

CALIBRAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO TRIGO EM CASTRO-PR.

ROSA, S.L.K.¹; SOUZA J.L.M.²; TSUKAHARA, R.Y.³; CRUZ, J. B. C.¹; JERSZURKI, D.⁴

¹Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFPR; ²Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ³Fundação ABC; ⁴University of the Negev

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar o modelo AquaCrop-FAO para duas cultivares de trigo, no município de Castro, Estado do Paraná. Foram calibrados os parâmetros do modelo para as cultivares de trigo Quartzo e Supera, no período de 08 anos, com dados de produtividade, referente as safras 2007 a 2014. Os dados de entrada no AquaCrop, referente à clima, cultura, solo e manejo do solo, foram obtidos do banco de dados da Fundação ABC e provenientes da literatura. Aleatoriamente, entre 35% a 40% do total das safras foram selecionadas para a calibração. A calibração foi realizada para os parâmetros mais sensíveis à penalização da produtividade potencial da cultura. As produtividades simuladas foram comparadas com as observadas a campo por meio de análises de regressão linear simples, erros absolutos (Ea) e relativos (Er), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância (d) e desempenho (c). A calibração apresentou resultados excelentes, com os índices de concordância " d " = 1 para as duas cultivares.

Palavras-chave: Modelagem matemática, *Triticum aestivum*, produtividade.

INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é amplamente cultivado em todo o mundo, sendo o terceiro cereal de maior importância econômica mundial (Gooding, 2009). A utilização de cultivares de trigo de alto potencial produtivo, associado às condições edafoclimáticas brasileiras, favorecem altos rendimentos e expansão da cultura no país (Buzetti e Teixeira, 2014). No Estado do Paraná, é a cultura de inverno mais importante, atingindo cerca de 1,081 milhão de hectares de área plantada na safra 2015/2016, com produção de 3,3 milhões de toneladas (CONAB, 2017).

O entendimento do sistema solo-planta-atmosfera por meio da modelagem, vem sendo cada vez mais importante para os pesquisadores (Jin et al., 2014). O AquaCrop é um modelo de simulação que vem sendo muito utilizado e descreve a interação entre o solo e as plantas (Raes, 2017a), buscando alcançar equilíbrio entre precisão, simplicidade e robustez. O modelo é capaz de simular com exatidão a formação de biomassa e o rendimento da cultura em diferentes condições hídricas e de fertilidade (Jin et al., 2014).

Para aumentar a confiança de um modelo e obter o máximo da sua potencialidade, os parâmetros devem ser submetidos ao processo de calibração (Angulo et al., 2013). A calibração consiste em ajustar o valor dos parâmetros de entrada, de maneira individual, para que os resultados simulados do programa se assemelhem ao máximo aos observados a campo.

O modelo AquaCrop já foi calibrado e validado para diversas culturas e locais (Geerts et al., 2009; Salemi et al., 2011; Maniruzzaman et al., 2015; Mohammadi et al., 2016; Mirsafii et al., 2016) e sua precisão foi amplamente confirmada.

Considerando o potencial de contribuição do modelo AquaCrop, teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar o modelo AquaCrop-FAO para duas cultivares de trigo (Quartzo e Supera) no município de Castro, Estado do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado considerando o município de Castro, Estado do Paraná. A calibração foi realizada para as cultivares de trigo Quartzo e Supera, no período de 08 anos, com dados de clima e cultura referente às safras de 2007 a 2014.

Todas as parcelas experimentais avaliadas apresentam relevo plano a suave ondulado, e o manejo adotado nas áreas é o plantio direto com cobertura vegetal residual.

Dados de entrada inseridos no modelo AquaCrop

Os dados referentes ao clima, cultura e manejo do solo foram provenientes do banco de dados da Fundação ABC, e os dados de solo obtidos na literatura.

Os dados de clima inserido no AquaCrop foram provenientes da estação agrometeorológica instalada em Castro. Foram inseridos dados diários referentes à:

precipitação diária (P ; mm); temperatura máxima (T_x ; °C), mínima (T_n ; °C) e média (°C) diárias do ar; radiação solar incidente (R_s ; MJ m⁻² dia⁻¹); umidade relativa do ar (UR ; %); e, velocidade do vento (u_2 ; m s⁻¹). O AquaCrop Versão 6.0 dispõe internamente dos valores de concentração de CO₂ da atmosfera (ppm) e calcula automaticamente a evapotranspiração de referência (ET_0 ; mm dia⁻¹) com o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Os dados da cultura referem-se à população de plantas (número de plantas ha⁻¹), data de plantio, data de colheita e duração do ciclo fenológico, considerados em dias. As datas referentes aos estádios fenológicos foram estabelecidas no momento em que as cultivares atingiram os códigos decimais da escala de Zadoks et al. (1974), conforme Tabela 1, os quais foram determinados no acompanhamento das safras, pela Fundação ABC.

Tabela 1 – Código Zadoks adotado para determinação do ciclo fenológico da cultura do trigo.

Dados de entrada do ciclo fenológico (DAP^*)	Código decimal para os estádios de crescimento	Descrição do código
Emergência	09	Folha no ápice do coleóptilo
Máxima cobertura	54	Metade das inflorescências emergidas
Florescimento	60	Início da antese
Duração do florescimento	60 até 68	Duração do florescimento
Senescência	71	Cariopse aquosa
Maturidade	91	Cariopse dura (difícil dividir com a unha)

LEGENDA: * DAP - Dias Após Plantio. FONTE: Fundação ABC.

O nível de fertilidade do solo foi admitido como não limitante ao desenvolvimento da cultura e a cobertura vegetal foi considerada fixa em 75% de resíduo de material orgânico. Foi considerado que o manejo adotado nas áreas não afetou o escoamento superficial e que não houve presença de plantas infestantes. A irrigação não foi considerada por não haver a adoção da prática nos locais estudados.

Os dados de solo inseridos no programa são de um experimento anterior conduzido na mesma área, realizado por Piekarski et al. (2017) (Tabela 2).

Tabela 2 – Atributos físico-hídricos das áreas experimentais da Fundação ABC, inseridos na aba solo do AquaCrop, para calibração dos parâmetros do programa.

Localidade	Camada (m)	Textura	Conteúdo de água no solo			K_{sat} (mm dia ⁻¹)
			(m ³ m ⁻³)			
			$\theta_{PMP}^{(1)}$	$\theta_{CC}^{(2)}$	$\theta_{Sat}^{(3)}$	
Castro	0,00 – 0,10	Argilosa	0,36	0,50	0,63	418,32
Castro	0,10 – 0,25	Argilosa	0,33	0,47	0,60	368,23
Castro	0,25 – 0,40	Muito argilosa	0,32	0,45	0,62	325,74

LEGENDA: ⁽¹⁾Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; ⁽²⁾Umidade volumétrica na capacidade de campo; ⁽³⁾Umidade volumétrica na saturação. FONTE: A autora (2018).

O conteúdo inicial de água no solo, para realizar as análises com o AquaCrop, foi considerado igual a 50% da água compreendida entre a capacidade de campo (θ_{CC} ; $m^3 m^{-3}$) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $m^3 m^{-3}$).

Calibração do modelo AquaCrop

Foi realizada análise de sensibilidade em todos os parâmetros do AquaCrop para verificar a influência de cada parâmetro no resultado final de produtividade simulada no programa. Os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade a produtividade potencial da cultura (Tabela 3) foram submetidos ao processo de calibração.

Foram selecionadas aleatoriamente 35% a 40% do total das safras distribuídas entre as cultivares Supera e Quartzo, respectivamente. Os demais parâmetros não calibrados foram definidos conforme recomendação de Raes et al. (2017b), para a cultura do trigo.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo AquaCrop que foram calibrados para as cultivares Quartzo e Supera no município de Castro-PR.

Parâmetro	Descrição
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%) ⁽²⁾
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (% dia ⁻¹) ⁽¹⁾
$K_{CTR,x}$	Coefficiente da cultura - completa expansão do dossel ⁽¹⁾
WP^*	Produtividade da água normalizada para ET_0 e CO_2 (g m ⁻²) ⁽¹⁾
HI_o	Índice de colheita de referência (%) ⁽³⁾

⁽¹⁾ Conservativo geralmente aplicável; ⁽²⁾ Dependente do ambiente e/ou manejo; ⁽³⁾ Cultivar específica.

Análises estatísticas dos dados

As produtividades simuladas com o AquaCrop (Y_s ; kg ha⁻¹) foram comparadas com as produtividades reais observadas a campo (Y_r ; kg ha⁻¹), em análises de regressão linear simples. Foram calculados os erros absolutos (Ea) e relativos (Er), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de concordância “ d ” (Willmott, 1982).

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{r_i} - Y_{s_i}|}{n}$$

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{r_i} - Y_{s_i}|}{\sum_{i=1}^n Y_{s_i}} \cdot 100$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{r_i} - \bar{Y}_r) \cdot (Y_{s_i} - \bar{Y}_s)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{r_i} - \bar{Y}_r)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_{s_i} - \bar{Y}_s)^2}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{s_i} - Y_{r_i})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_{s_i} - \bar{Y}_r| + |Y_{r_i} - \bar{Y}_r|)^2}$$

Sendo: Ea – erro absoluto médio (kg ha^{-1}); Er – erro relativo (%); r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); d – índice “ d ” (kg ha^{-1}); Y_{r_i} – valores reais médios de produtividade observados no i -ésimo experimento (kg ha^{-1}); \bar{Y}_r – média dos valores reais de todas as cultivares (kg ha^{-1}); Y_{s_i} – valor estimado de produtividade no i -ésimo experimento (kg ha^{-1}); \bar{Y}_s – média dos valores de produtividade estimada nos experimentos (kg ha^{-1}); n – número de safras (adimensional).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não foi possível estabelecer valor único para cada parâmetro no processo de calibração, e as duas cultivares foram representadas por intervalos de valores no presente estudo (Tabela 4). A necessidade do intervalo é atribuída a diversos fatores observados ao longo da calibração: *i*) distintas épocas para atingir os estádios fenológicos estabelecidos; *ii*) diferentes populações de plantas; e, *iii*) diferentes cultivares ao longo das safras.

Tabela 4 – Parâmetros obtidos na calibração do AquaCrop para as cultivares Quartzo e Supera no município de Castro-PR

Parâmetro	----- Cultivares -----	
	Supera	Quartzo
CC_x (%)	80 a 92	86 a 93
CDC (% dia^{-1})	7,2 a 8,4	7,1 a 8,3
$K_{CTR,x}$ (adimensional)	1,05 a 1,4	1,25 a 1,35
WP^* (g m^{-2})	16 a 20	17 a 19
HI_o (%)	46 a 70	48 a 65

FONTE: A autora (2018).

O HI_o variou entre 46% e 70% para as cultivares avaliadas (Tabela 4). Toumi et al. (2016) e Bouazzama et al. (2017) também calibraram o AquaCrop com $HI_o = 46\%$, obtendo excelentes resultados de simulação.

Os valores obtidos para o WP^* variaram entre 16 e 20 g m^{-2} (Tabela 4). A maior amplitude foi observada com a cultivar Supera. Os menores valores obtidos para ambas as cultivares é próximo ao observado por Zhang et al. (2013), na China, em que encontraram bons resultados com a calibração do $WP^* = 15 \text{ g m}^{-2}$. A maioria dos valores do WP^* ficaram dentro do intervalo recomendado pela FAO, variando entre 15 e 20 g m^{-2} para culturas de ciclo C3 (Raes et al., 2018).

No presente estudo o $K_{CTR,x}$ variou entre 1,05 a 1,4 (Tabela 4). O menor valor do $K_{CTR,x}$ encontrado ($K_{CTR,x} = 1,05$) ficou muito próximo do obtido por Toumi et al. (2016), sendo $K_{CTR,x} = 1,07$ para o trigo de inverno no Marrocos.

A máxima cobertura do dossel (CC_x) variou entre 80% a 93% para as cultivares (Tabela 4). Os valores de CC_x são semelhantes aos obtidos por Zhang et al. (2013) e Trombetta et al. (2016), em que ambos os autores observaram melhor resultado de produtividade simulada com o parâmetro $CC_x = 90\%$.

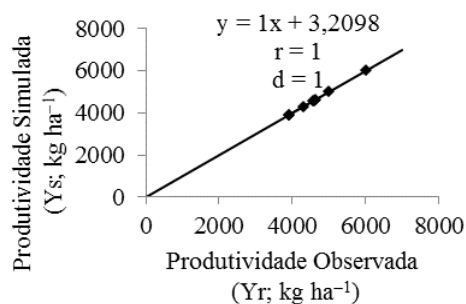
O coeficiente de declínio do dossel (CDC) variou de 7,1 a 8,4% dia^{-1} (Tabela 4). O valor máximo obtido no presente estudo ($CDC = 8,4\% \text{ dia}^{-1}$) foi igual ao encontrado por Xiangxiang et al. (2013). Andarzian et al. (2011) obteve bons resultados de simulação para o trigo com o CDC ajustado a 6,2% dia^{-1} .

Os erros absolutos (Ea) e relativos (Er) obtidos na calibração das cultivares de trigo com o modelo AquaCrop foram praticamente desprezíveis (Tabela 5). O perfeito ajuste para obtenção das produtividades simuladas, próxima das observadas, deveu-se ao intervalo de valores atribuídos aos parâmetros no processo de calibração (Tabela 4).

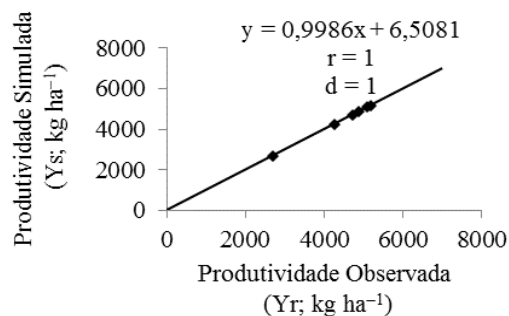
Tabela 5 – Produtividades reais (Y_r) e simuladas (Y_s), erros absoluto (Ea) e relativo (Er), obtidos no processo de calibração com o modelo AquaCrop, para as cultivares de trigo Quarto e Supera, em Castro-PR.

Cultivar	Safrá	Y_r	Y_s	Ea	Er	$n^{(1)}$
		----- (kg ha ⁻¹) -----				
Supera	2008	4717	4720	2,83	0,06	6
Supera	2009	2684	2685	1,42	0,05	
Supera	2011	5184	5176	8,04	0,16	
Supera	2011	4870	4868	2,49	0,05	
Supera	2013	4262	4265	3,30	0,08	
Supera	2013	5085	5090	5,40	0,11	
—	—	4467	4467	3,91	0,08	
Quartzo	2010	4999	5005	5,71	0,11	8
Quartzo	2010	4295	4299	3,77	0,09	
Quartzo	2011	3903	3910	7,34	0,19	
Quartzo	2012	4564	4570	5,87	0,13	
Quartzo	2013	6021	6023	2,41	0,04	
Quartzo	2013	3905	3903	1,50	0,04	
Quartzo	2014	4631	4635	3,93	0,08	
Quartzo	2014	4602	4600	1,75	0,04	
Média	—	—	4615	4618	4,04	

Os coeficientes de correlação (r) e índice “ d ” obtidos apresentaram resultado excelente, com perfeita correlação positiva ($r = 1$) para as cultivares, devido às diferenças mínimas encontradas entre as produtividades simulada e observada (Figura 1). Kumar et al. (2014) também obteve excelentes ajustes com o AquaCrop para o trigo em diferentes níveis de salinidade nos solos de Delhi, para rendimento final em grãos ($r = 0,99$ e “ d ” = 0,99). Bons ajustes também foram obtidos por Toumi et al. (2016) ($r = 0,99$ e $RMSE = 30 \text{ kg ha}^{-1}$), considerando o $HI_o = 46\%$ e $WP = 16 \text{ g m}^{-2}$.



(a)



(b)

Figura 1 – Análise de regressão linear e seus respectivos coeficientes de correlação (r) e índices “ d ”, obtidos da associação entre a produtividade simulada (Y_s) vs observada (Y_r) no processo de calibração do AquaCrop, município de Castro, Estado do Paraná, para as cultivares de trigo: a) Quartzo; e, b) Supera.

CONCLUSÕES

- O intervalo de valores atribuído aos parâmetros mais sensíveis (CC_x , CDC , $Kc_{TR,x}$, WP^* , HI_o) possibilitou excelentes calibrações para as cultivares de trigo Quartzo e Supera avaliadas;
- O modelo AquaCrop gerou boa estimativa de rendimento para as cultivares de trigo Quartzo e Supera avaliadas no município de Castro, Estado do Paraná, apresentando resultados simulados muito semelhante aos observados.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56, Rome: FAO, 1998. 300 p.
- ANDARZIAN, B., BANNAYAN, M., STEDUTO, P., MAZRAEH, H., BARATI, M. E., BARATI, M. A., RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, p. 1–8, 2011.
- ANGULO, C.; RÖTTER, R.; LOCK, R.; ENDERS, A.; FRONZEK, S.; EWERT, F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 32-46, 2013.
- BOUZZAMA, B.; KARROU, M.; BOUTFIRASS, M.; BAHRI, A. Assessment of Aquacrop model in the simulation of durum wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and yield under different water regimes. **Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires**, v. 5, n. 3, p. 222-230, 2017.

BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 180-187, 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. A cultura do trigo. Brasília: Conab, 2017. 218p.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZ, 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**, v. 101, n. 3, p. 499-508, 2009.

GOODING, M. J. **Wheat: Chemistry and Technology**. In: Chapter 2: The Wheat Crop. A volume in American Associate of Cereal Chemists International, 4ª Edição. Department of Agriculture, The University of Reading, Berkshire, United Kingdom, p. 19-49, 2009.

JIN, X.; FENG, H.; ZHU, X.; LI, Z.; SONG, S.; SONG, X.; YANG, G.; XU, X.; GUO, W. Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. **Plos One**, v. 9, n. 1, 11p., 2014.

KUMAR, P.; SARANGI, A.; SINGH, D. K.; PARIHAR, S.S. Evaluation of Aquacrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. **Irrigation and Drainage**, v. 63, p. 474-487, 2014.

MANIRUZZAMAN, M.; TALUKDER, M. S. U.; KHAN, M. H.; BISWAS, J. C.; NEMES, A. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production undervaried water regimes in Bangladesh. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 331-340, 2015.

MIRSAFI, Z.; SEPASKHAH, A. R.; AHMADI, S. H.; KAMGAR-HAGHIGHI, A. A. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 343-351, 2016.

MOHAMMADI, M.; GHAHRAMAN, B.; DAVARY, K.; ANSARI, H.; SHAHIDI, A.; BANNAYAN, M. Nested validation of Aquacrop model for simulation of winterwheat grain yield, soil moisture and salinity profiles under simultaneous salinity and water stress. **Irrigation and Drainage**, v. 65, p. 112-128, 2016.

PIEKARSKI, K. R.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y.; ROSA, S. L. K.; OLIVEIRA, C. T. Estimativa da produtividade da cultura da soja considerando a influência dos atributos físico-hídricos do solo na Região dos Campos Gerais. **Convibra Congresses Conferences**, 2017.

RAES, D. **AquaCrop training handbooks: Book I Understanding AquaCrop**. Rome, Italy. FAO, 2017a. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf>>. Acesso em 24 mai. 2018.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual of Aquacrop: Annexes**. Rome, Italy. FAO, 2017b. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>>. Acesso em 21 fev. 2018.

RAES, D. STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual: Chapter 1: FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water**. Version 6.0 - 6.1. Rome, Italy. FAO, 2018, 19p.

SALEMI, H.; SOOM, M. A. M.; LEE, T. S.; MOUSAVI, S. F.; GANJI, A.; YUSOFF, M. K. Application of Aquacrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. **African Journal of Agricultural Research**, v. 610, p. 2204-2215, 2011.

TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, 2016.

TROMBETTA, A.; IACOBELLIS, V.; TARANTINO, E.; GENTILE, F. Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 304-316, 2016.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 63, n.11, p. 1309-1313, 1982.

XIANGXIANG, W.; QUANJIU, W.; JUN, F.; QIUPING, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 95-104, 2013.

ZADOKS, J. C., CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v. 14, p. 415-421, 1974.

ZHANG, W.; LIU, W.; XUE, Q.; CHEN, J.; HAN, X. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. **Water Science & Technology**, v. 68, n. 4, p. 821-828, 2013.