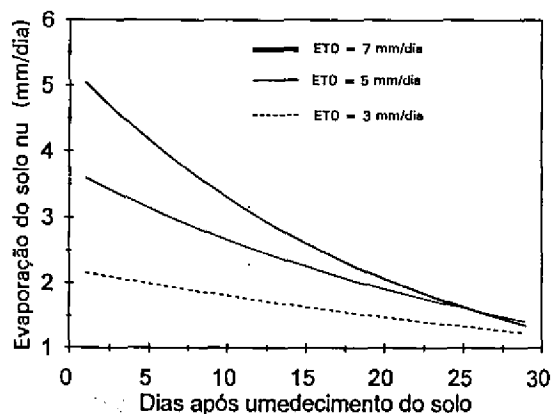


FIG. 3. Evaporação do solo em função do tempo, após o perfil do solo estar em sua capacidade máxima de armazenamento, da forma simulada pelo modelo após calibração.

Porém a lâmina aplicada nas irrigações foi constante durante todo o período, sendo que o total de água recebido pela cultura foi um pouco mais elevado, devido a precipitações, durante a fase onde se observou esta diminuição do armazenamento. Assim, pode-se supor que nos tratamentos com altos níveis de irrigação, ocorreram mudanças ao longo do tempo no mecanismo de evolução do armazenamento hídrico do solo, ou que há erros nos dados medidos de evapotranspiração de referência das irrigações ou do armazenamento de água do solo. Perdas de água por percolação além da profundidade de 180 cm poderiam explicar esta mudança na evolução do armazenamento hídrico. Se esta percolação profunda também estivesse ocorrendo nos tratamentos que

receberam menor volume de irrigação, o alto valor de calibração da  $Z_{sup}$  poderia ser explicado, sendo então a diminuição do armazenamento hídrico causada não somente pela evaporação do solo mas também por percolação.

A calibração da função que relaciona o IAF ao coeficiente cultural apresenta menos incertezas, e os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$  da equação 1, obtidos por calibração, foram 1,68 e 0,67, respectivamente. Com estes valores, observa-se que o coeficiente cultural do milho com um IAF de 5 atinge 1,45 (Fig. 5).

Simulando-se as parcelas cultivadas com milho com os parâmetros calibrados, observa-se (Fig. 6) que os armazenamentos simulados se aproximaram dos valores observados. Nota-se que as imprecisões

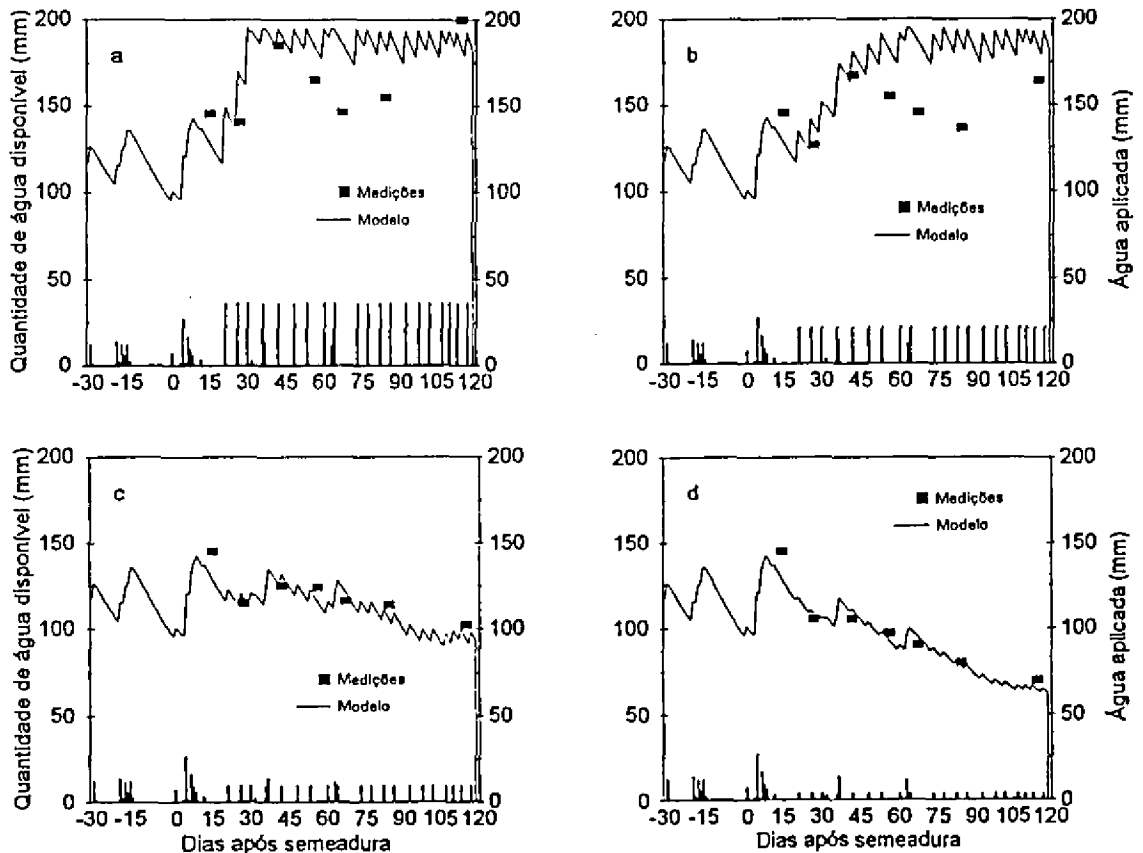
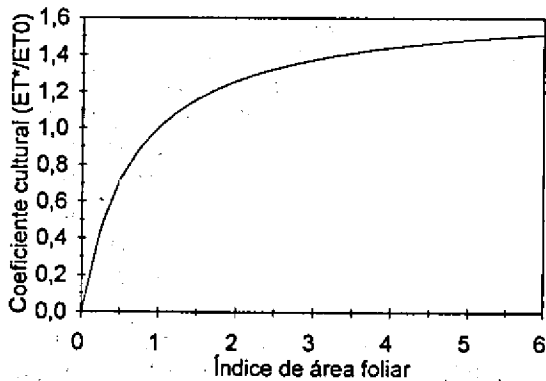


FIG. 4. Armazenamento atual simulado em solo nu, após calibração do modelo, comparado aos valores observados nos diferentes tratamentos (a = 1,6 ETo; b = 1,0 ETo; c = 0,6 ETo; d = 0,3 ETo) do experimento *line source*. As barras verticais se referem ao aporte de água via irrigação e precipitação.

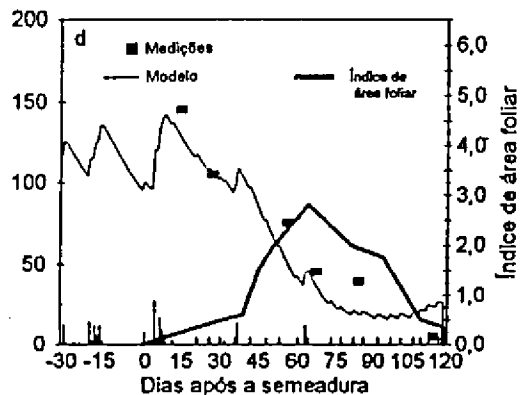
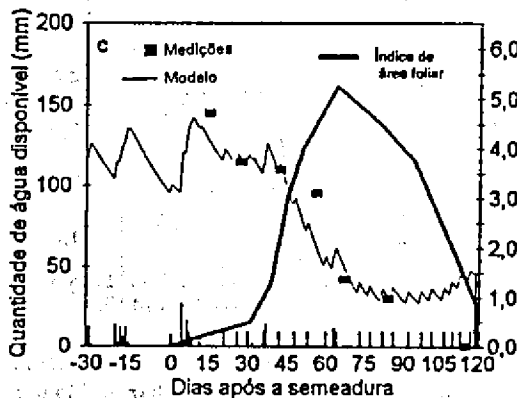
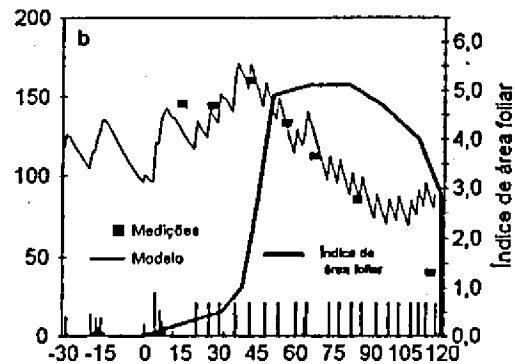
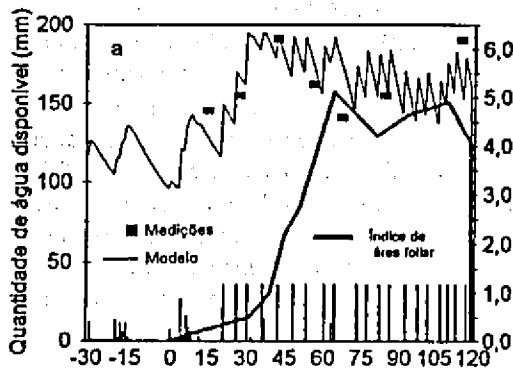


**FIG. 5.** Relação entre o coeficiente cultural ( $ET^*/ET_o$ ) e o índice de área foliar do milho obtido pela calibração do modelo com os dados das parcelas cultivadas do experimento *line-source*.

observadas na função do cálculo da evaporação do solo nu em condições de altos níveis de irrigação, onde os valores simulados foram bem maiores que os observados, tem pouco efeito na simulação de situações sob cultivo. Isto pode ser atribuído ao fato de a função de cálculo da evaporação do solo sem vegetação não influir no cálculo da ETR pelo modelo quando o coeficiente cultural ultrapassa o valor de  $m$  (0,72). Na realidade, quando o solo está úmido ( $MR=1$ ), pode-se deduzir pela equação de Egleman (eq. 3) e pela Fig. 2 que:  $ES = mET_o$  e  $f(MR,ET_o)=1$ . Isto leva a:

$ETR = ES$  se e somente se  $ET^*/ET_o < m$ .

O coeficiente cultural ( $ET^*/ET_o$ ) ultrapassou o valor de  $m$  (0,72) quando o IAF atingiu 0,5 (Fig. 5),



**FIG. 6.** Armazenamento atual observado e simulado após calibração da função que relaciona o índice de área foliar com o coeficiente cultural, e índice de área foliar obtido por interpolação dos dados medidos, nos diferentes tratamentos (a = 1,6  $ET_o$ ; b = 1,0  $ET_o$ ; c = 0,6  $ET_o$ ; d = 0,3  $ET_o$ ) do experimento *line source*. As barras verticais se referem ao aporte de água via irrigação e precipitação.

mesmo em condições adversas para o desenvolvimento do milho.

### Validação do modelo de balanço hídrico

Nos ensaios utilizados nesta validação, o IAF máximo atingido pelas plantas de milho variou de 1,2 a 4,95, um intervalo de variação um pouco maior do que o observado nas situações utilizadas na calibração. A profundidade máxima atingida pelo sistema radicular variou entre 90 e 180 cm. A precipitação total durante o ciclo da cultura variou de 524 mm a 862 mm, com a ocorrência de dois veranicos, de 7 a 21 de janeiro e de 22 de fevereiro a 9 de março. Estes períodos de estiagem coincidiram com o espigamento, enchimento de grãos e colheita, conforme a data de plantio. A comparação entre os armazenamentos atuais de água disponível medidos e simulados mostrou um funcionamento satisfatório do modelo (Fig. 7). Um exemplo de uma situação particular é mostrado na Fig. 8.

Quanto aos períodos em que o armazenamento hídrico do solo foi inferior à capacidade de água disponível, a boa concordância entre os armazenamentos simulados e medidos constitui, ao mesmo tempo, validação da função de cálculo da ETR e da hipótese de que toda a água das chuvas se infiltrou, ou seja, que a lâmina infiltrada é igual à precipitação. Nos períodos em que o solo estava próximo à capacidade de campo, ou com o armazenamento hídrico próximo

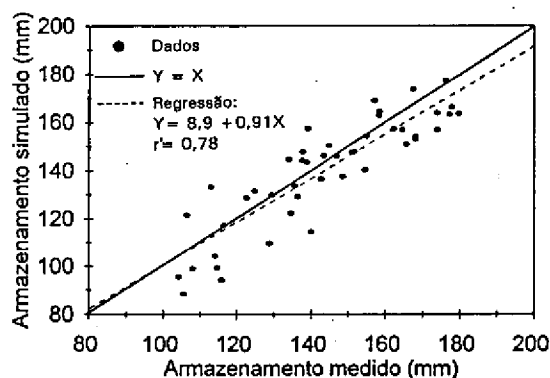


FIG. 7. Relação entre os valores simulados e medidos do armazenamento atual do solo nas parcelas cultivadas com milho em meio real em Silvânia (GO).

à reserva útil, não foi possível verificar se houve ou não escoamento superficial. Em relação a estes períodos, o excesso de água das chuvas em relação à capacidade de armazenamento do solo pode não somente ter escoado superficialmente, mas também ter sido percolado para camadas mais profundas que a zona colonizada pelas raízes. Pela falta de uma função de cálculo do escoamento superficial, o modelo considera o excesso de água como percolação. Como não se pode medir o fluxo de percolação somente com medições com a sonda de nêutrons, não foi possível validar essa partição que o modelo faz entre o escoamento superficial e a percolação. Esta constitui uma limitação na utilização do modelo na medida em que não permite, na forma atual, servir de base para a estimativa do balanço mineral ou da erosão.

A evaporação do solo calculada a partir das medidas de umidade do solo realizadas após a colheita, no período de 21 de abril, quando ocorreu a última chuva, a 12 de setembro, data da última medição da umidade do solo nesta estação seca, correspondeu a 96 mm. O valor simulado, com a função de evaporação de solo nu do modelo, para este período, foi de 109 mm. Desta forma, os valores elevados dos coeficientes desta função, obtidos na calibração do modelo, podem então ser confirmados por estas observações. Uma evaporação de solo sem vegetação de

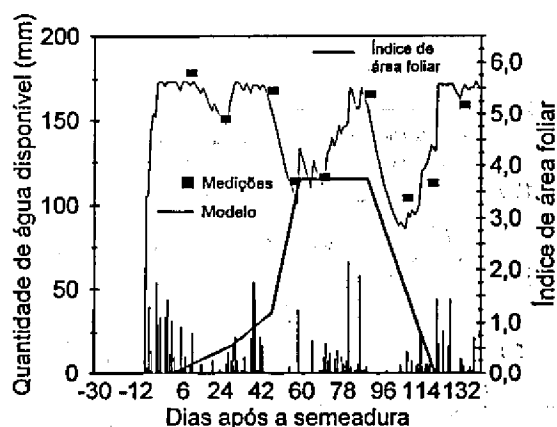


FIG. 8. Evolução do armazenamento atual simulado e observado e índice de área foliar obtido por interpolação dos dados medidos, em parcela cultivada com milho em Silvânia (GO). As barras verticais se referem ao aporte de água via precipitação.



100 mm ao longo de cinco meses da estação seca corresponde a um esgotamento quase completo da reserva útil de água na camada de solo até a profundidade de 100 cm. Assim, quando o solo se encontra na capacidade de campo ao final do ciclo da cultura, sendo a evapotranspiração potencial comparável à do presente estudo, 5 mm/dia em média, pode-se esperar que a camada de solo até 1 m de profundidade esteja no ponto de murcha permanente ao final da estação seca. Como consequência, uma maneira apropriada de operar o modelo para as culturas da estação chuvosa seria de iniciar a simulação antes das primeiras chuvas da estação, usando o valor zero como armazenamento inicial de água disponível no solo.

Para verificar este tipo de parametrização, foram feitas simulações com as situações utilizadas na validação do modelo de balanço hídrico, admitindo-se um armazenamento inicial nulo de água no solo no início da estação das chuvas, não mais usando o armazenamento observado na primeira medida da sonda como ponto de partida das simulações. Entre dez situações estudadas, nove apresentaram um valor simulado na data da primeira medição da sonda bastante próximo do valor observado, e em uma situação o valor simulado foi 30 mm superior ao valor medido. Durante este período, o armazenamento atual medido de água no solo é inferior à capacidade de água disponível, enquanto o armazenamento atual simulado é igual à capacidade de água disponível. Neste período do ciclo, a ETR é calculada pelo modelo, utilizando somente a função de cálculo da evaporação do solo. Portanto é pouco provável que esta função subestime a evaporação, visto que esta função gera, ao contrário, valores elevados de evaporação, e porque o local em questão não apresenta diferenças significativas de textura ou estrutura do solo com os sítios vizinhos, onde não foram observadas diferenças nesta magnitude entre os valores simulados e observados. Desta forma, pode-se inferir, para esta situação, um escoamento superficial da ordem de 30 mm, durante os primeiros dias do ciclo.

#### Validação do SARRA-Br

A comparação entre os rendimentos potenciais medidos e simulados é mostrada na Fig. 9. Forest &

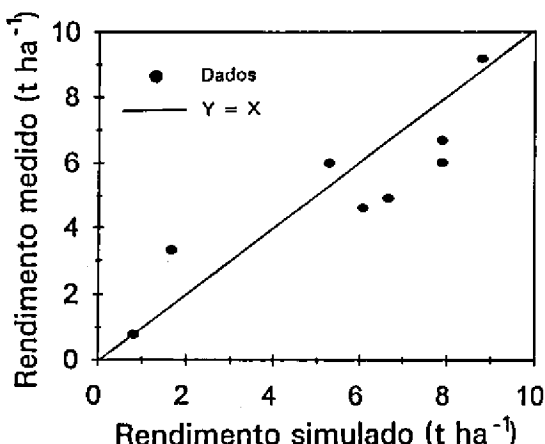


FIG. 9. Relação entre os valores simulados e medidos do rendimento de grãos de milho nos ensaios conduzidos no CPAC.

Clopes (1994) propuseram e validaram esta função, vinculando o rendimento do milho aos resultados do balanço hídrico para as condições do Sahel Africano, bastante diferentes tanto com relação ao solo, quanto em relação ao clima e genótipos utilizados, das condições prevaletentes nos cerrados. Ainda que pequeno, o volume de dados utilizados para testar esta relação nos cerrados mostra que ela se aplica de forma satisfatória.

### CONCLUSÕES

1. O modelo proposto neste trabalho simula corretamente o enchimento da reserva de água do solo no início do ciclo de crescimento, em situações onde o escoamento superficial é nulo ou desprezível.
2. Independentemente da ocorrência de escoamento superficial, a evapotranspiração real da cultura é estimada de forma satisfatória.
3. O modelo testado é adequado ao zoneamento da produção do milho em escala regional.

### AGRADECIMENTOS

Aos técnicos Valdivino de Oliveira Pais, José Lourenço de Oliveira Filho, ao assistente de pesquisa, Balbino Evangelista, pelo auxílio na condução do trabalho, e aos produtores José Ribeiro e José Aní-

sio, por haverem aceitado os constrangimentos decorrentes das medições em suas lavouras.

### REFERÊNCIAS

- AFFHOLDER, F. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Research*, v.41, p.109-121, 1995.
- ASSAD, E.D. Simulation de l'irrigation et du drainage pour les cultures pluviales de riz et de maïs en sols de bas-fonds à Brasília. *Memoires et Travaux de IRAT*, n.13, p.10, 1986.
- BUTTLER, I.W. Predicting water constraints to productivity of corn using plant-environmental simulation models. Ithaca: Cornell Univ., 1989. 237p. Ph.D. Thesis.
- EAGLEMAN, J.R. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.8, p.385-394, 1971.
- FOREST, F. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Montpellier: IRAT-CIRAD, 1984. 63p.
- FOREST, F.; CLOPES, A. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In: REYNIERS, F.N.; NETOYO, L. (Eds.). *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale: Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture?* Paris: J. Libbey, 1994. p.3-15.
- FRÉTEAUD, J.P.; POSS, R.E.; SARAGONI, H. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. *Agronomie Tropicale*, Montpellier, v.42, n.2, p.94-103, 1987.
- HANKS, R.J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V.P.; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.40, n.3, p.426-429, May/June 1976.
- JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T.T. (Ed.). *Water deficits and plant growth*. New York: Academic Press, 1968. v.2, p.1-22.
- LEENHARDT, D. *Spatialisation du Bilan Hydrique: Propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé dur d'hiver*. Montpellier: École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 1991. 123p. Thèse de Doctorat.
- LUCHIARI JÚNIOR, A.; RESENDE, M.; RITCHEY, K.D.; FREITAS JUNIOR, E. de; SOUZA, P.I. de M. de. Manejo do solo e aproveitamento de água. In: GOEDERT, W.J. (Ed.). *Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo*. São Paulo: Nobel/Brasília: Embrapa-CPAC, 1985. p.285-322.
- MARAUX, F. *Modélisation mécaniste et fonctionnelle du bilan hydrique des cultures: Le cas des sols volcaniques du Nicaragua*. Paris: Institut National Agronomique Paris-Grignon, 1994. 260p. Thèse de Doctorat.
- MARCHAND, D. *Modélisation fonctionnelle du bilan hydrique sur sol cultivé: approche déterministe ou stochastique*. Grenoble: Université Joseph Fourier-Grenoble 1, 1988. 246p. Thèse de Doctorat.
- MARTINS, S.R.; APARÍCIO, D.J.; CASTILLO, F.E. Contribuição ao estudo da evaporação e evapotranspiração de referência. Determinação de coeficientes de tanque Classe A. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. Anais... [S.l.]: ABID, 1988. p.1023-1036.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para a estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v.1, n.2, p.225-241, 1995.
- REYNIERS, F.N.; FOREST, F. La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. *Sécheresse*, v.1, p.36-39, 1990.
- RITCHIE, J.T.; BURNETT, E. Dryland evaporative flux in subhumid climate: II. Plant influences. *Agronomy Journal*, Madison, v.63, n.1, p.56-62, Jan./Feb. 1971.
- TARDIEU, F. *Etude au champ de l'enracinement du maïs*. Paris: Institut National Agronomique Paris-Grignon, 1984. 232p. Thèse de Doctorat.
- VAKSMANN, M. *Le modèle BIPODE: Logiciel*. Bamako: IRAT, 1990. Não paginado.