

## **CALIBRAÇÃO E TESTE DE UM MODELO MECANÍSTICO PARA A PRODUÇÃO DA CULTURA DO MILHO EM DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

**ANA RITA COSTENARO PARIZI<sup>1</sup>; ADROALDO DIAS ROBAINA<sup>2</sup>; MARCIA XAVIER PEITER<sup>3</sup>; ANA CARLA DOS SANTOS GOMES<sup>4</sup>; FÁTIMA CIBELE SOARES<sup>5</sup> E GISELE APARECIDA VIVAN<sup>6</sup>**

1Engenheira Agrícola, Professora de Ensino Básico Técnico e Tecnológico, Doutora/IF Farroupilha. CEP – 97555-000, RS – 377 km 27 – Passo Novo, Alegrete, RS. Fone: (55) 3421-9600, RS. E-mail: ana.parizi@iffarroupilha.edu.br;

2Engenheiro Agrônomo, Professor Titular, Doutor/UFMS, Departamento de Engenharia Rural. CEP 97719- 900, Avenida Roraima S/N Camobi, Santa Maria, RS. Fone (55) 3220-9386. E-mail: diasrobaina@gmail.com

3Engenheira Agrônoma, Professora Associada, Doutora/UFMS, Departamento de Engenharia Rural. CEP 97719- 900, Avenida Roraima S/N Camobi, Santa Maria, RS. Fone (55) 3220-9386. E-mail: mpeiter@gmail.com

4Engenheira Agrícola, Professora de Ensino Básico Técnico e Tecnológico, Doutora /IF Farroupilha. CEP – 97555-000, RS – 377 km 27 – Passo Novo, Alegrete, RS. Fone: (55) 3421-9600, RS. E-mail: ana.gomes@iffarroupilha.edu.br

5Engenheira Agrícola, Professora Adjunta, Doutora /UNIPAMPA. CEP – 97546-550, Av. Tiaraju, 810, Alegrete, RS. Fone: (55) 3421-9600, RS. E-mail: fatimacibele@yahoo.com.br

6Engenheira Agrícola, Professora de Ensino Básico Técnico e Tecnológico, Doutora /IF Sul. CEP – 96418-400, Av. Leonel de Moura Brizola, 82501, Bagé, RS. Fone: (53) 3247-3337, RS. E-mail: xlvivan@yahoo.com.br

### **1 RESUMO**

Os modelos matemáticos mecanísticos são baseados na descrição do processo que ocorre no sistema real considerado, ou seja, existe a tentativa de se considerar os princípios físicos e biológicos que ocorrem no sistema. O objetivo deste trabalho foi calibrar e testar um modelo de simulação mecanístico para obtenção da produção de grãos e matéria seca da cultura do milho, comparando os resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos em um experimento de campo conduzido sob diferentes níveis de irrigação. O experimento de campo foi realizado em área experimental da Fazenda Liberdade, município de Santiago, RS. O híbrido de milho Pioneer 32R22 foi conduzido em diferentes níveis de irrigação (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da evapotranspiração de referência). A calibração do modelo foi realizada com os dados do tratamento de 0% da evapotranspiração e posteriormente realizaram-se simulações de níveis de irrigação conforme o experimento de campo. Os resultados obtidos mostraram que o modelo de produção apresenta uma calibração dentro da faixa aceitável para modelos de simulação de produção de culturas agrícolas. O teste dos dados simulados demonstrou variação inferior a 10% e igualdade estatística na comparação dos resultados obtidos no campo com os dados simulados pelo modelo.

**Palavras - chave:** *Zea mays* L., manejo de irrigação, simulação

### **2 ABSTRACT**

**PARIZI, A. R. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; GOMES, A. C. dos S.; SOARES, F. C.; VIVAN, G. A.**

## A MECHANISTIC MODEL OF CALIBRATION AND TEST FOR THE CORN PRODUCTION IN DIFFERENTE IRRIGATION LEVELS

The mechanistic math models are based in the description process that happens in the real system considered, in other words, the attempt to consider the physical and biological principles that happens in the system. The purpose of this job was to calibrate and test a simulating mechanistic model to obtain the grain production and the corn crop dry matter, comparing to the results obtained in a field experiment conduced in different irrigation levels. The field experiment was accomplished in an experimental area called Liberdade's Farm, in the city of Santiago, RS. The hybrid corn Pioner 32R22 was conduced in different irrigation levels (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% of the evapotranspiration reference). The calibration model was accomplished with datas treatment of 0% of evapotranspiration and after it was accomplished irrigation levels simulations in irrigation levels according to the field experiment. The obtained results showed that the production model shows a calibration in an acceptable zone to the production model of simulation production in agricultural crops. The simulated test datas showed a variation under 10% and equality in the statistics and in the obtained results comparison in the field and simulated datas of the model.

**Keywords:** *Zea mays*, irrigation management; simulation

### 3 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) se constitui em uma das mais importantes atividades do cenário agrícola brasileiro, considerando-se os aspectos socioeconômicos, já que é cultivado em todos os estados da Federação, em uma área de 7.141,8 ha, com produção superior a 33,867 milhões de toneladas (CONAB, 2014).

O milho é uma das gramíneas de maior importância econômica do mundo, sendo cultivado em países de clima tropical, subtropical e de clima temperado. No Brasil a produção de milho tem se caracterizado pela divisão em duas épocas de semeadura, a semeadura de verão, ou primeira safra, e mais recentemente, a produção obtida na safrinha, ou segunda safra (COELHO, 2013).

De acordo com Wagner et al. (2012) o desenvolvimento adequado das culturas agrícolas é dependente dos fatores referentes à dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera, como disponibilidade de água no solo, evapotranspiração e aproveitamento da água pelas plantas. Para Serpa et al. (2012), no Estado do Rio Grande do Sul (RS), prolongados períodos de deficiência hídrica durante o pendoamento e enchimento de grãos, fases fenológicas críticas para a definição do potencial produtivo da cultura, vêm se tornando mais frequentes nos últimos anos.

Dessa forma, a utilização da tecnologia da irrigação vem sendo ampliada em lavouras comerciais no país e, principalmente, no RS, o qual possui histórico de instabilidade da produção agrícola em função da variação do regime pluvial, causada pela ocorrência dos fenômenos El niño e La niña (VIAN et al., 2016). Porém, muitos produtores ainda têm receio no investimento, pelo alto custo do equipamento e por incertezas no que se refere a produtividade. Desta forma, a utilização de modelos matemáticos aplicados para a simulação da produtividade de áreas irrigadas, é uma alternativa que contribui para o setor agrícola.

A produtividade pode ser bem caracterizada por meio de modelos matemático de monitoramento agrometeorológico. Esses modelos consideram que cada elemento climático exerce

certo controle na produtividade da cultura, interferindo como um fator de eficiência (SILVA et al., 2011). Estes, além de fornecer dados para alimentar os sistemas de previsão de safras agrícolas, permitem identificar, ao longo do ciclo da cultura, fatores que atuam negativamente na produtividade, orientando a tomada de decisão (ROSA et al., 2010).

A formulação de modelos compreende diferentes fases, tais como: seleção dos parâmetros nos quais o modelo está baseado, seleção de equações para descrever os fenômenos a serem considerados, parametrização de equações, calibração dos resultados e os resultados empíricos. A avaliação deve ser feita comparando-se os resultados externos, como por exemplo, produtividade da cultura e seu acúmulo de matéria seca, e os resultados internos, como o balanço de água no solo, acúmulo de área foliar, com seus análogos, medidos empiricamente (VAN KEULEN et al. 1982).

Existem vários tipos de modelos matemáticos, dentre eles, os mecanísticos, os quais, segundo Costa (2001), são aqueles baseados na descrição do processo que ocorre no sistema real considerado, ou seja, existe a tentativa de se considerar os princípios físicos e biológicos que ocorrem no sistema.

No caso da utilização de modelos de simulação da produção das culturas, sob diferentes níveis de irrigação, o procedimento permite obter todas as informações possíveis, que em experimentos de campo demandaria um dispendioso tempo de ensaios e medições morosas e onerosas, muitas vezes, devendo ser repetidas ao longo de vários anos. Desta forma, com a finalidade de oferecer a produtores e técnicos da região de Santiago, RS, subsídios necessários para a tomada de decisão em utilizar a irrigação como tecnologia para aumentar a produtividade, este trabalho teve o objetivo calibrar e testar um modelo de simulação mecanístico para obtenção da produção de grãos e matéria seca da cultura do milho, comparando os resultados simulados com os obtidos em um experimento de campo irrigado.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Modelo Físico Experimental

Um experimento de campo foi conduzido no município de Santiago, RS (29°09'50" S e 54°51'32" W, altitude 420 m) em área experimental da Fazenda Liberdade localizada no 4º distrito Tupantuba, utilizando a cultivar de milho Pioneer 32R22, desenvolvido pela Pioneer Sementes.

A semeadura foi realizada no mês de dezembro/2008, utilizando-se uma população de plantas de 72.000 plantas/ha. No sulco de plantio foram incorporados 350 kg.ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo (SFT), em formulação comercial. Como adubação de cobertura aplicou-se 86 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N), parcelada em duas aplicações, sendo aos 30 dias após a emergência (DAE) e aos 45 DAE.

O modelo físico utilizado para calibrar e testar o modelo matemático foi constituído de seis lâminas de irrigação na cultura de milho, distribuídas em sistema de irrigação por aspersão convencional em diferentes níveis de irrigação.

Os níveis de irrigação aplicados ao longo do ciclo da cultura foram efetuados com base nos dados do teste do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Os volumes coletados nos pluviômetros foram convertidos em lâminas d'água, onde o volume aplicado em 1 hora foi de 3,68 mm. A partir deste dado, regularam-se os registros do sistema de irrigação, para que distribuíssem lâminas de 20% (Tratamento 1 - T1), 40% (Tratamento 2 - T2), 60% (Tratamento 3 - T3), 80%, (Tratamento 4 - T4), e 100% (Tratamento 5 - T5), da

ETo, definindo-se os tratamentos. Analisou-se também a testemunha (0% da ETo), que recebeu somente a precipitação.

Cada tratamento foi constituído de 24 m<sup>2</sup>, constituído de 3 repetições. Para cada repetição utilizou-se 16 linhas de cultivo, medindo 4 metros de comprimento. As mesmas apresentavam 3 linhas de cada lado de bordadura.

O manejo da irrigação utilizado foi baseado no turno de rega prefixado, com intervalo de 7 dias entre as irrigações quando não ocorria precipitação pluviométrica. Desta forma quando foi necessário irrigar, o sistema permaneceu ligado durante o tempo necessário para que a ETo medida no Tanque Classe “A” fosse reposta 100% (Tratamento 5 – T5), diferenciando desta forma os tratamentos.

O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta, cujas características físico-hídricas e químicas são apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

**Tabela 1.** Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

Prof.(cm)	Classe Textural	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )		
		Solo	Partícula	Porosidade
0 - 20	Franco Argilo Arenoso	1,55	2,60	40,44
20 - 40	Franco Argiloso	1,39	2,60	46,49
40 - 60	Franco Argiloso	1,34	2,63	48,96
60 - 80	Franco Argiloso	1,35	2,62	48,35
80 - 100	Argila	1,33	2,63	49,55

**Tabela 2.** Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

Prof.(cm)	Umidade Volumétrica (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )						
	Satur.	1 (kPa)	6 (kPa)	33 (kPa)	10 (kPa)	500 (kPa)	1500 (kPa)
0 - 20	0,42	0,39	0,34	0,29	0,28	0,19	0,16
20 - 40	0,47	0,40	0,34	0,30	0,28	0,20	0,17
40 - 60	0,50	0,44	0,36	0,30	0,28	0,19	0,17
60 - 80	0,51	0,44	0,37	0,31	0,29	0,22	0,21
80 - 100	0,51	0,45	0,39	0,34	0,32	0,23	0,21

**Tabela 3.** Características químicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

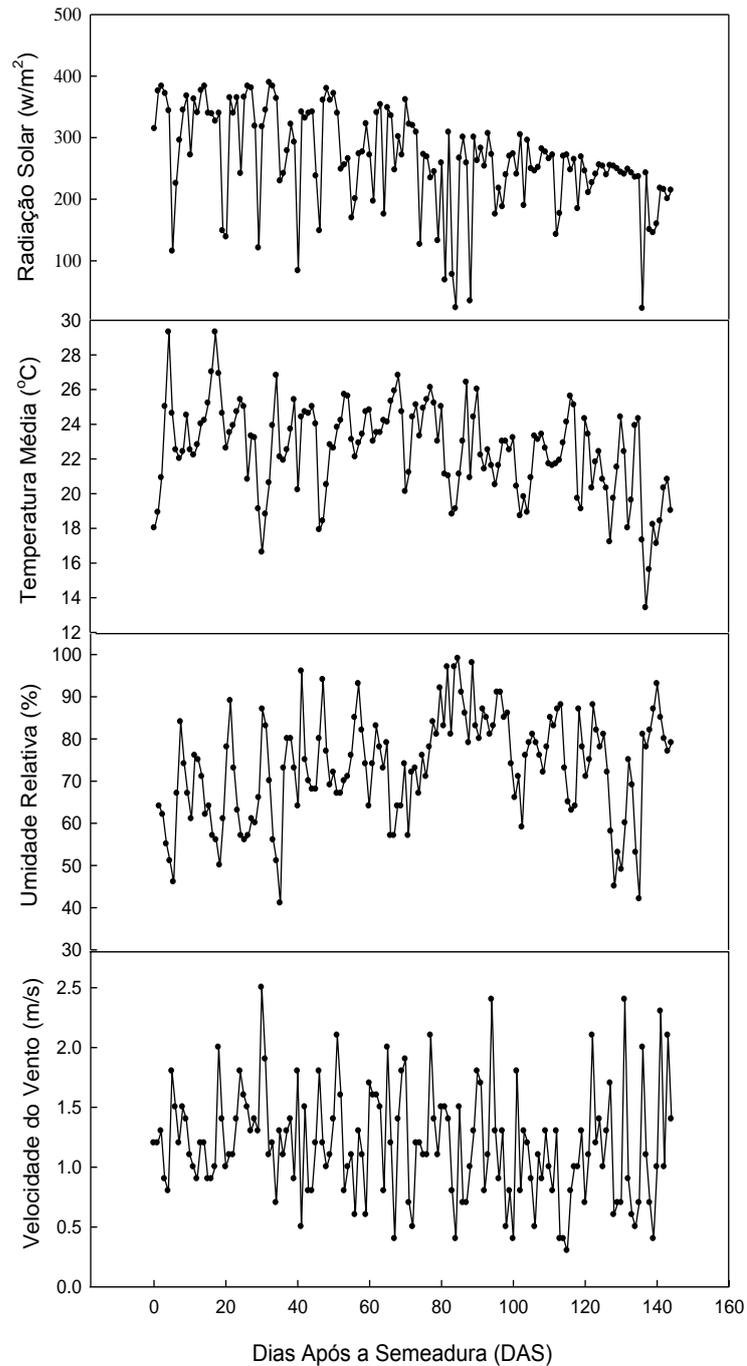
Prof (cm)	pH	M.O	Teor Trocável em g/100g Terra							Saturação		Argila	
	H <sub>2</sub> O (1:1)	%	CT C	K mg /d m <sup>3</sup>	Ca	M g	Al	H + Al	Índice SMP	P Mg. dm <sup>-3</sup>	Al	V%	%
0-10	5,8	2,4	11,1	304	5,4	2,8	0,0	2,2	6,6	5,8	2,4	11,2	304
0-30	5,7	2,0	9,9	146	4,7	2,3	0,0	2,5	6,5	7,3	0,0	75,0	29,5

Os dados relativos às condições climáticas foram coletados em uma estação climatológica automática próxima ao experimento, onde foi determinado diariamente a

precipitação pluvial (mm), temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar ( $\text{w.m}^{-2}$ ), fotoperíodo (horas) e velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

A Figura 1 apresenta a variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo das culturas.

**Figura 1.** Variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo das culturas



Durante o ciclo da cultura realizaram-se determinações de índice de área foliar, matéria seca total e profundidade do sistema radicular, necessários para a operacionalização do modelo matemático. As determinações eram realizadas em 3 plantas de cada repetição. Ao final do ciclo, determinou-se a produção de grãos e de matéria seca, utilizando-se 10 plantas por repetição. Estes dados foram necessários para a comparação com os valores simulados pelo modelo. Para a determinação da produção de grãos experimental, aplicou-se a seguinte equação:

$$\text{Produção de grãos (kg / ha)} = \frac{\text{MST} \cdot \text{IC}}{0,87} \quad [1]$$

onde MST é a produção de matéria seca ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) e IC é o índice de colheita.

Para a produção de matéria seca aplicou-se a fórmula:

$$\text{Produção de matéria seca (kg / ha)} = 10 \cdot \text{MST} \cdot \text{N.plantas} / \text{m}^2 \quad [2]$$

#### 4.2 Modelo Matemático

O modelo matemático utilizado foi o Robaina (2009 - Informe verbal). Ele leva em consideração as características do solo, da atmosfera e da planta para acompanhar a extração de água no solo, e a resposta da produção da cultura sob diferentes manejos de irrigação.

Foi utilizada a equação de Richards (1931) para descrever as variações no conteúdo de água no solo, incluindo o termo representativo da transpiração TR (z, t) ou extração de água pelas raízes.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} C(\Psi) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\Psi) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} + k(\Psi) \cdot \text{TR}(\Psi, z, t) \right] \quad [3]$$

Em que:  $C(\Psi)$ , é a capacidade específica, representada pela derivada da umidade em função da pressão  $\frac{\partial \theta}{\partial \Psi}$  e  $\text{TR}(z, t)$  é a transpiração da planta na profundidade  $z$  e no tempo  $t$ .

A evapotranspiração máxima ( $ET_{max}$ ) foi obtida através da seguinte expressão:

$$ET_{max} = Kc + ETo \quad [4]$$

Em que:  $Kc$ , se refere aos valores dos coeficientes de cultura, obtidos de acordo com Klar (1991) e a  $ETo$ , se refere a evapotranspiração, obtida pelo Método de Penman

$$\left( ETP = \frac{(\Delta / \gamma) \cdot (Q / 59) + Ea}{\Delta / \gamma + 1} \right).$$

A transpiração da planta foi estimada por:

$$\text{TR}(\Psi) = TP_{max} \cdot f[\Psi(z, t)] \cdot dsr(z, t) \quad [5]$$

Em que:  $TP_{m\acute{a}x}$ , é a transpiração máxima ( $Lt^{-1}$ );  $\theta(z, t)$  é uma função da umidade na

profundidade  $z$  e no tempo  $t$ , definida por  $f(\psi(z, t)) = \frac{\psi(z, t) - \psi_{pm}(z)}{\psi_{cc}(z) - \psi_{pm}(z)}$ ,  $\psi_{cc}(z)$  e  $\psi_{pm}(z)$  são as unidades correspondentes a capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente na camada  $Z$  e  $dsr(z, t)$  é a função de distribuição do sistema radicular.

A estimativa da evaporação máxima foi expressa por (RITCHIE, 1972):

$$ES_{max} = \tau \cdot \left[ \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \right] \cdot \frac{Rn}{59} \quad [6]$$

Em que:  $\tau$  é a fração de energia que atinge a superfície do solo e relaciona-se com o índice de área foliar, segundo Ritchie (1972) através de  $\tau = e^{-0.39 \cdot LAI}$  ( $e$  = base de logaritmos naturais = 2,718),  $ES_{max}$ , é a evaporação máxima do solo (mm);  $Rn$ , é a radiação líquida ( $cal/cm^2/dia$ ), estimada a partir da equação global.

A estimativa da distribuição do sistema radicular foi realizada considerando-se o conhecimento do comportamento do sistema radicular em relação a profundidade e ao tempo, sendo necessário para simular a extração de água pela planta.

Para a estimativa da distribuição do sistema radicular foi utilizada a expressão:

$$DSR(z, t) = \frac{g(z)}{\int_0^{Prz} g(z)} \quad [7]$$

Em que:  $g(z)$  é a porcentagem (%) do sistema radicular até a profundidade  $z$ . O valor da

função  $g(z)$  foi calculado pela equação  $g(z) = \frac{[c \cdot (2 \cdot z - Prz) + Prz]}{Prz^2}$ , sendo  $c$  uma constante (- 0.8, conforme PERROCHET, 1987);  $Prz$ , é a profundidade efetiva do sistema

radicular, sendo calculada por  $Prz = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^d}$ .

A previsão de produção foi feita em função do incremento de matéria seca, quantificado em base horária pelo modelo. Foram calculados a partir dos dados experimentais os índices de colheita. De acordo com Robaina (1992), o modelo de produção pode ser separado em dois sub-modelos: modelo para a estimativa de produção potencial e modelo para a estimativa de produção real.

Para o modelo para a estimativa de produção potencial segundo Doorenbos & Kassam (1994) a taxa de produção potencial ( $Pms$ ) para um dia qualquer é expressa por:

$$Pms = (F \cdot Po + (1 - F) \cdot Pc) \quad [8]$$

Em que:  $Pms$ , é a produção de matéria seca ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $F$ , é a fração do dia em que o céu está nublado;  $Po$ , a taxa de fotossíntese para dias para dias nublados e  $Pc$  é a taxa de fotossíntese para dias claros, ambos expressos em  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$  e funções da latitude do local e da época do ano.

Segundo De Wit (1965), o valor de  $F$  é determinado por:

$$F = 1,25 - \frac{0,625 \cdot R_s}{R_c} \quad [9]$$

Em que  $R_{e041.3}$ , a radiação fotossinteticamente ativa na ausência da atmosfera ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ),  $R_s$  a radiação solar global média ao nível do solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), determinada através dos dados da estação.

Sob condições de campo, a produção potencial estimada na equação não é atingida, sendo a estimativa da taxa de produção potencial de matéria seca ( $q_{pot}$ ) expressa por:

$$q_{pot} = \frac{Pms \cdot f_t \cdot f_r \cdot f_a \cdot IAF}{5} \quad [10]$$

Em que:  $q_{pot}$ , é a produção potencial ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) para um índice de área foliar igual a 5;  $f_t$ , é

o fator de influência da temperatura, o qual será obtido por  $f_t = 1 - \left[ \frac{t - a}{b - a} \right]^2$  (em que  $a$  se refere a temperatura limite inferior, sendo considerada igual a 20 e  $b$  se refere a temperatura limite superior, sendo igual a 35);  $f_r$  é o fator de respiração (considerado = 0,30, conforme FEDDES et al., 1978);  $f_a$  é a relação entre a massa seca da parte aérea e massa seca da planta e  $IAF$  é o índice de área foliar ( $\text{m}^2$  de folha  $\cdot \text{m}^{-2}$  de solo).

A produção potencial acumulada ( $Q_{pot}$ ) no período de crescimento da cultura será:

$$Q_{pot} = \sum_1^n q_{pot} \cdot \Delta t \quad [11]$$

Em que:  $q_{pot}$  é obtido em  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $n$  é o período de dias até a colheita e  $\Delta t$  o período de 1 dia.

No caso do modelo para a estimativa de produção real, considera-se que o aumento da produção de uma cultura em relação ao tempo pode ser representado por uma curva sigmóide, que possui três trechos distintos: o primeiro correspondente a uma produção de matéria seca acelerada, o segundo a uma produção retardada e o último a uma produção tendente a estabilização. Sendo a produção uma função do tempo, pode-se representar a sua variação através de uma equação diferencial:

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q, t) \quad [12]$$

Em que: a taxa de produção ( $dQ/dt$ ) é uma função da produção acumulada ( $Q$ ) e do tempo ( $t$ ). A taxa de produção aumenta gradualmente até atingir um máximo, posteriormente decresce suavemente e no final do período torna-se nula.

A taxa de produção ( $q$ ) é influenciada por fatores chamados “Fatores de Produção”, tais como a radiação solar, temperatura, água, nutrientes, oxigênio e dióxido de carbono. Somente quando todos os fatores de produção estiverem disponíveis em quantidades adequadas a taxa de produção potencial máxima ( $q_{máx}$ ) será atingida. Nesta situação, tanto a taxa de produção como a produção serão máximas, mas quando um dos fatores de produção estiver em condição limitante, a taxa de produção e a produção serão limitadas ( $q_{at}$  e  $Q_{at}$ ), mesmo que todos os outros fatores estejam presentes em condições adequadas, o que conduz a concluir que, a produção potencial não poderá ser atingida.

Para se computar a taxa de produção atual em diferentes intervalos de tempo representados por  $i$ , segundo procedimento detalhado por Robaina (1992), é expressa por:

$$(q_{at}^i)^2 - q_{at}^i (q_{pot}^i + AW^i) + AW^i \cdot q_{pot}^i (1 - E) = 0 \quad [13]$$

Em que:  $i$  é um dia qualquer e a solução da equação acima é:

$$q_{at}^i = \frac{AW^i}{2} + \frac{q_{pot}^i}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(q_{pot}^i - AW^i)^2 - 4 \cdot q_{pot}^i \cdot AW^i (1 - E)} \quad [14]$$

Os valores de  $A$  e  $E$  foram determinados por tentativas de menor erro e o valor  $q_{pot}$  foi estimado pela equação 13.

A influência do fator de produção ( $w$ ) foi determinada por:

$$W^i = \frac{TR^i}{\Delta e^i} \quad [15]$$

Em que:  $\Delta e$ , é o déficit de pressão de vapor da água (mbar) e  $TR$  é a transpiração real diária ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ).

A produção real acumulada ( $Q_{at}$ ) foi calculada pela soma das produções diárias durante todo o período:

$$Q_{at} = \sum_{i=1}^n q_{at} \cdot \Delta t \quad [16]$$

em que  $t = 1$  dia. O termo  $Q_{at}$  é expresso em  $\text{kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$  e  $q_{at}$  em  $\text{kg.ha}^{-1}$ .

Produção de grãos

De acordo com De Wit (1965), a produção de grãos ( $P_g$ ) referida a grãos com 13% de umidade de uma cultura pode se calculada por:

$$P_g = Q_{at} \cdot \frac{IC}{0,87} \quad [17]$$

Em que:  $Q_{at}$ , é a produção de matéria seca ( $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) e  $IC$ , é o coeficiente ou índice de colheita.

O coeficiente de colheita  $IC$  foi determinado a partir dos dados do modelo físico experimental.

A calibração do modelo de produção se refere a determinação dos coeficientes  $A$  e  $E$  (equação 13). Foram utilizados os valores de produção obtidos no tratamento T0 para realizar esse procedimento.

Para a realização do teste do modelo, os valores de produção obtidos no experimento de campo nos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 foram comparados com os valores de produção calculados com o modelo de produção calibrado.

Foi feita a regressão linear  $y = a + b \cdot x$ , onde  $x$  foram valores simulados e  $y$  foram os valores experimentais obtidos no campo, com a finalidade de se obter o coeficiente de correlação  $r^2$  e do coeficiente linear  $a$  e coeficiente  $b$ . Para estes coeficientes, foi realizado o Teste  $t$  de Student ao nível de 5% de probabilidade de erro. Utilizou-se o programa computacional *Table Curve 2D v.2.03* (Jandel Scientific) a fim de encontrar o ajustamento das equações para calibrar o modelo de estimativa de produção e para comparar os resultados entre os dados de campo e os dados gerados pelo modelo.

Para interpretação dos resultados, foi determinado o coeficiente de correlação ( $r$ ) (SCHNEIDER, 1998) e índice de concordância ( $c$ ) de Willmott. A avaliação do desempenho do modelo de produção da soja foi feita pelo índice de desempenho ( $id$ ), proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997), cujo valor é o produto do coeficiente de correlação e o índice de concordância.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta o número de irrigações, lâmina média aplicada por irrigação (mm), irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicada (irrigação e precipitação) ao longo do ciclo da cultura de milho para seis tratamentos, obtidos no experimento de campo.

**Tabela 4.** Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) ao longo do ciclo da cultura do milho para seis tratamentos.

Tratamento	Irrigação Total (mm)	Precipitação Pluvial (mm)	Total de água aplicada (Irrigação e Precipitação (mm))
0	0	413	413,00
1	43,44	413	456,44
2	86,89	413	499,89
3	130,33	413	543,33
4	173,77	413	586,77
5	217,22	413	630,22

Para a utilização do modelo de produção potencial das culturas foi necessário determinar para cada dia de cálculo os vários parâmetros que compõem o modelo proposto.

A Tabela 5 demonstra os valores radiação solar fotossinteticamente ativa, ( $R_c$ ), taxa de produção potencial nos dias claros ( $P_c$ ) e taxa de produção potencial nos dias nublados ( $P_o$ ),

para a localidade em estudo ( $F = 29^{\circ} 09' 32'' S$ ). Estes valores foram obtidos em Doorenbos & Kassam (1994).

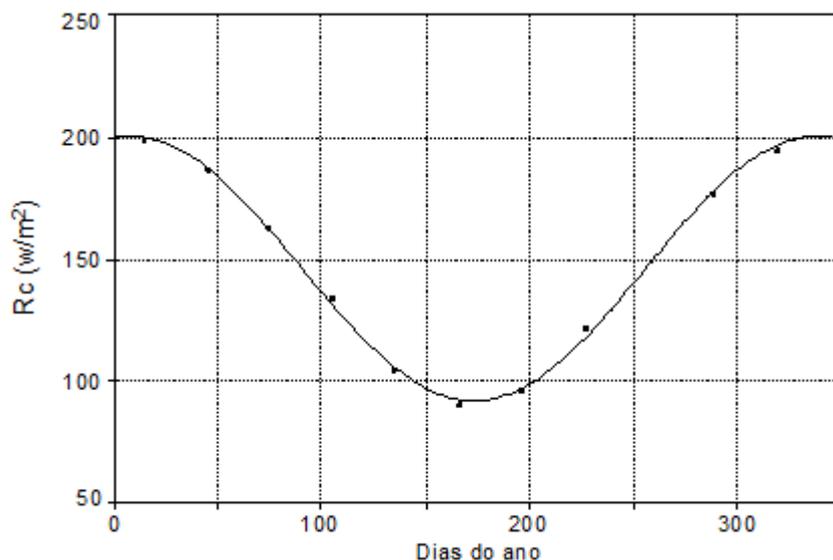
**Tabela 5.** Radiação solar fotossinteticamente ativa  $R_c$ , taxa de produção potencial nos dias claros  $P_c$  e taxa de produção potencial nos dias nublados  $P_o$ .

Dias	$R_c$ ( $W.m^{-2}$ )	$P_c$ ( $Kg .m^{-2}.dia^{-1}$ )	$P_o$ ( $Kg .m^{-2}.dia^{-1}$ )
15	199,3	482,3	257,8
46	186,2	457,3	243,6
74	162,3	412,6	216,8
105	130,8	353,6	181,2
135	105,0	305,4	151,7
166	91,8	280,8	136,8
196	96,4	289,2	141,9
227	117,5	328,3	165,9
258	148,0	385,3	200,5
288	176,9	439,4	233,1
319	196,2	476,1	254,5
349	198,7	481,5	256,7

Analisando a Tabela 2, observa-se que os valores de cada uma das variáveis que participa do modelo de produção proposto ( $R_c$ ,  $P_c$  e  $P_o$ ) em função do dia do ano diminuem a medida que se aproximam da metade do ano e voltam a crescer a partir da metade do ano de modo a se aproximarem do valor do início do ano, sugerindo que uma função do tipo senoidal se ajustaria adequadamente aos dados, de modo a permitir o cálculo dos valores de qualquer variável e em qualquer dia do ano.

Na Figura 2 mostra o ajustamento dos valores de radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros  $R_c$  em função do tempo. Observa-se que os valores da radiação fotossinteticamente ativa em dias claros  $R_c$  distribuídos ao longo do ano estimados pela função senoidal e os valores de  $R_c$  utilizados para o ajustamento.

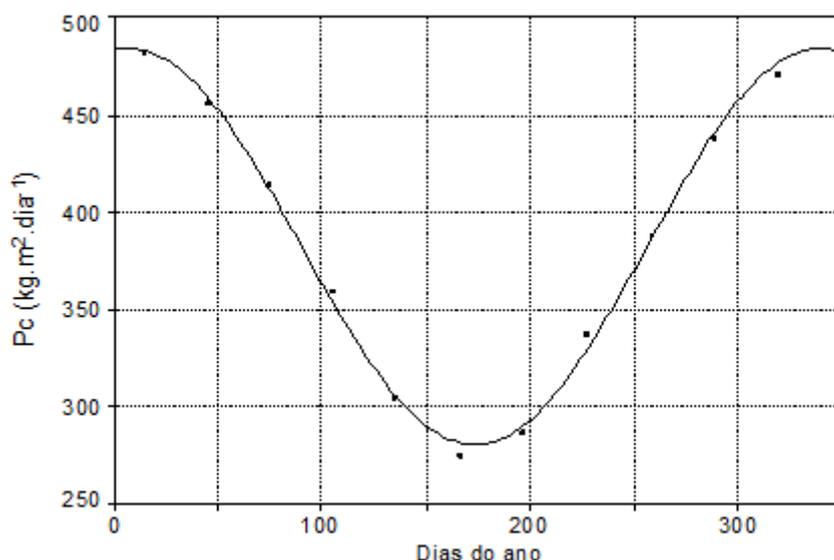
**Figura 2.** Valores da radiação solar fotossinteticamente ativa  $F = 29^{\circ} 09' 32''$  S.



Os valores da distribuição da radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros  $R_c$  foram ajustados por uma função senoidal do tipo  $R_c = a + b \cdot \sin(2\pi t/d + c)$ , na qual  $t$  é o dia do ano no calendário Juliano,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes a determinar. Os valores obtidos foram  $a = 145,596$ ,  $b = 54,243$ ,  $c = 1,241$  e  $d = 330,282$  e coeficiente de determinação  $r^2 = 0,998$ .

A Figura 3, apresenta os valores da taxa de produção potencial diária em dias claros ( $P_c$ ) distribuídos ao longo do ano estimados pela função senoidal ajustada e os valores de  $P_c$  utilizados para o ajustamento (estimativa dos coeficientes) da função.

**Figura 3.** Valores da produção potencial diária  $P_c$  ao longo do ano para a localidade  $F = 29^{\circ} 09' 32''$  S.

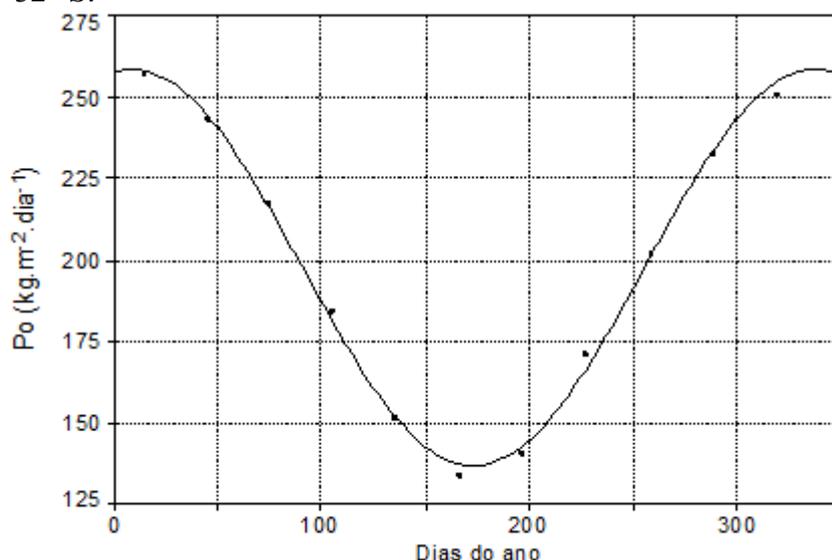


Os valores da distribuição da taxa de produção potencial diária  $P_c$  foram ajustados por uma função senoidal do tipo  $P_c = a + b \cdot \sin(2\pi t/d + c)$ , na qual  $t$  é o dia do ano no

calendário Juliano, a, b, c e d são coeficientes a determinar. Os valores obtidos foram  $a = 381,597$ ,  $b = 101,742$ ,  $c = 1,430$  e  $d = 331,546$  e um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,996$ .

Os valores da distribuição da taxa de produção potencial diária  $P_o$  nos dias nublados em função do tempo foram ajustados por uma função senoidal do tipo  $P_o = a + b \cdot \sin(2\pi t/d + c)$ , na qual  $t$  é o dia do ano no calendário Juliano, a, b, c e d são coeficientes a determinar. Os valores obtidos foram  $a = 197,204$ ,  $b = 61,010$ ,  $c = 1,397$  e  $d = 328,148$  e um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,997$ . A Figura 4 apresenta esta relação.

**Figura 4.** Valores da produção potencial diária  $P_o$  ao longo do ano para a localidade F =29° 09' 32" S.



A Tabela 6 apresenta os resultados da calibração do modelo, realizada com os dados obtidos do Tratamento T0 e por tentativas na determinação dos coeficientes A e E (equação 5), que resultassem em menor erro.

O processo de calibração foi concluído quando a diferença entre os valores de produção de matéria seca, obtidos por intermédio do modelo, e os valores de produção de matéria seca obtidos no experimento de campo foi o menor possível.

**Tabela 6.** Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do Tratamento T0 na cultura do milho.

Matéria Seca (Kg.ha <sup>-1</sup> )			Grãos (Kg.ha <sup>-1</sup> )		
Experimento	Modelo	Δ %	Experimento	Modelo	Δ %
18772,96	18482,40	1,57	8376,28	7487,70	11,87

Através da Tabela 6, observa-se que a diferença na produção de matéria seca e de grãos foi de 1,57% e 11,87%, respectivamente.

Gomes et al. (2014) trabalhando com este mesmo modelo para a cultura da soja, encontraram para este mesmo modelo uma diferença na produção de matéria seca e de grãos, de 3,4% e 1,3%, para produção de matéria seca e produção de grãos, respectivamente.

Após a calibração do modelo pelo Tratamento T0, realizou-se o teste da capacidade do mesmo em reproduzir os valores de produção para os demais tratamentos. Para verificar o desempenho do modelo de produção de milho proposto neste trabalho, os valores da produção

de matéria seca e da produção de grãos, obtidos com a utilização do modelo de produção, foram comparados com os valores da produção de matéria seca e da produção de grãos obtidos em experimento de campo.

Os resultados encontrados através dos dois procedimentos para cada cultura e em cada tratamento podem ser encontrados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo de produção e no experimento de campo para a cultura do milho.

Tratamentos	Matéria Seca (Kg.ha <sup>-1</sup> )			Grãos (Kg.ha <sup>-1</sup> )		
	Experimento	Modelo	Δ %	Experimento	Modelo	Δ %
1	21743,50	22393,20	2,99	9243,57	9676,10	4,68
2	26225,28	26142,20	0,32	12113,66	12031,90	0,68
3	29350,08	28877,50	1,64	14096,18	13969,00	0,91
4	29949,95	30413,80	1,55	14707,53	15167,90	3,13
5	31215,68	31110,90	0,34	15550,90	15745,50	1,25

Analisando os valores que constam na Tabela 7, observa-se que as diferenças entre os valores da produção de matéria seca variaram entre 0,32 a 2,99%. Já os valores de produção de grãos apresentaram variação de 0,68 a 4,68, sendo o Tratamento T2 o que apresentou menor variação (0,32 e 0,68, respectivamente).

Gomes et al. (2014) observaram que a diferença entre os valores da produção de matéria seca variaram de 4,6 a 7,1%, sendo que os valores de produção de grãos apresentaram variação de -0,2 a 7,2%, utilizando o mesmo modelo para a cultura da soja. O Tratamento T3, para a produção de matéria seca, foi o que apresentou menor variação (4,6%). No que se refere à produção de grãos, o Tratamento T4 foi o que apresentou menor variação (0,2%).

Peiter (1998) encontrou escala de grandeza de 10% quando comparou os valores de produção de matéria seca e de grãos da cultura do milho na região de Santa Maria.

Wolschick et al. (2007) implementaram e testaram um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de milho. Os autores encontraram no final do ciclo, o valor estimado de matéria seca nos grãos de 10,2% inferior ao valor observado.

Para reforçar a validação do modelo de produção foram determinados os coeficientes linear e angular da reta de regressão dos valores de matéria seca e de grãos obtidos por simulação (x) e os valores de matéria seca obtidos no experimento de campo (y). Os resultados podem ser observados na Tabela 8, onde constam também o coeficiente de determinação  $r^2$ , o valor do teste t do coeficiente a e o teste t do coeficiente b.

**Tabela 8.** Valores do coeficiente linear a, coeficiente angular b, coeficiente de determinação  $r^2$  e valores do teste t para os coeficientes a e b, obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do milho.

Produção (kg.ha <sup>-1</sup> )	a	b	$r^2$	ta	tb
Matéria Seca	-0,00010	0,9975	0,9997	-0,0002	-0,3312
Grãos	-0,000004	0,9874	0,9996	0,00004	-1,3532

De acordo com a Tabela 8 observa-se que coeficiente linear  $a$  foi próximo de zero e o coeficiente angular  $b$  próximo de 1. Verifica-se ainda, que os valores do teste de Student (teste  $t$ ) do coeficiente  $a$  ( $t_a$ ) e do coeficiente  $b$  ( $t_b$ ) calculados foram menores que o valor de  $t$  encontrado em tabelas (COSTA NETO, 1977) para 4 graus de liberdade e 95% de confiança ( $t$  tabelado = 2,97), permitindo concluir que, os valores da produção de matéria seca e de grãos obtidos pelos diferentes procedimentos são, estatisticamente iguais e pode-se considerar o modelo calibrado para o estudo o qual foi proposto, ou seja, estatisticamente  $a = 0$  e  $b = 1$ .

A Tabela 9 mostra os valores dos coeficiente de correlação ( $r$ ), índice de concordância ( $c$ ) e índice de desempenho ( $id$ ) obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do milho.

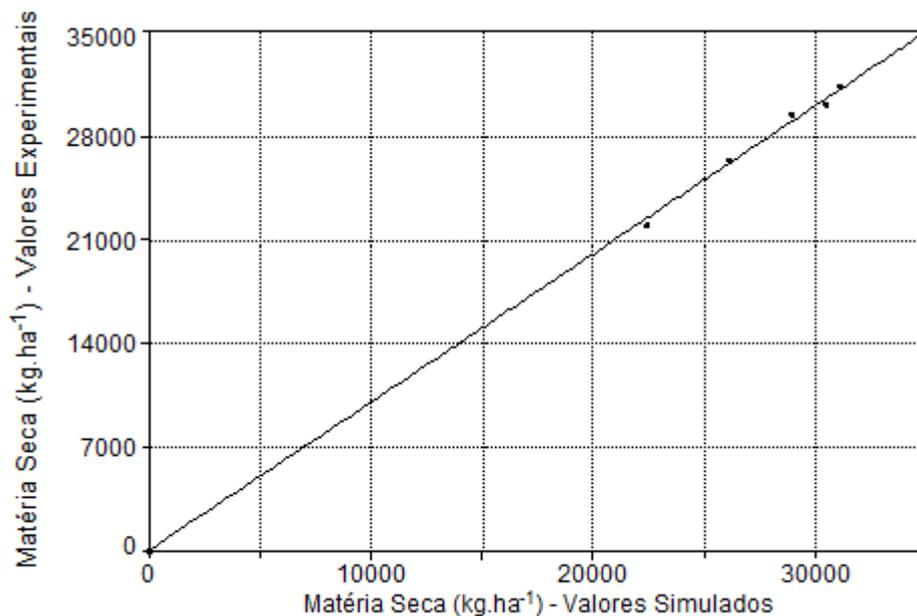
**Tabela 9.** Valores dos coeficiente de correlação ( $r$ ), índice de concordância ( $c$ ) e índice de desempenho ( $id$ ) obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do milho.

<b>Produção (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>r</b>	<b>c</b>	<b>id</b>	<b>Desempenho</b>
<b>Matéria Seca</b>	0,9998	0,9998	0,9978	Ótimo
<b>Grãos</b>	0,9998	0,9935	0,9933	Ótimo

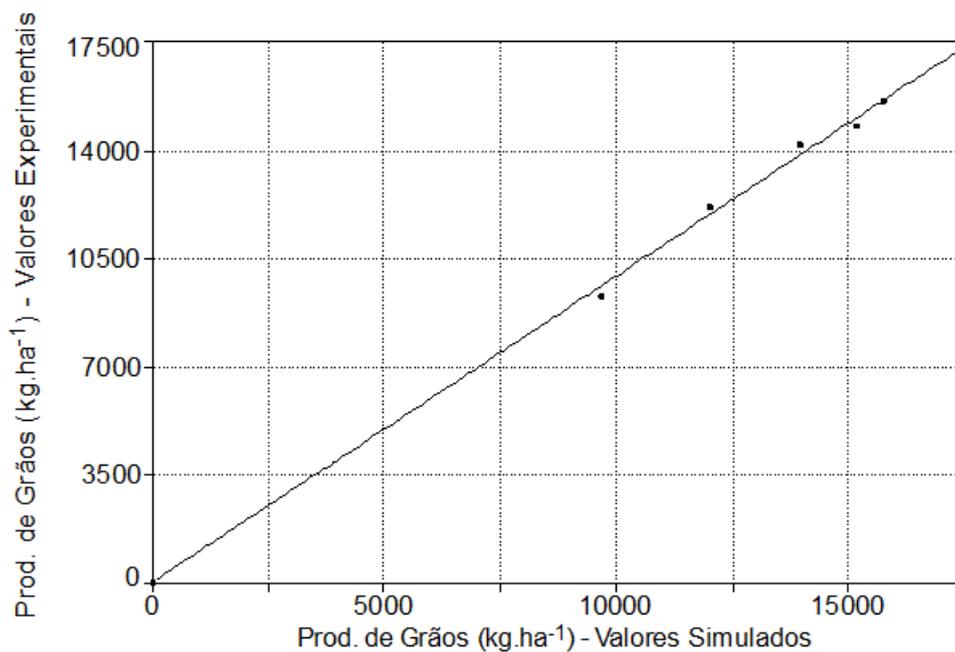
De acordo com a Tabela 9 observa-se que os valores do índice de concordância foram de 99%, para matéria seca e produção de grãos, respectivamente. Este fato evidencia que os valores de matéria seca e de grão, obtidos pelo modelo de simulação, apresentaram uma forte aderência, aos valores de matéria seca e de grãos, obtidos no experimento de campo. As classes de desempenho obtidas foram “ótimo”, para ambos parâmetros. Gomes et al. (2014) trabalhando com o mesmo modelo para a cultura da soja, encontraram  $id$  de 74% para a produção de matéria seca e 89% para a produção de grãos, com classes de desempenho “bom” e “ótimo”, respectivamente.

As Figuras 5 e 6 reforçam o fato da igualdade estatística entre os dois procedimentos de obtenção da produção de matéria seca e da produção de grãos.

**Figura 5.** Valores de produção de matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do milho.



**Figura 6.** Valores de produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do milho.



## 6 CONCLUSÃO

O teste dos dados simulados para o milho demonstrou variação inferior a 10% e igualdade estatística na comparação dos dados medidos no experimento de campo com os dados simulados pelo modelo;

O modelo de produção para as condições em estudo apresenta uma calibração dentro da faixa aceitável para modelos de simulação de produção de culturas agrícolas;

## 7 REFERÊNCIAS

- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- COELHO, H. diferentes condições de estresse hídrico no desenvolvimento de milhos transgênico e convencional. 2013, 103f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP, Botucatu, 2013.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 28 de ago. de 2014.
- COSTA NETO, P. O. Correlação e Regressão. In: ESTATÍSTICA. São Paulo: E. Blucher, p.178-228, 1977.
- COSTA, L. C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 2001, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p. 75-82.
- DE WITT, C. T. Simulation for assimilation, respiration, on transpiration of crop. Ageningen: A Halsted.J. Wiley, 1978. 140 p.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Roma: FAO, 1979. 306p. (FAO. Irrigação e Drenagem, 33).
- FEDDES, R. A.; KOVALIK, P. J.; ZARADNY, H., **Simulation of Field water use and crop yield**. New York: Jonh Wiley & Sons, 1978, 188 p.
- GOMES, et al. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja, **Revista Ciência Rural**, vol. 44, nº. 1, Santa Maria, p.43-49, 2014.
- PEITER, M. X., **Estudo do manejo de irrigação via modelo de simulação**. 1998. 183 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333, 1931.

RITCHIE, J. T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resource Research**, Canberra, v.8, p.1204-1213, 1972.

ROBAINA, A. D. **Estudo experimental e de simulação numérica da aplicação da água na produção das culturas**. 1992. 144 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1992.

Robaina (2009 - Informe verbal)

ROSA, V.G.C. et al. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológicoespectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

SERPA, M.S. et al. Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no final do inverno em ambientes irrigados e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.541-549. 2012.

SCHNEIDER, P.R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1998. 236p.

SILVA, S, de A. et al. Modelo agrometeorológico na estimativa da produtividade de duas variedades de café arábica considerando a variabilidade espacial. **Irriga**, v.16, n.1, p.1-10, 2011.

WAGNER, M., et al. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.2, p.170 - 179, 2013.

WOLSCHICK, D., et al. Implementação e teste de um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 271–278, 2007.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F. W. T.; DRESS, E. M. A summary model for crop growth. **In: PENNING DE VRIES, F. W. T.; VAN LAAR, H. H. (Ed). Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 87-97.

VIAN, A.L. et al., Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.3, p.464-471, 2016.