

Ajuste e calibração do módulo balanço hídrico do modelo STICS, num sistema de plantio direto de milho-milheto, em condições do Cerrado brasileiro

Adjustment and calibration of the water balance module of the STICS model under the no-till maize-pearl millet system in the Brazilian Cerrado conditions

Fernando Antônio Macena da Silva¹, Eric Scopel², Marc Corbeels², François Affholder²

Resumo: O principal objetivo deste trabalho foi ajustar e calibrar o módulo balanço hídrico do modelo STICS (**Simulateur mult_Tdisciplinaire de Culture Standard**), num sistema de plantio direto (SPDCV) de milho-milheto, em condições do Cerrado brasileiro, por meio de incorporação de novos parâmetros e funções a esse módulo, visando considerar os efeitos das palhadas e simular sequencialmente o crescimento e o rendimento das culturas do milho e do milheto e compará-lo com um plantio de milho em sistema convencional (SPC). Os seguintes parâmetros de calibração e variáveis necessárias para a avaliação do modelo foram coletados a partir de experimentos conduzidos no campo: conteúdo de umidade do solo, índice de área foliar, biomassa e rendimento de grãos. O modelo STICS estimou satisfatoriamente a variação da disponibilidade de água no solo e os componentes de produção das duas culturas estudadas. Uma vez calibrado, geraram-se os termos do balanço hídrico nos dois tipos de sistema de plantio. O SPD foi mais eficiente na valorização dos recursos hídricos ao longo de toda a estação chuvosa, permitindo maior produção de fitomassa vegetal e de grãos do milho. O STICS, calibrado para a sucessão milho/milheto em SPD na palha, torna-se uma ferramenta eficaz para auxílio às tomadas de decisão no que diz respeito às definições das melhores datas de plantio, à avaliação da sensibilidade da produção nos dois sistemas de plantio e indicação de áreas com maior potencial para o desenvolvimento do milho nos dois sistemas de plantio.

Palavras-chave: palhada, disponibilidade de água no solo, modelagem, simulação.

Abstract: The main objective of this work is to adjust and calibrate the water balance module of the STICS (**Simulateur mult_Tdisciplinaire de Culture Standard**) crop model under no-till maize-pearl millet crop system (SPDCV) in Brazilian Cerrado conditions, by incorporating new parameters and functions to these module, aiming to consider the effects of mulches and simulate sequentially the growing and yield of maize and pearl millet crops and to compare with those from maize under conventional planting system (SPC). The following input parameters and variables required for model evaluation were collected from experimental fields: soil moisture, leaf area index, biomass and grain yield. The STICS model estimated properly the variations of soil water availability as well as the components of productions of the two studied crops. The SPDCV crop system was more efficient in terms of water resources valorization throughout the rainy season, allowing higher maize biomass and grain productions. The STICS crop model, calibrated for the maize-pearl millet succession in mulch-related SPDCV, becomes an efficient tool for helping decision-making activities in terms of the best planting dates definition, evaluation of the sensitivity of the production in these two planting systems and indication of the areas with higher potential for development of maize in these two planting systems.

Key-words: mulch, soil water availability, crop modelling, simulation.

¹Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (EMBRAPA CERRADOS), CP 08223, CEP 73301-970, Planaltina, DF, Brasil.

²Annual cropping systems, Centre de Coopération International en Recherche pour le développement (CIRAD), avenue Agropolis, 34398, Montpellier Cedex 5, France.

Introdução

Atualmente, uma das tecnologias mais utilizadas pelos produtores para diminuir os problemas de degradação dos recursos naturais é o sistema plantio direto com cobertura vegetal (SPDCV). O não revolvimento do solo nesses sistemas, aliado à camada de resíduos que atua como dissipadora de energia, permite criar e manter condições físicas do solo mais favoráveis ao balanço hídrico e à produção das culturas, pois a palhada presente na superfície do solo reduz o impacto das gotas de chuvas, protegendo o solo contra a compactação e a erosão, diminuindo o escoamento superficial e a evaporação da água do solo e aumentando o tempo e a capacidade de infiltração da água (SATURNINO, 2001; LAL, 1998; SCOPEL et al., 1998).

Para Salton et al., 1998 e Derpsch et al., (1990), esse sistema também possibilita melhores condições de conservação de umidade para o crescimento e o desenvolvimento das culturas, minimizando os efeitos adversos causados pelo déficit pluviométrico ou veranico.

Os modelos de simulação, que têm como objetivo predizer e avaliar o crescimento de plantas, se apresentam como uma ferramenta de grande potencial para integrar os componentes do sistema solo-plantio-atmosfera e estimar o desempenho da cultura em diferentes áreas e situações possíveis de produção. O modelo **STICS** (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard), descrito em detalhes por Brisson et al. (1998), é um modelo genérico já adaptado para o sistema convencional de preparo do solo, que simula o crescimento e o rendimento de várias culturas. Apesar de sua grande abrangência para esse propósito, ainda não foi testado, nas condições do Cerrado brasileiro, para o sistema plantio direto com plantas de cobertura.

Assim, o principal objetivo deste trabalho foi ajustar e calibrar o módulo balanço hídrico do modelo STICS num sistema de plantio direto de milho-milheto, em condições do Cerrado brasileiro, por meio da incorporação de novos parâmetros e funções a esse módulo, visando considerar os efeitos das palhadas e simular seqüencialmente o crescimento e o rendimento das culturas de milho e milheto. Posteriormente, buscou-se usar e testar o modelo para quantificar os impactos do sistema plantio direto no balanço hídrico e na produção de fitomassa em cultivo de milho, no Cerrado.

Material e Métodos

O trabalho foi conduzido nos campos experimentais da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina, DF, a uma altitude de 1.175 m e nas coordenadas geográficas de 15° 35' 30" de latitude Sul e 47° 42' 00" de longitude Oeste. O clima é do tipo tropical estacional (Aw), conforme classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.400 mm e o solo é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo Antrópico Distrófico, textura argilosa, relevo plano, fase Cerrado Típico gibbsítico.

Foram estabelecidas duas parcelas contínuas, com o cultivo do milho em dois sistemas de plantio, o convencional e o direto. Seis subparcelas homogêneas de áreas úteis individuais de 14,4 m² foram utilizadas, sendo três no sistema de plantio convencional, denominadas PC1, PC2 e PC3, e três no sistema de plantio direto, identificadas como PD1, PD2 e PD3. Em cada uma dessas subparcelas, instalou-se um tubo de acesso de alumínio no centro, para o acompanhamento e o registro do conteúdo de umidade do solo até 180 cm de profundidade, com a utilização de uma sonda de nêutrons.

O plantio do milho, variedade Cargil 901, foi feito mecanicamente em data 05/11/2001, nos dois sistemas de plantio, sendo que, no plantio direto, existiam 4.000 kg ha⁻¹ de palhada do milheto remanescente do ano agrícola anterior. Nas seis subparcelas estabelecidas, foram coletados dados referentes ao número de plantas, número de espigas e número de grãos por m², peso médio de 100 grãos (g), massa seca de um grão (g), produtividade média de grãos (kg ha⁻¹), fitomassa total (kg ha⁻¹) e índices de área foliar (IAF, m² m⁻²). Os IAFs foram medidos em diversas fases fenológicas das culturas, com um medidor de área foliar de marca LICOR, modelo LI-2000. A colheita do milho foi feita em 22/03/2002 e o plantio do milheto foi realizado seis dias após, em 28/03/2002.

A aferição do desempenho do modelo foi efetuada utilizando-se o método gráfico, plotando-se os valores observados e os simulados do índice de área foliar, da variação da disponibilidade de água no solo, e utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2) de análise de regressão linear como critério estatístico. Para os dados de produtividade de grãos e matéria seca total, determinou-se a diferença percentual (DIF, %) entre os valores simulados (Vsim) e observados (Vobs).

Todas as equações, símbolos e parâmetros necessários para rodar o modelo são apresentados por Brisson et al. (1998), Affholder et al. (2003) e Scopel et al. (2004). Neste estudo, foram destacados apenas os parâmetros dos novos submodelos incorporados ao módulo balanço hídrico do modelo STICS e os que foram ajustados para as condições edafoclimáticas da sequência milho-milheto no Cerrado, conforme mostra o Quadro 1.

Para calibrar o modelo STICS, no contexto do sistema plantio direto com simulação de duas culturas em sequência, foram feitas as mudanças apresentadas a seguir, nas equações 1 a 7:

a) A relação entre taxa de cobertura do solo (TC) e quantidade de palha (Q) foi expressa pela seguinte função exponencial:

$$TC = 100 * (1 - e^{-\alpha * Q}) , \quad (1)$$

Em que: TC é taxa de cobertura do solo pela palhada (%); Q a quantidade de resíduo ($kg.ha^{-1}$) e α é o parâmetro de ajuste estimado (Quadro 1), que representa a área coberta por unidade de peso seco do resíduo ($ha.kg^{-1}$ de resíduo). O valor de α depende do tipo de palhada.

b) A dinâmica de decomposição da palhada foi expressa em função do tempo, pela seguinte função exponencial:

$$TD = 100 * (1 - e^{-k * t}) , \quad (2)$$

Quadro 1. Valores dos parâmetros utilizados para adaptar o modelo STICS ao sistema de plantio direto com cobertura vegetal, nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro.

Parâmetro (Unidade)	Cultura		Fonte
	Milho	Milheto	
Palhada na superfície do solo			
α ($ha.kg^{-1}$)	0,4341	0,3859	Silva et al., 2006
κ (dia^{-1})	0,0071	0,0088	Silva et al., 2006
$a(-)$	0,298	0,3245	Silva et al., 2006
β	0,553	0,411	Silva et al., 2006
Escoamento Superficial			
x (PC) %	-	0,40	Silva et al., 2006
x (PD) %	-	0,19	Silva et al., 2006
y (PC) mm	-	8	Silva et al., 2006
y (PD) mm	-	18	Silva et al., 2006
Planta			
ϵ	0,7	0,7	Affholder et al., 2003
DLAIMAX - $^{\circ}C^{-1}.dia^{-1}$	$1,65 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$	Ajustado
EFCROIVEG - $g.MJ^{-1}$	2,9	3,0	Ajustado
EFCROIREPRO - $g.MJ^{-1}$	2,6	2,8	Ajustado
Solo			
CAD – mm	PC - 187 a 204 PD - 165 a 189	PD- 165 a 189	Observado
Profundidade radicular - cm	100	150	Observado

em que: TD é taxa de decomposição dos resíduos (%), t é o tempo (dias) e κ parâmetro de ajuste estimado (Quadro 1).

c) A capacidade máxima de água da chuva que pode ser armazenada pela palhada (CA_{Tot} , mm) é proporcional à quantidade da palhada que fica sobre o solo e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$CA_{Tot} = a * Q * 10^{-4}, \quad (3)$$

em que: Q é a quantidade de resíduo ($kg.ha^{-1}$) e a é o parâmetro ajustado (Quadro 1).

d) As condições climáticas locais agem diretamente sobre a água armazenada pela palhada, cuja perda por evaporação está diretamente relacionada com a quantidade de energia recebida. Logo, a evaporação da água contida na palhada (EPAL, mm) é calculada pela seguinte equação:

$$EPAL = ETP * (\exp(-\varepsilon * IAF)) * (1 - \exp(-\beta * \alpha * Q)), \quad (4)$$

em que: ETP ($mm.dia^{-1}$) é a evapotranspiração de referência, Q quantidade de resíduo ($kg ha^{-1}$), IAF é o índice de área foliar da planta, ε o coeficiente de extinção do saldo radiação pela parte aérea da planta, e β é um parâmetro ajustado (Quadro 1) que representa o coeficiente de extinção do saldo radiação na camada de palha que fica sobre o solo. Sendo $\alpha * Q$, definido pela equação 1, a área da palhada por unidade de área no plano do solo ($m^2 m^{-2}$), ou seja, o índice de área de mulch.

e) A radiação que atravessa a palhada e chega até o solo (R_{ss} , $MJ m^{-2}$) é função da quantidade ($kg ha^{-1}$) e do tipo da palhada remanescente no solo e pode ser estimada utilizando-se o conceito da Lei de Beer, segundo a equação:

$$R_{ss} = R_i * \exp(-\beta * \alpha * Q), \quad (5)$$

em que: R_i é a radiação solar global que incide sobre a palhada ($MJ m^{-2}$).

f) A evaporação potencial do solo (EOS, em $mm dia^{-1}$), função da quantidade dos resíduos que ficam sobre a superfície do solo (Q, $kg ha^{-1}$) e da evapotranspiração de referência (TETP, em $mm.dia^{-1}$), foi estimada pela seguinte equação:

$$EOS = TETP * \exp(-\varepsilon * LAI) * \exp(-\beta * \alpha * Q). \quad (6)$$

g) O escoamento superficial (ESup, mm) foi calculado por uma função empírica simples, que relaciona as perdas de água com a quantidade de chuva

(QChu, mm):

$$ESup = x * (QChu - y) \quad \text{para } QChu > y \quad (7)$$

$$ESup = 0 \quad \text{para } QChu \leq y,$$

em que: os parâmetros empíricos y (mm) e x (%) significam, respectivamente, o valor limite de precipitação abaixo do qual não acontece escoamento superficial e a proporção de água escoada quando o valor limite de precipitação é superado (SILVA et al., 2006). Os valores desses parâmetros dependem da declividade, da textura, da porosidade e da rugosidade da superfície do solo.

Os dados climáticos utilizados pelo modelo foram medidos na estação climatológica da Embrapa Cerrados, incluíram precipitação diária (mm), radiação solar ($MJ m^{-2}$), velocidade média diária do vento ($m s^{-1}$), temperatura do ar máxima e mínima ($^{\circ}C$) e umidade relativa do ar (%). A evapotranspiração potencial ($mm dia^{-1}$) foi estimada pelo método tradicional de Penman (1948).

Resultados e Discussão

No ano em que foi conduzido o experimento, a estação chuvosa iniciou-se no mês de outubro, quando foram registrados 80,3 mm nos primeiros 20 dias e, em seguida, houve um veranico de 15 dias. Nos primeiros 13 dias após o plantio do milho (5 de novembro de 2001), foram registrados apenas 55 mm de chuva, contra 62 mm de evapotranspiração, caracterizando o primeiro período de déficit hídrico climático do ciclo das culturas. No início de dezembro, foram mais 13 dias com deficiência climática, quando choveu apenas 20 mm contra 70 mm de evapotranspiração para o mesmo período. A partir dessa data, as chuvas foram regulares e bem distribuídas, com exceção dos meses de março e abril, quando a oferta pluviométrica voltou a diminuir sensivelmente e dificultou o desenvolvimento do milheto semeado em 28 de março de 2002, que teve à sua disposição apenas 60,3 mm de chuva, com ocorrência de veranico superior a 15 dias, como mostra a Figura 1.

Para calibrar o modelo, primeiramente, foram ajustados os estádios de desenvolvimento do milho e do milheto. Posteriormente, procederam-se aos ajustes dos componentes que calculam o índice de área foliar das duas culturas, o balanço de água no solo, a matéria seca total e a produtividade de grãos.

Lista de Figuras

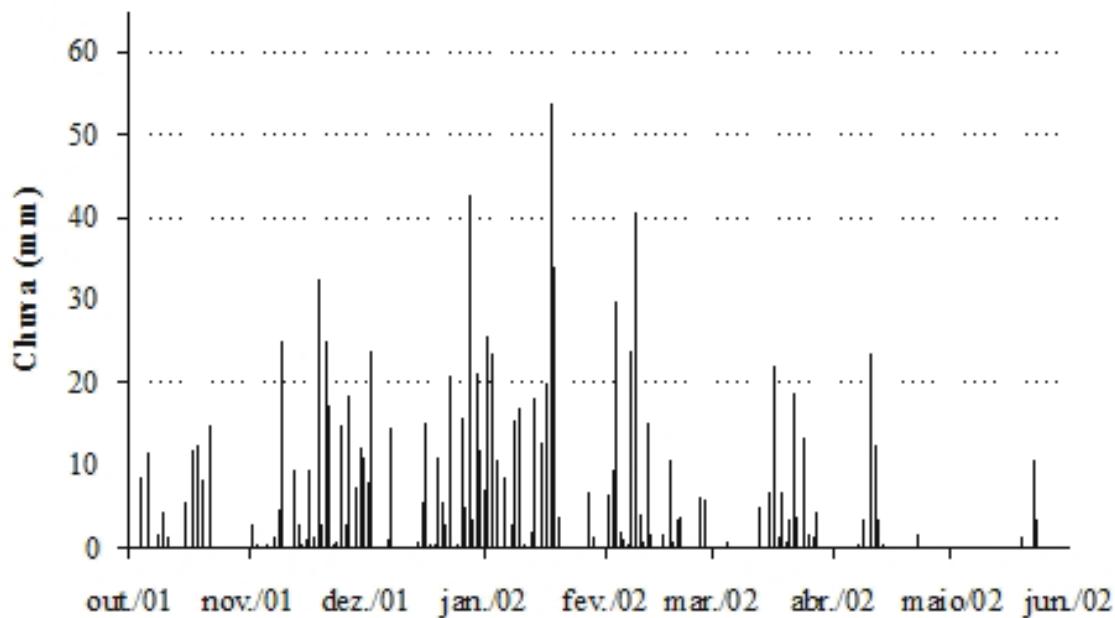


Figura 1. Distribuição da precipitação pluviométrica diária (mm) durante a estação chuvosa dos anos 2001/2002, na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF.

Os índices de área foliar máximo (IAFMax) simulados e observados foram ajustados a partir da calibração do parâmetro que representa a taxa de desenvolvimento máximo da área foliar (**dclaimax**), que variou entre $1,65 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $1,50 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, para o milho e milheto, respectivamente.

Nas Figuras 2abc e 3abc, tem-se a comparação entre os IAFs observados e os simulados pelo modelo para milho e em sequência milheto, nos sistemas de manejo convencional e plantio direto. Após a calibração, o modelo simulou bem o IAF ao longo do ciclo das culturas, com R^2 de 0,83 para milho e 0,81 para milheto.

Os valores simulados e observados da água disponível no solo, para as seis parcelas monitoradas (Figuras 4 e 5), mostram que, em virtude dos elevados índices pluviométricos que ocorreram nos meses de dezembro e janeiro, o conteúdo de água no solo permaneceu elevado durante esse período. Os decréscimos que aconteceram nos períodos de deficiência hídrica climática foram acompanhados pelo modelo, que, apesar de apresentar uma tendência para superestimar a disponibilidade de água no solo, apresentou capacidade preditiva satisfatória.

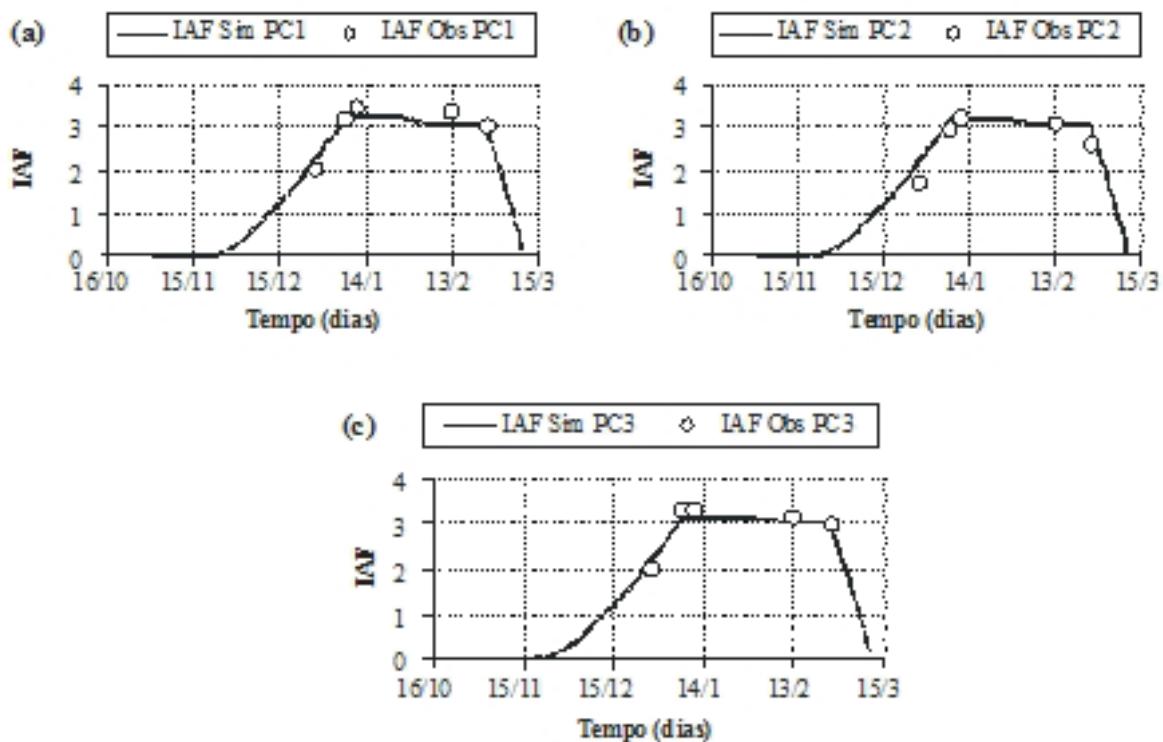


Figura 2. Índice de área foliar (IAF) observado e simulado pelo modelo STICS, para a cultura do milho, variedade Cargil 901, nas parcelas PC1 (a), PC2 (b) e PC3 (c), cultivadas no sistema de plantio convencional.

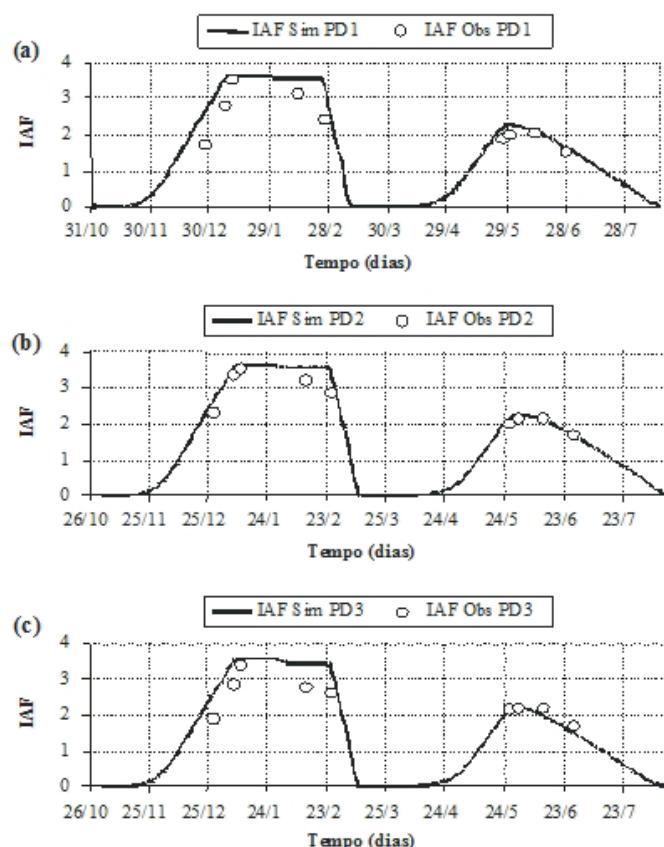


Figura 3. Índice de área foliar (IAF) observado e simulado pelo modelo STICS, para a sequência milheto após milho, nas parcelas cultivadas no sistema plantio direto: PD1 (a), PD2 (b) e PD3 (c).

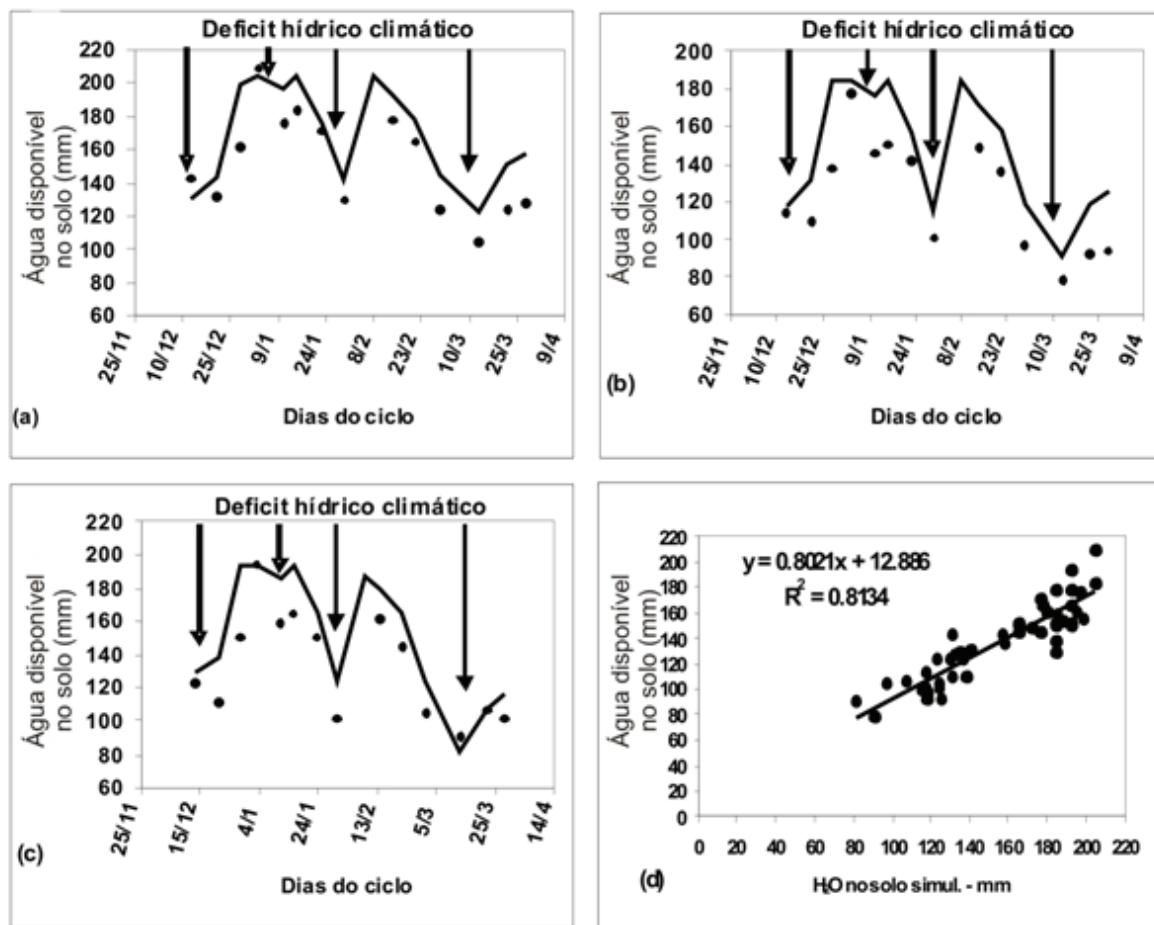


Figura 4. Comparação dos valores observados (•••) e simulados (—) da água disponível no solo (ADS - mm) até 180 cm de profundidade, durante o ciclo da cultura do milho, no sistema de plantio convencional PC1 (a), PC2 (b) e PC3 (c), e (d) análise de correlação linear com coeficiente de determinação R^2 e modelo de estimativa de água no solo $Y = f(x)$.

Isso pode ser comprovado nas Figuras 4 abc, que destacam os ajustes entre as disponibilidades de água no solo, medidas e simuladas nas parcelas do sistema convencional. A despeito das discrepâncias entre valores observados e simulados, a correlação linear entre os dados é considerada boa, apresentando coeficiente de determinação, R^2 , superior a 80%.

No sistema plantio direto, a correlação entre os dados de água disponível no solo observados e estimados com o modelo foi ligeiramente melhor (R^2 de 0,875) que no caso do plantio convencional (Figuras 5 abc).

A incorporação dos novos submodelos (Equações 1 a 7) que consideraram a influência dos resíduos (4000 kg ha⁻¹ de palhada de milheto) sobre o balanço hídrico melhorou a capacidade preditiva do modelo STICS para simular a disponibilidade de água no solo, tanto no sistema de plantio convencional (milho), confirmando resultados de trabalhos anteriores (AFFHOLDER et al., 2003), quanto no direto, com a sequência milho-milheto,.

Vale ressaltar que o modelo STICS é capaz de simular uma sequência de culturas na qual as saídas da cultura anterior, tais como palhada produzida e umidade remanescente no solo, são consideradas como entrada para a cultura subsequente, no caso o milheto.

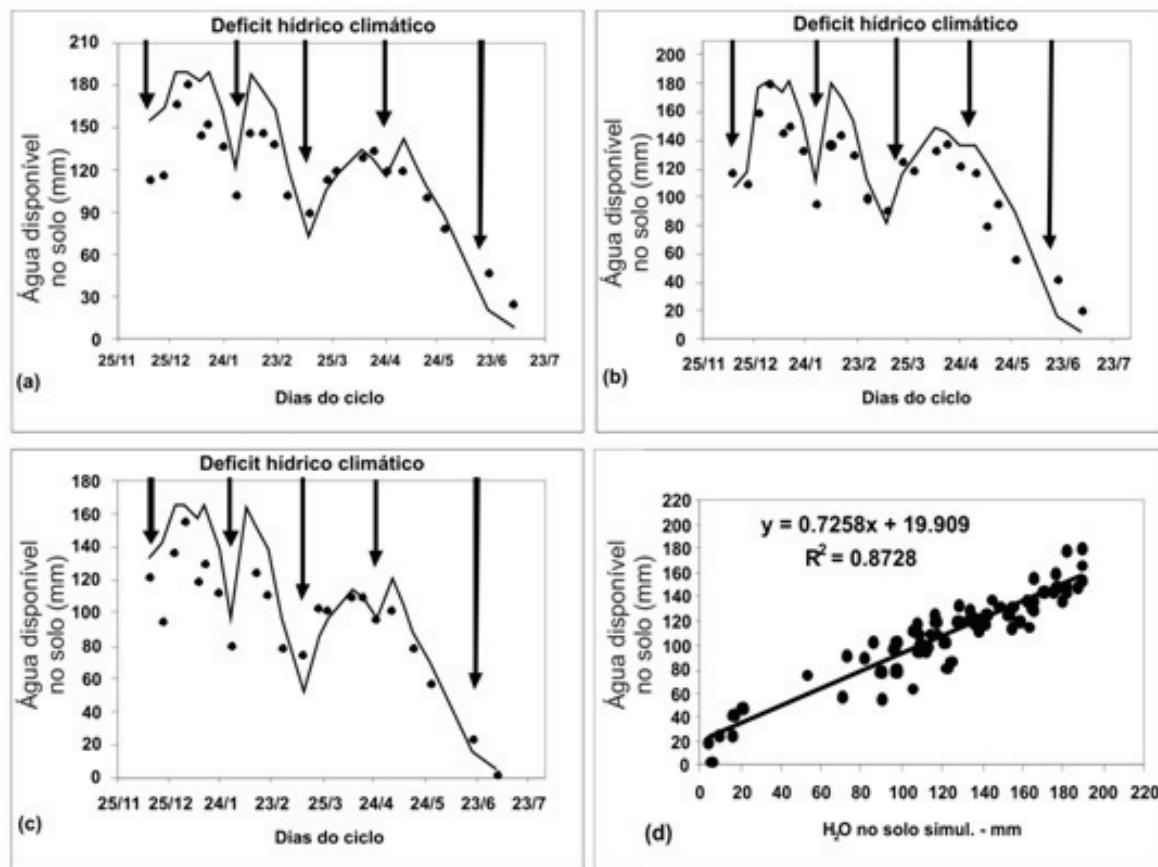


Figura 5. Comparação dos valores observados (••••) e simulados (—) da água disponível no solo no solo (ADS - mm) até 180 cm de profundidade, durante os ciclos das culturas do milho e do milheto, no sistema de plantio direto PD1 (a), PD2 (b) e PD3 (c), e (d) análise de correlação linear com coeficiente de determinação R^2 e modelo de estimativa de água no solo $Y = f(x)$.

Para quantificar os impactos da palhada sobre o balanço hídrico, usou-se o modelo já calibrado para estimar os principais termos do balanço hídrico nos sistemas de plantio convencional e direto, considerando-

se 4000 kg ha⁻¹ e 9000 kg ha⁻¹ de palhada de milheto e de milho, respectivamente, sobre a superfície do solo. Os resultados médios do balanço hídrico das duas culturas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores simulados da produção de grãos, da biomassa e dos termos do balanço hídrico das culturas do milho e do milheto nos sistemas de plantio convencional (PC1, PC2 e PC3) e direto (PD1, PD2 e PD3).

Balanço hídrico do milho									
Manejo	P (mm)	ES (mm)	EP (mm)	T (mm)	EsS (mm)	D (mm)	ADS (mm)	GR (t/ha)	BM (t/ha)
PC	920	235 (+22%)		327	127(+80%)	94	137	7,5	15,2
PD	920	182	32,8 (+16%)	392	25,7	205 (+54%)	82,5	8,4	16,9
Balanço hídrico do milheto									
PD	100,5	49	16	117	1	0	0	1,9	3,9

P = precipitação (mm); ES = evaporação da água do solo (mm); EP = evaporação da água da palhada (mm); T = transpiração da planta (mm); EsS = escoamento superficial (mm); D = drenagem (mm); ADS = água disponível no solo (mm) no final do ciclo da cultura; GR= produtividade de grãos (t/ha) e BM = Biomassa produzida (t/ha). Os números entre parêntesis significam as diferenças percentuais entre as variáveis do balanço hídrico, nos dois tipos de manejo.

De todas as mudanças impostas pela palhada sobre os componentes hídricos, pode-se afirmar que a principal, em termos absolutos, foi sobre o termo escoamento superficial. Em outros estudos (GILLEY et al., 1986 e SILVA et al., 2006) observaram que a palhada reduz significativamente o escoamento superficial. Porém, esses efeitos podem mudar em razão da quantidade e do tipo de palhada remanescente no solo. SCOPEL et al. (2004) relatam que o percentual de escoamento pode ser de 54%, 28% e 18% para o plantio convencional (sem palha), para o plantio direto, com 1.500 kg ha⁻¹ e plantio direto, com 4.500 kg ha⁻¹ de palha de milho sobre a superfície do solo, respectivamente.

Essa tendência também pode ser comprovada na Tabela 1, onde se observa que as perdas de água por escoamento superficial, neste estudo, foram superiores a 79%, quando comparadas com as do plantio direto. Esse fato repercutiu diretamente em maior infiltração e maior percolação de água nesse sistema de plantio. Por outro lado, no sistema plantio direto, foram observadas perdas importantes pela evaporação direta da água dos resíduos para a atmosfera (32,8 mm) sem fazer parte do sistema solo-planta e, pelo aumento substancial da drenagem (+54%), o que parece indicar que uma parte significativa da água infiltrada a mais, em relação ao plantio convencional, não ficou disponível para a transpiração da cultura.

A palhada também exerceu efeito importante sobre a evaporação da água do solo. Isso se deve ao fato de que ela limita a quantidade de radiação que chega à superfície do solo, principal fonte de energia responsável pelo processo de evaporação (SCOPEL et al., 2004). A Tabela 2 evidencia essas afirmações, pois revela que a evaporação da água do solo no sistema convencional foi 22% mais elevada do que a do sistema plantio direto.

Tabela 2. Diferença percentual (DIF - %) entre matéria seca total e produtividade de grãos (kg ha⁻¹) da cultura do milho, simulada pelo modelo STICS e observada nas parcelas experimentais dos sistemas de plantio convencional (PC1, PC2 e PC3) e direto (PD1, PD2 e PD3).

Manejo	Matéria seca total (kg ha ⁻¹)			Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)					
	Milho		DIF (%)	Milheto		Milho			
	Observada	Simulada		Observada	Simulada				
PC1	15700	14800	5,7		7600	7400	2,6		
PC2	14500	15400	6,2		7200	7600	5,6		
PC3	16000	15300	4,4		8200	7500	8,5		
PD1	16100	17000	5,6	3300	3800	15,2	8200	8500	3,7
PD2	18400	17200	6,5	4700	4000	14,9	9400	8500	9,6
PD3	15100	16600	9,9	3600	3500	2,8	7500	8200	9,3

O total da evaporação da água do solo e da palhada durante o ciclo do milho, em plantio direto, foi de 214,8 mm, enquanto, no sistema convencional, foi de 235 mm. Portanto, o sistema de plantio direto permite disponibilizar mais água não somente com a redução do escoamento superficial, mas também com a redução da evaporação total, mesmo que seja em menor proporção. Logo, deduz-se que o plantio direto apresentou vantagens sobre o convencional, pois, naquele sistema, houve menor escoamento superficial e evaporação da água do solo; por conseguinte, esses ganhos superaram as perdas por drenagem, de tal forma que houve maior disponibilidade de água para a cultura do milho nos períodos secos observados durante o ciclo (Figura 5). Isso pode ser comprovado pela maior transpiração do milho (16,4%) no plantio direto em relação ao sistema convencional (Tabela 1).

Os 65 milímetros a mais de água transpirada pela cultura do milho, no plantio, direto advêm, certamente, da maior quantidade de água armazenada no solo por esse sistema, que, de certa forma, proporcionou melhor desenvolvimento da área foliar das plantas. Ou seja, as plantas sob esse sistema foram beneficiadas nos períodos de déficits hídricos que aconteceram durante o ciclo, conforme já destacado anteriormente, nas Figuras 4 e 5.

Os IAFs observados no plantio convencional foram, em média, 6% mais baixos em relação aos do plantio direto. Logo, conclui-se que esse sistema pode favorecer os cultivos durante os eventuais veranicos que acontecem com frequência no Cerrado, principalmente, nos meses de janeiro e fevereiro. Esses efeitos podem variar em virtude do tipo e da quantidade da palhada remanescente na superfície do solo.

Observou-se que, apesar da maior quantidade de água disponível no solo no sistema de plantio direto ao longo do ciclo das culturas, as quantidades de água disponíveis no solo nesse sistema foram inferiores à do sistema convencional, no final do ciclo do milho, e não beneficiaram o cultivo de milheto, que serve para produzir a palhada do ano agrícola seguinte. Isso pode ser explicado pelos maiores índices de área foliar e de transpiração observados para o milho no plantio direto, além da presença mais intensa de invasoras observadas nesse sistema.

O ajuste entre os dados observados e os simulados da matéria seca total do milho e do milheto (Tabela 2) foi feito em função da calibração dos parâmetros do modelo relacionados com a eficiência do uso da radiação (**efcroiveg**) e com a alocação de fotoassimilados para o grão (**efcroirepro**). Neste estudo, os valores ajustados desses parâmetros foram: 2,9 g MJ⁻¹ e 2,6 g MJ⁻¹ para o milho e 3,0 g MJ⁻¹ e 2,8 g MJ⁻¹ para o milheto, respectivamente.

Analizando a Tabela 2, observa-se que a diferença entre a fitomassa total observada e simulada para a cultura do milho variou entre 4,4 % e 9,9 %. Já para o milheto, o desempenho do modelo não foi o mesmo, pois a diferença percentual variou entre 2,8% e 15% nas parcelas analisadas. Mesmo assim, pode-se afirmar que o modelo simulou satisfatoriamente a fitomassa total das duas culturas.

A maior diferença percentual da produtividade de grãos simulada em relação à observada foi de 9,6%, enquanto a menor foi de 2,6%, que podem ser atribuídas à variabilidade espacial dos dados experimentais ou a erros de medição. Portanto, conclui-se que o modelo também simulou satisfatoriamente a produtividade de grãos.

A maior quantidade de água disponível e, principalmente, os maiores índices de área foliar observados para o milho, no plantio direto, podem ter resultado em maior rendimento de grãos, 8.400 kg ha⁻¹, em média, contra 7.500 kg ha⁻¹ do plantio convencional.

Portanto, o modelo STICS se apresenta como uma ferramenta adaptada para suprir a necessidade de simular o rendimento de milho em sistema plantio direto, confirmando os primeiros trabalhos realizados por Affholder et al. (2003). Por consequência, ele pode ajudar no processo de tomada de decisão pelos agricultores e dirigentes de organismos encarregados do desenvolvimento da política agrícola nacional.

Conclusões

O modelo STICS, com o ajuste e calibração do módulo balanço hídrico, permite concluir que:

1. Estima de forma satisfatória o índice de área foliar (IAF), a produção de grãos e a matéria seca total das culturas do milho e do milheto, cultivadas em sequência.

2. Mesmo apresentando ligeira tendência de superestimar a água no solo, o STICS simula de forma satisfatória a água disponível no solo nos dois sistemas de plantio estudados.

3. O STICS simula satisfatoriamente bem o crescimento e o desenvolvimento de forma sequencial e isolada das culturas do milho e do milheto, nos dois sistemas de plantio estudados.

4. O sistema plantio direto apresenta vantagens sobre o convencional, no que diz respeito à melhor conservação de água, uma vez que existe menos escoamento superficial e evaporação da água do solo, com maior disponibilização de água para as culturas do milho e do milheto.

5. O modelo STICS se apresenta como uma ferramenta adaptada para simular o rendimento do milho e avaliar as modificações impostas pela palhada ao balanço hídrico da cultura, em plantio direto, nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro.

Referências

AFFHOLDER, F.; SCOPEL, E.; MADEIRA NETO, J.; CAPILLON, A. Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Agronomie*, Paris, v. 23, p. 305-325, 2003.

BRISSON, N.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; JEUFFROY, M. H.; RUGET, F.; NICOUAUD, B.; GATE, P.; DEVIENNE-BARRET, F.; ANTONIOLETTI, R.; DURR, C.; RICHARD, G.; BEAUDOIN, N.; RECOUS, S.; TAYOT, X.; PLENET, D.; CELLIER, P.; MACHET, J. M.; MAYNARD, J. M.; DELÉCOLLE, R. STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I, Theory and parameterization applied to wheat and corn, *Agronomie*, Paris, v. 18, p. 311-346, 1998.

- DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; ÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil** : Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: GTZ; Londrina : IAPAR, 1990. 268 p.
- GILLEY, J. E.; FINKNER, S. C.; SPOMER, R. G.; MIELKE, L. N. Runoff and erosion as affected by corn residue. II. Rill and interrill components. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 29, p. 161-164, 1986.
- LAL, R. Mulching effects on runoff, soil erosion and crop response on alfisols in western Nigeria. **Journal of Sustainable Agriculture**, Binghamton, v. 11, p. 135-154, 1998.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**. London, Serie A, v. 193, p. 120-146, 1948.
- SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. **Sistema plantio direto**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998. 248 p. (Coleção 500 Perguntas 500 Respostas).
- SATURNINO, H. M. Evolução do plantio direto e as perspectivas nos cerrados. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 5-12, jan./fev. 2001.
- SCOPEL, E.; BERTRAND, M.; ARREOLA-TOSTADO, J. M.; CHÁVEZ-GUERRA, E.; MARAUX, F. Quantifying and modeling the effects of a light crop residue mulch on the water balance : an application to rainfed maize in western Mexico. In: CONGRES MONDIAL DE SCIENCE DU SOL = WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE = BODENKUNDLICHER WELTKONGRESS-CONGRESO MUNDIAL DE LA CIENCIA DEL SUELO, 16., 1998, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: [ISSS:AISS:IBS:SICS], 1998. 1 CD ROM.
- SCOPEL, E.; SILVA, F. A. M. da; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F.; MARAUX, F. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid e humid tropical conditions. **Agronomie**, Paris, v. 24, p. 383-395, 2004.
- SILVA, F. A. M. da; PINTO, H. S.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e soja utilizadas em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 717-724, 2006.