

SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA SOJA EM TRÊS TIPOS DE SOLO COM O MODELO AQUACROP

PIEKARSKI K.R.¹; SOUZA J.L.M.²; JERSZURKI D.³; TSUKAHARA R.Y.⁴; OLIVEIRA C.T.¹

¹Mestrado em Ciência do Solo, UFPR, e-mail:krpkarla@gmail.com; ²Professor, UFPR; ³Doutorado em Ciência do Solo, UFPR; ⁴Fundação ABC.

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho verificar o desempenho do modelo AquaCrop em simulações de produtividade da soja em experimentos conduzidos sobre três tipos de solo, na região dos Campos Gerais. As análises foram realizadas com dados de 24 experimentos previamente realizados em campos da Fundação ABC – Pesquisa e Desenvolvimento Agropecuário, dos anos safra de 2006 a 2014, nos municípios de Castro, Itaberá e Ponta Grossa, Estados do Paraná e São Paulo. As simulações foram realizadas com o uso de dados referentes ao clima, solo, cultura e manejo para cada localidade estudada. Dentre os resultados obtidos, destaca-se a produtividade estimada da soja, utilizada para a verificação do desempenho do modelo. As produtividades real e estimada foram ajustadas em análises de regressão linear simples, e comparadas considerando o erro absoluto médio, índice “*d*” de concordância e índice “*c*” de desempenho. O modelo AquaCrop respondeu positivamente quanto a simulação da produtividade de soja nos municípios de Castro-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR, tendo aproximadamente 92% de desempenhos satisfatórios. Observou-se a necessidade de calibração nos coeficientes que penalizam a produtividade potencial, quando a produtividade de soja é próxima ou inferior a 2500 kg ha⁻¹. O melhor desempenho foi verificado nas simulações de experimentos sobre Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilo-arenosa.

Palavras-chave: cultivo agrícola, modelo, estimativa, rendimento.

INTRODUÇÃO

Os modelos computacionais tem se tornado importantes ferramentas na agricultura nas últimas décadas, especialmente nos países de agricultura altamente tecnificada. Dentre os *softwares* que trouxeram grandes vantagens à produção agrícola estão os modelos matemáticos de simulação de produção, contribuindo para a prática da agricultura de precisão e promovendo aumento significativo da produtividade de diversas culturas ao redor do mundo (WHISLER et al., 1986; PESSOA et al., 1997). A principal vantagem da simulação de produtividade é a possibilidade de previsão do desenvolvimento da cultura antes da implantação da safra. Desta forma, é possível reunir técnicas e insumos mais adequados. Além disso, os modelos de simulação de produtividade são importantes e muito difundidos na área da pesquisa, pois permitem a realização de experimentos em diversos cenários. Isso traz muitos benefícios, como a redução de custo de implantação, mão de obra, tempo e permite a realização de testes sequenciais (WHISLER et al., 1986; SENTELHAS et al., 2001; TOJOSOLER et al., 2001; MELLO & CAIMI, 2008).

Nesse sentido, a *Food and Agriculture Organization* (FAO) desenvolveu o AquaCrop, um *software* de simulação agrícola considerado simples, abrangente e preciso. O modelo foi gerado a partir do estudo e simplificações das relações que regem os processos e fluxo de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera. Desta forma, o modelo necessita de menor número de variáveis facilmente medidas, facilitando sua utilização (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009).

O AquaCrop estima a produtividade a partir da biomassa produzida pela planta, empregando um fator de conversão denominado “índice de colheita”. A biomassa é estimada a partir da transpiração real da cultura e de um parâmetro de produção por área e demanda hídrica, denominado “parâmetro de produção por água” (RAES et al., 2012).

Ao contrário de modelos mais difundidos, o AquaCrop segmenta a evapotranspiração em transpiração da cultura e evaporação do solo. Desta forma, o programa considera apenas a água transpirada, contribuindo para o aporte de matéria à planta, aproximando a simulação da realidade. Outra particularidade está na simulação do crescimento vegetal a partir da expansão do dossel, pois aprimora a apuração da taxa fotossintética da planta, por considerar a radiação solar incidente apenas nas folhas que não estão sombreadas (STEDUTO et al., 2008; RAES et al., 2012).

Resultados satisfatórios obtidos em diversos exemplos de validação e simulações com o modelo AquaCrop evidenciam sua precisão, robustez e abrangência: Iqbal et al. (2014) avaliou a produção de trigo submetido ao déficit hídrico no Norte da China; Abedinpour et al. (2012) testou o cultivo de milho sob diferentes doses de fertilização no semiárido dos EUA; Mkhabela e Bullock (2012) avaliou a produção de trigo em diferentes disponibilidades de água no Oeste do Canadá; e, Geerts et al. (2009) testou o cultivo de quinoa sob diferentes lâminas de irrigação no Altiplano Boliviano. Apesar disso, são poucos os estudos envolvendo o uso do AquaCrop em cenários brasileiros.

Nesse sentido, baseando-se nos resultados promissores do modelo e visando a disseminação de seu uso no Brasil, teve-se por objetivo no presente trabalho verificar o desempenho do modelo AquaCrop em simulações de produtividade da soja em experimentos conduzidos sobre três tipos de solo, na região dos Campos Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

O desempenho do modelo AquaCrop na simulação da produtividade de soja foi obtida a partir da comparação entre a produtividade real de 24 experimentos previamente realizados e valores de produtividades estimadas com o modelo. Os experimentos foram realizados nos campos experimentais da Fundação ABC, nas safras 2006/07 a 2013/14, nos municípios de Castro-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR (TABELA 1), relevo plano a suave ondulado e em sistema de plantio direto, em sistema de rotação (soja e milho no verão e trigo e aveia preta no inverno). A textura do solo foi determinada conforme Embrapa (1997).

TABELA 1. Caracterização edafoclimática das estações experimentais da Fundação ABC, nos municípios de Castro, Itaberá e Ponta Grossa.

Município	Estado	Classificação de solo	Textura do solo	Clima ¹	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Argiloso/ Muito argiloso	Cfb	-24,85°	-49,93°	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Argiloso/ Muito argiloso	Cfa	-24,07°	-49,15°	735
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Argilo-arenoso	Cfb	-25,01°	-50,15°	1000

¹Adaptado de Álvares et al. (2013).

As variáveis obtidas e utilizadas nas simulações foram: temperaturas mínima e máxima diárias do ar (T , °C), precipitação pluviométrica diária (P , mm dia⁻¹), evapotranspiração de referência (ET_o , mm dia⁻¹), concentração de CO₂ média anual na atmosfera (C_{CO_2} , ppm), conteúdo volumétrico de água do solo na saturação (θ_{SAT} , m³ m⁻³), umidade na capacidade de campo (θ_{CC} , m³ m⁻³), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} , m³ m⁻³), condutividade hidráulica saturada do solo (K_{SAT} , mm dia⁻¹), conteúdo volumétrico de água no solo no momento do plantio (θ_i , m³ m⁻³), data do plantio, duração dos ciclos fenológicos da cultura (dia), população de plantas (plantas ha⁻¹), comprimento efetivo das raízes (cm), ausência de irrigação, fertilização próxima ao ideal e presença de cobertura orgânica cobrindo 70% do solo.

Os dados de temperatura e precipitação foram provenientes de estações agrometeorológicas anexas aos campos experimentais da Fundação ABC. A evapotranspiração de referência foi estimada conforme Allen et al. (1998), com o método de Penman-Monteith FAO. A concentração de CO₂ na atmosfera está embutida no AquaCrop, sendo obtida a partir de aferições do observatório de Mauna Loa, Havaí (RAES et al., 2009).

Os dados de solo foram provenientes das análises realizadas para os campos experimentais da Fundação ABC, nas profundidades 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. Ao todo, foram retiradas cinco amostras indeformadas de solo por parcela experimental (100 m x 50 m) e por profundidade, totalizando 45 amostras. A umidade na capacidade de campo (m³ m⁻³) e a condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹) foram determinadas conforme Embrapa (1997). A umidade na capacidade de campo (m³ m⁻³) foi determinada em mesa de tensão, na tensão de 0,01 MPa. A condutividade hidráulica saturada (mm dia⁻¹) foi determinada em permeâmetro de carga constante. A umidade no ponto de murcha permanente (m³ m⁻³) foi estimado considerando tensão de 1,5 MPa na curva de retenção de água no solo, gerada a partir dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), estimados com o

software SPLINTEX. O conteúdo de água no momento do plantio ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi estimado a partir do balanço hídrico do solo, em planilha desenvolvida para esta finalidade.

As produtividades reais (kg ha^{-1}) e estimadas (kg ha^{-1}) com o AquaCrop foram ajustadas em análises de regressão linear simples, e comparadas considerando o erro absoluto (*EA*) e índice “*d*” de concordância (Willmott et al., 1985). O desempenho do modelo foi obtido conforme o índice “*c*” de Camargo e Sentelhas (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas simulações da produtividade de soja foram bastante promissores na região dos Campos Gerais, visto que todas as simulações apresentaram desempenho entre “mediano” e “ótimo” (TABELA 2). O melhor desempenho, conceituado entre “muito bom” a “ótimo”, foi verificado no município de Ponta Grossa, para o solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico.

As simulações que apresentaram piores desempenhos (conceito “mediano”) ocorreram nos municípios de Castro e Itaberá, onde os solos foram classificados como Cambissolo Háptico distrófico típico e Planossolo Háptico distrófico típico, respectivamente. Os maiores erros absolutos ocorreram no município de Itaberá, com valores de até 857,91 kg ha^{-1} . RAES et al., (2012) consideram que erros de até 500 kg ha^{-1} para a cultura da soja são considerados aceitáveis em simulações com modelos matemáticos.

TABELA 2. Desempenho da simulação da produtividade de soja nos municípios de Castro-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR.

Local	Solo	Safra	EA (kg ha ⁻¹)	"d"	"c"	Desempenho
Castro	CXbd	2013/14	32,08	0,99	0,87	Ótimo
Castro	CXbd	2012/13	625,03	0,71	0,62	Mediano
Castro	CXbd	2012/13	569,40	0,77	0,68	Bom
Castro	CXbd	2012/13	70,93	0,97	0,86	Ótimo
Castro	CXbd	2012/13	68,28	0,98	0,86	Ótimo
Castro	CXbd	2011/12	9,60	1,00	0,88	Ótimo
Castro	CXbd	2011/12	2,50	0,84	0,74	Bom
Castro	CXbd	2011/12	125,15	0,90	0,79	Muito bom
Castro	CXbd	2011/12	41,88	0,90	0,79	Muito bom
Castro	CXbd	2010/11	25,50	0,99	0,87	Ótimo
Castro	CXbd	2010/11	61,20	0,91	0,80	Muito bom
Castro	CXbd	2010/11	87,43	0,83	0,73	Bom
Castro	CXbd	2010/11	103,16	0,94	0,83	Muito bom
Castro	CXbd	2007/08	51,85	0,99	0,87	Ótimo
Itaberá	SXd	2013/14	95,27	0,96	0,87	Ótimo
Itaberá	SXd	2013/14	761,83	0,69	0,63	Mediano
Itaberá	SXd	2013/14	857,91	0,74	0,67	Bom
Itaberá	SXd	2013/14	227,65	1,00	0,91	Ótimo
Itaberá	SXd	2012/13	123,68	0,97	0,89	Ótimo
Itaberá	SXd	2011/12	152,35	1,00	0,90	Ótimo
Ponta Grossa	LVAd	2012/13	287,23	0,82	0,82	Muito bom
Ponta Grossa	LVAd	2011/12	111,23	0,99	0,98	Ótimo
Ponta Grossa	LVAd	2010/11	125,40	0,98	0,97	Ótimo
Ponta Grossa	LVAd	2006/07	34,32	0,99	0,99	Ótimo

Em geral, observou-se os maiores erros nas safras de baixa produtividade (próxima a 2500 kg ha⁻¹), principalmente nos municípios de Castro e Itaberá (FIGURA 1). Em Castro os maiores erros ocorreram em dois experimentos da safra 2012/13. O erro provavelmente se deve ao adiantamento no plantio, que ocorreram em 21 e 26/11/2012. Nos dias subsequentes ao período de emergência das plantas, observaram-se temperaturas máximas superiores à 30 °C, a qual é considerada limite superior ao desenvolvimento da soja por Raes et al. (2009). Nos demais experimentos não foram observadas temperaturas acima do limite superior e a produtividade foi próxima a 4000 kg ha⁻¹. Segundo Ferreira et al. (2007), temperaturas acima do limite superior, a partir de 1°C, são capazes de causar alterações na conversão entre biomassa em produtividade em qualquer ciclo fenológico da cultura da soja. Portanto, para a redução do erro absoluto o valor do índice de colheita do modelo deveria ser atenuado nas safras de baixa produtividade de soja, mantendo um valor ideal de referência nas demais safras, para a região dos Campos Gerais. Durante a calibração do AquaCrop para a cultura da soja no norte da China, Paredes et al. (2015) ajustou o valor do índice de colheita de referência de 0,40 para 0,38, evidenciando que mesmo em condições ideais a conversão de biomassa em produtividade pode variar. No entanto, o valor de referência fixado pelos autores devem ser testados em futuros trabalhos, a partir do desempenho das simulações com o AquaCrop, em situações de temperatura atmosférica fora dos limites basais.

Nos experimentos com baixas produtividades em Itaberá, verificaram-se períodos de estiagem prolongados. Couto et al. (1986) afirmam que o déficit hídrico causa quedas de produção no cultivo de soja em todos os estádios de desenvolvimento da cultura, e dependem da intensidade e duração dos períodos secos. Portanto, verificou-se que, provavelmente, o AquaCrop subestima o efeito do estresse hídrico na cultura da soja.

Verificou-se que os menores erros ocorreram no município de Ponta Grossa. Os maiores erros ocorreram na safra 2012/13, em que foram observados períodos consideráveis de estiagem, que podem ter contribuído para a queda de produtividade. Apesar do maior erro se dar na safra de menor produtividade, o erro é relativamente menor comparado aos demais municípios. Observou-se superioridade no desempenho do AquaCrop em Ponta Grossa, mesmo na safra em que a produtividade foi próxima a 2500 kg ha⁻¹. Tendo em vista que os fatores que causam as baixas produtividades afetaram a cultura com severidade semelhante nos três municípios, acredita-se que a superioridade no desempenho está relacionada com as condições físico-hídricas do solo de Ponta Grossa. Provavelmente, o modo como o modelo simula o balanço hídrico no Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilo-arenosa é mais preciso.

Os resultados obtidos sugerem que o AquaCrop subestima fatores relacionados a queda de produtividade da soja. Acredita-se também que existam fatores relacionados aos atributos físico-hídricos do solo que podem alterar a eficiência das simulações, destacando a necessidade de calibração dos coeficientes relacionados ao estresse hídrico e térmico que penalizam a produtividade potencial da cultura. Além disso, são necessários mais estudos relacionados à calibração do índice de colheita de referência e ao uso do AquaCrop em solos com diferentes características físico-hídricas.

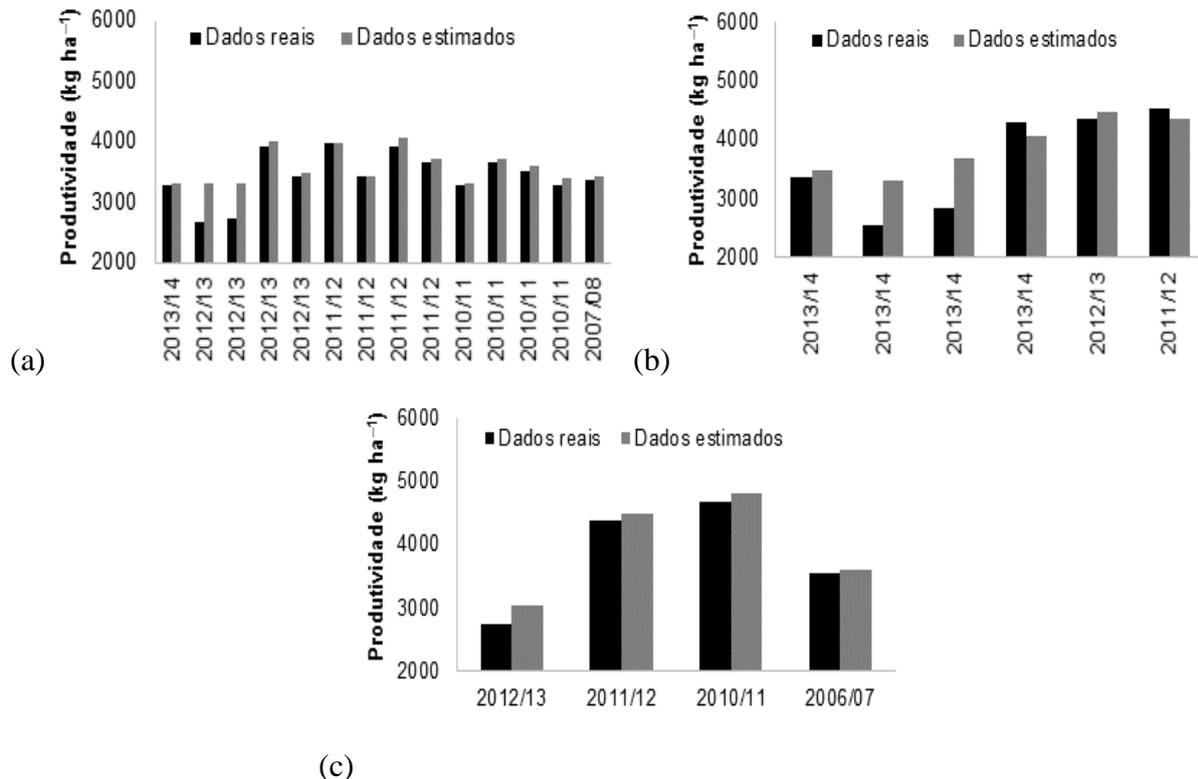


FIGURA 1 – Produtividade média real e estimada com o AquaCrop para cultura da soja, nos municípios de: (a) Castro-PR, (b) Itaberá-SP e (c) Ponta Grossa-PR.

Apesar dos erros absolutos superiores aos limites considerados aceitáveis, observou-se coeficiente de determinação superior a 0,83 entre a produtividade média real e simulada com o AquaCrop (FIGURA 2). O resultado indicou a necessidade de calibração do AquaCrop, principalmente no que se refere aos fatores que penalizam a produtividade potencial e à influência dos atributos físico-hídricos dos solos no balanço hídrico. Provavelmente, o ajuste do modelo para estas condições específicas aumentará significativamente sua eficiência. Contudo, as associações obtidas (produtividade real vs produtividade estimada) foram satisfatórias.

Em levantamento da frequência dos desempenhos das simulações com o AquaCrop, observou-se predominância de 54,17% para o desempenho “ótimo”. Em torno de 92% dos resultados apresentaram desempenho satisfatório (“bom” a “ótimo”) e nenhuma simulação teve desempenho “mau” ou “péssimo”. Os resultados são promissores e indicam que o AquaCrop tem elevado potencial para ser validado para a cultura da soja na região dos Campos Gerais.

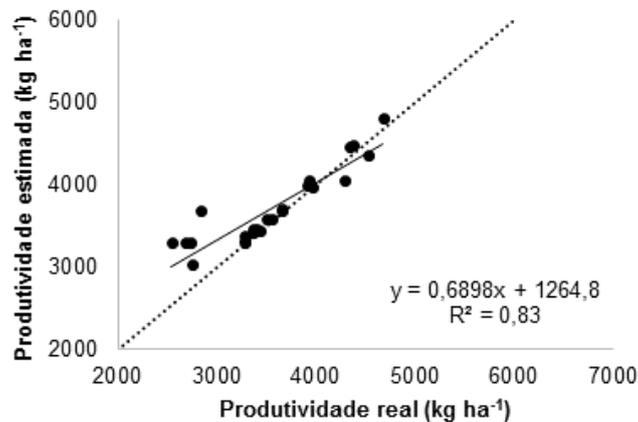


FIGURA 2 –Análise de regressão linear entre a produtividade média real e estimada com o AquaCrop para soja, nos municípios de Castro-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR.

CONCLUSÕES

O modelo AquaCrop respondeu positivamente ao que se esperava quanto a simulação da produtividade de soja nos municípios de Castro-PR, Itaberá-SP e Ponta Grossa-PR, tendo aproximadamente 92% de desempenhos satisfatórios.

A calibração dos coeficientes que penalizam a produtividade potencial é quando a produtividade de soja for próxima ou inferior a 2500 kg ha⁻¹.

O melhor desempenho nas estimativas de produtividade com o AquaCrop foi verificado nas simulações de experimentos sobre Latossolo Vermelho distrófico típico, de textura argilo-arenosa.

LITERATURA CITADA

ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T.B.S.; SINGH, M.; PATHAK, H. & AHMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110:55-66, 2012.

ALLEN, R.G.; PEREIRA L.S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper n.56*. Roma, FAO, 1998. 300p.

ÁLVARES C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. & SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *MeteorologischeZeitschrift*, 22:711-728, 2013.

CAMARGO, A.P. & SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5:89-97, 1997.

COUTO, L.; COSTA, E.F. & VIANA, R.T. Efeito do veranico sobre a produção de cultivares de milho. In: *Relatório técnico anual do centro nacional de pesquisa de milho e sorgo*. Sete Lagoas, EMBRAPA-CNPMS, 1986. 78p.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J.A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O.; MAMANI, J.; MORALES, B.; OSCO, V. & STEDUTO, P. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101:498-508, 2009.

FERREIRA, W.P.M.; COSTA, L.C. & SOUZA, C.F. Modelo de estimativa da produtividade de soja {Glicinimax (L.) merril} em função da variabilidade da temperatura. *Engenharia de Agricultura*, 15:400-407, 2007.

IQBAL, M.A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; PENAS, A. & RIO, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135:61-72, 2014.

MELLO, A. & CAIMI, L.L. Simulação na validação de sistemas computacionais para agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:666-675, 2008.

MKHABELA, M.S. & BULLOCK, P.R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110:16-24, 2012.

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B. & PEREIRA, L.S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agricultural Water Management*. 152:57-71, 2015.

PESSOA, M.C.P.Y.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; FERNANDES, E.N. & LIMA, M.A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. *Jaguariúna, EMBRAPA-CNPMA*, 1997. 83p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. & FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 1. Roma, FAO, 2009. 10p.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. & FERERES, E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3. Roma, FAO, 2012. 125p.

SENTELHAS, P.C.; FARIA, R.T.; CHAVES, M.O. & HOOGENBOOM, G. Avaliação dos geradores de dados meteorológicos WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais brasileiras, usando modelos de simulação de culturas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9:357-376, 2001.

STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; HEN, L.; IZZI, G. & HOOGEVEEN, J. AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes*, 80:285-292, 2008.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426-437, 2009.

TOJO-SOLER, C.; FOLEGATTI, M.V. & FARIA, R.T. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha” e determinação de práticas adequadas de manejo em condições de risco climático. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9:339-346, 2001.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892–898, 1980.

WHISLER, F.D.; ACOCK, B.; BAKER, D.N.; FYE, R.E.; HODGES, H.F.; LAMBERT, J.R.; LEMMON, H.E.; MCKINION, J.M. & REDDY, V.R. Crop simulation models in agronomic systems. *Advanced Agronomy*, 40:141-208, 1986.

WILLMOTT CJ, ACKLESON SG, DAVIS JJ, FEDDEMA KM, KLINK DR. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90:8995-9005, 1985.