

ISSN 0104-1347

# Modelo computacional para simular o crescimento e a produtividade potencial da cultura do tomateiro

## Computational model to simulate potential growth and yield of tomato crop

Marcelo de Almeida Guimarães<sup>1</sup>, Derly José Henriques da Silva<sup>2</sup>, Luiz Cláudio Costa<sup>3</sup>, Deborah de Souza Vidigal<sup>4</sup>, José Sampaio Delfino Júnior<sup>5</sup>, Gabriel José Massoni de Andrade<sup>4</sup>

**Resumo** - Desenvolveu-se um modelo agrometeorológico para simular o crescimento e produtividade da cultura do tomateiro. O modelo foi desenvolvido em três partes: na primeira parte foram computados os ganhos energéticos diários, representados pela fotossíntese; na segunda parte, as perdas do sistema relativas à respiração de manutenção e crescimento; na terceira parte, procurou-se estabelecer as relações com incremento da área foliar, isto foi possível após o estabelecimento do incremento diário de matéria seca para as diversas partes da planta. Foram levadas em consideração interações meteorológicas e o estágio de desenvolvimento da planta em relação ao acúmulo de graus-dia. Após isto, foi simulado o acúmulo de matéria seca total da planta, da haste principal, das folhas e dos frutos. Os diferentes módulos considerados no modelo proposto foram capazes de representar adequadamente o crescimento e acúmulo de matéria seca nos diversos órgãos do tomateiro. Até 99 dias após semeadura (DAS), os valores observados e simulados foram similares. Após os 99 DAS foi verificado no modelo acréscimo contínuo de matéria seca em todos os órgãos das plantas, enquanto no experimento de campo foi verificado acréscimo de matéria seca somente para os frutos e haste.

**Palavras chaves:** *Solanum lycopersicum*, análise de sensibilidade, partição de fotoassimilados.

**Abstract** - An agrometeorological model was developed to simulate growth, development and yield of tomato crop. The model was developed in three main parts: in the first part, it was computed the daily energetic gains, represented by photosynthesis; in the second part, losses of the system relative to the respiration maintenance and growing were considered; in the third part, it was established leaf area increase patterns for the several parts of the plant. The meteorological interactions and the stages of development related to the accumulation of degree-days were taken into account. After that the accumulation of the total dry matter was simulated for stem, leaves and fruits. The different modules considered in the proposed model were capable of represent adequately the growth tendency and the accumulation of dry matter in the several organs of the tomato plant. In the beginning of crop development, until 99 days after sowing, the observed and simulated values were quite similar. After that, a constant accumulation of dry matter in all plant organs was estimated by the model, while in the field it was observed only for fruits and stems.

**Key words:** *Solanum lycopersicum*, sensitivity analysis, distribution of assimilates.

<sup>1</sup> Doutorando em Fisiologia Vegetal. Mestre em Fitotecnia. Email: [mguimara@hotmail.com](mailto:mguimara@hotmail.com). Departamento de Biologia vegetal, UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000.

<sup>2</sup> Professor Adjunto. Doutor em Melhoramento de Plantas. Email: [derly@ufv.br](mailto:derly@ufv.br). Departamento de Fitotecnia, UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000.

<sup>3</sup> Professor Adjunto. Ph.D. em Agrometeorologia. Email: [l.costa@ufv.br](mailto:l.costa@ufv.br). Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000.

<sup>4</sup> Graduandos. Departamento de Fitotecnia, UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000.

<sup>5</sup> Agrônomo. Mestre em Fitotecnia. Departamento de Fitotecnia, UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000.

## Introdução

O crescimento das culturas é influenciado por diversos fatores ambientais. Sendo assim, muitas decisões sobre o manejo da cultura devem ser tomadas continuamente desde o período de pré-plantio até o período de pós-colheita, considerando a complexa interação planta-ambiente (ANDRIOLO, 1999). Em virtude da grande complexidade e variabilidade dos fatores ambientais que influenciam a produtividade agrícola, aliado à redução acentuada de recursos técnicos e financeiros disponíveis para a investigação científica, o uso de novas tecnologias como, sistemas geográficos de informações, sensoriamento remoto e modelos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade aplicados à agricultura vêm ganhando grande impulso nas últimas décadas.

Nas décadas de 70 e 80, os modelos desenvolvidos, baseados nos processos fisiológicos e estatísticos, foram desenvolvidos para previsão de safra das principais culturas (FRANCE & THORNLEY, 1984; COSTA, 1988; COSTA et al., 2001). Tais modelos procuram simular o crescimento e o desenvolvimento das plantas, usando relações baseadas na teoria estatística e fisiológica como fotossíntese, respiração, produção de biomassa, produtividade de grãos e outros.

Os modelos de crescimento e desenvolvimento potencial de uma cultura fazem simulações a intervalos de tempo curtos, iguais ou inferiores a um dia. Esses modelos simulam a fotossíntese, a respiração, a organogênese e a distribuição da biomassa, não havendo reduções nos resultados de saída do modelo, ou seja, não são considerados problemas que com a cultura no decorrer do ciclo, como a ocorrência de doenças e pragas, de deficiências nutricionais, dentre outros.

Alguns modelos de crescimento da cultura de tomateiro foram desenvolvidos nos últimos anos para a cultura conduzida em ambiente protegido (DE KONING, 1994; HEUVELINK, 1996; GARY et al., 1996). Dentre estes, o modelo TOMGRO, desenvolvido por JONES et al. (1991) e aperfeiçoado por BERTIN (1993), divide a planta em órgãos e cada órgão em diferentes classes segundo a sua idade. Após a inicialização das variáveis de estado para cada classe fenológica

(variáveis que representam a condição da cultura em um determinado momento), o modelo introduz as variáveis do ambiente da estufa (temperatura e radiação solar), que são integradas em escala horária. O modelo calcula, mediante dados de entrada e equações, os valores da fotossíntese bruta e da respiração de manutenção da parte aérea da planta. O resultado é a produção horária da matéria seca da parte aérea da planta. Essas informações são integradas ao final do dia, e os resultados são exportados e armazenados diariamente no modelo. Esse modelo opera, portanto, na escala diária, podendo integrar todas as informações e simular o crescimento e o desenvolvimento durante o ciclo inteiro da cultura. Entretanto informações para simulação em plantas cultivadas em condições de campo são raras.

Os modelos computacionais são dependentes da utilização de variáveis ou parâmetros. A partir da análise de sensibilidade, podemos determinar quais as variáveis ou parâmetros são mais determinantes no resultado simulado pelo modelo. A análise de sensibilidade dos parâmetros e as variáveis utilizadas no modelo podem ser pesquisadas por meio das variações do seu comportamento diante das alterações de seus respectivos valores. Nesta análise, varia-se um parâmetro, com os demais mantidos constantes, a fim de se detectar seu efeito na eficácia do modelo. Segundo COSTA & BARROS (2001), os níveis de variação observados na resposta de saída dos modelos, podem indicar a necessidade de se estabelecer experimentos específicos para a obtenção dos parâmetros utilizados, conferindo, desta forma, maior credibilidade para os resultados obtidos com os modelos de simulação.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e testar um modelo de crescimento, desenvolvimento e produtividade potencial da cultura de tomateiro, bem como analisar a sensibilidade das variáveis de estado do modelo aos parâmetros de eficiência fotossintética e respiração de manutenção a partir de plantas cultivadas em condições de campo.

## Material e Métodos

O experimento foi conduzido na área de pesquisa do Setor de Olericultura do Departamento

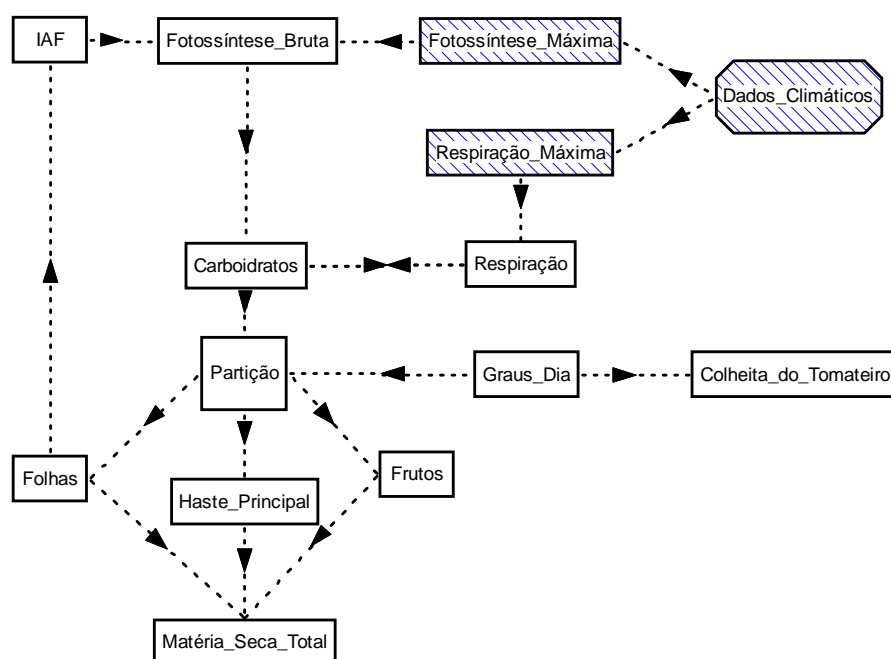
de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, no período de maio a novembro de 2002. Segundo a classificação de Köppen, o clima regional é do tipo Cwa, com umidade relativa média anual do ar de 80%, temperatura média anual de 21° C (PELUZIO et al., 1999). O solo é do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo, com: pH = 6,0; P = 74,5 mg/dm<sup>3</sup>; K = 170 mg/dm<sup>3</sup>; Ca<sup>2+</sup> = 4,1 cmolc/dm<sup>3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 0,7 cmolc/dm<sup>3</sup>; Al<sup>3+</sup> = 0,0 cmolc/dm<sup>3</sup>; H + Al = 2,64 cmolc/dm<sup>3</sup>; CTC (T) = 5,23 cmolc/dm<sup>3</sup> e V = 66%, determinados em laboratório. Para a realização do experimento, o solo foi arado, gradeado e no fundo do sulco de plantio, com 0,15 m de profundidade, foi efetuada a adubação de plantio de acordo com a análise de solo. A adubação foi realizada segundo FONTES (1999).

As mudas foram produzidas em bandejas de isopor de 128 células, sob ambiente protegido, onde permaneceram por 21 dias após a semeadura, que foi realizada em 14 de maio de 2002. Foram utilizadas mudas do cultivar Kindyo (Grupo Santa Cruz) de hábito de crescimento indeterminado. O transplântio das mudas foi realizado quando essas tinham cerca de quatro folhas definitivas. O espaçamento entre

plantas foi de 1,0 m x 0,5 m, sendo as mesmas tutoradas com fitilho e conduzidas com uma haste/planta, conforme indicado por MARIM et al. (2005), e com seis cachos de frutos por planta. Tratos culturais bem como controle de pragas e doenças foram realizados à medida que se fizeram necessários.

Nas diferentes épocas de avaliação das plantas, que corresponderam aos 69, 79, 89, 99, 109, 119, 129 e 139 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram cortadas rente ao solo e separadas em partes (haste, folhas e frutos). Nas folhas colhidas foram determinadas a área foliar (por meio de um medidor de área foliar modelo LI-3100 AM da LICOR) e a matéria seca das folhas (foram colocados em estufa de circulação de ar forçada com temperatura média de 75°C durante três dias, até peso constante PELUZIO et al., 1995). A matéria seca dos frutos foi determinada como sendo 5% da matéria fresca dos frutos (ATHERTON & RUDICH, 1986).

*Desenvolvimento do modelo* - O modelo potencial (Figura 1) foi baseado em processos fisiológicos relacionados diretamente ao crescimento da planta, que interferem na produtividade do



**Figura 1.** Diagrama esquemático do modelo de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do tomateiro. Os retângulos representam a quantidade e taxa; o quadrado, a variável auxiliar; o octângulo, os dados de entrada e as linhas tracejadas, os fluxos de informação.

tomateiro. Foi calculado o ganho diário de carbono do sistema por meio da fotossíntese. Deste ganho foram descontadas as perdas de carbono do sistema pela respiração de manutenção e de crescimento. Conhecido o balanço final entre ganhos e perdas, o ganho líquido de carboidrato foi distribuído para as folhas, haste principal e frutos. Esta distribuição foi determinada experimentalmente sendo as taxas de distribuição modificadas de acordo com o acúmulo de graus-dia. Após a distribuição, foi simulado o acúmulo de matéria seca total da planta, da haste principal, das folhas e dos frutos. O modelo foi desenvolvido no software MODEL MAKER 2.0 S.B.TECNOLOGY.

Os processos fisiológicos considerados foram à fotossíntese bruta diária, na qual se estimou a taxa fotossintética do dossel, utilizando-se a seguinte equação (FRANCE & THORNLEY, 1984):

$$Fd = ((P \max * h / k) * \frac{(\ln(A1 + B1 + \sqrt{(2 * A1 * B1 + B1^2)})}{(A1 * \exp^{-k * IAF} + B1 + \sqrt{(2 * A1 * B1 * \exp^{-k * IAF} + B1^2)})} \quad (1)$$

em que: Fd = fotossíntese bruta diária (gCO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>); Pmax = fotossíntese máxima = 674,36.10<sup>-6</sup> gCO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (BOONEN et al., 2002); h = número de segundos em 1 dia = 86400 s; k = coeficiente de extinção da luz = 0,58 (adimensional) (ACOCK et al., 1978); A1 = α \* k \* (RFA / h) sendo α = eficiência quântica da fotossíntese = 10,1.10<sup>-6</sup> gCO<sub>2</sub>.J<sup>-1</sup> (ACOCK et al., 1978); RFA = radiação fotossinteticamente ativa (W.m<sup>-2</sup>); B1 = (1 - t) \* P max, em que t = coeficiente de transmissividade = 0,1 (adimensional) (ACOCK et al., 1978); IAF = Índice de área foliar (m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>);

A fotossíntese bruta diária (Fd) foi corrigida para os valores diários de temperatura de acordo com a equação apresentada por THORNLEY & JOHNSON (1990):

$$Fg \max c = P \max * \frac{(Tmed - Tc)}{(Tr - Tc)} \quad (2)$$

em que: Fgmaxc = fotossíntese máxima corrigida pela temperatura (gCO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>); Pmax = fotossíntese máxima da cultura = 674,36.10<sup>-6</sup> gCO<sub>2</sub>.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (BOONEN et al., 2002); Tmed = temperatura média

do dia (°C); Tc = temperatura crítica da cultura = 10°C (ACOCK et al., 1978); Tr = temperatura de referência = 20°C (ACOCK et al., 1978).

A dependência da taxa de respiração de manutenção em relação à temperatura, corresponde ao conceito biológico de Q<sub>10</sub>. Neste modelo a respiração de manutenção foi estimada levando-se em consideração o efeito da temperatura:

$$Rma = Rmr * (Q_{10}^{((Tmed - Tr) / 10)}) \quad (3)$$

em que: Rma = respiração de manutenção (gCO<sub>2</sub>.gMS<sup>-1</sup>); Rmr = respiração de manutenção de referência = 0,015 gCO<sub>2</sub>.gMS<sup>-1</sup>; Q<sub>10</sub> = coeficiente de resposta à temperatura = 2 (adimensional) (ACOCK et al., 1978); Tmed = temperatura média do dia (°C); Tr = temperatura de referência = 20°C (ACOCK et al., 1978).

Durante o desenvolvimento da cultura, o carboidrato disponível é alocado para as diferentes partes da planta em taxas que variam de acordo com a idade da mesma (KEULEN & WOLF, 1986; PENNING DE VIRIES et al., 1989). Desta forma, a taxa de desenvolvimento da cultura foi considerada por uma escala variando de 0 a 2, sendo 0 a emergência (7 dias após a semeadura), 1 o florescimento (64 dias após a semeadura) e 2 a maturação fisiológica (149 dias após a semeadura). O estabelecimento de cada estágio fenológico D (adimensional) foi definido como sendo a razão dos graus-dia acumulados (GD) pelo número total de graus-dia (GDT) que a cultura precisa alcançar em um determinado estágio fenológico.

A área foliar acrescida ao dossel do tomateiro, ao longo do tempo, foi estimada levando-se em consideração a área foliar específica e a partição de matéria seca diária para as folhas:

$$IAF = Wliqfolhas * AFE \quad (4)$$

em que: IAF = índice de área foliar (m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>); Wliqfolhas = matéria seca líquida diária que vai para as folhas (gMS.m<sup>-2</sup>); AFE = área foliar específica = 0,0175 m<sup>2</sup>.gMS<sup>-1</sup> (HEUVELINK, 1999). O acúmulo de matéria seca ao longo do tempo é descrito por PENNING DE VIRIES et al. (1989) da seguinte forma:

$$\frac{dW}{dt} = (Pd - Rm * w) * Eg \quad (5)$$

em que:  $dW/dt$  é a variação de matéria seca ( $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e  $Eg$  a respiração de crescimento, isto é, a conversão de carboidratos em matéria seca ( $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Para cada parte estrutural da planta  $Eg$  assume um valor de acordo com DE VIRIES et al. (1989).

A análise de sensibilidade foi realizada com os parâmetros de inicialização: eficiência fotossintética ( $\acute{a}$ ), fotossíntese máxima ( $P_{\text{max}}$ ) e respiração de manutenção ( $R_{\text{mr}}$ ). Em cada teste, verificou-se o comportamento da produtividade da cultura de tomateiro, variando-se os valores dos parâmetros em -20%, -10%, +10% e +20% do valor utilizado para simulação no modelo.

## Resultados e Discussão

Observou-se diferença entre os valores observados e simulados para matéria seca da parte aérea da cultura em função dos dias pós-semeadura durante todo o ciclo da cultura (Figura 2). Até os 119 DAS, foi observado que os valores simulados pelo modelo e os observados em campo tiveram comportamento bastante similar, no entanto, a partir desta data o modelo passou a superestimar a produção de matéria seca total da parte aérea.

Por se tratar de modelo de crescimento, desenvolvimento e produção potencial, já era esperado que o peso de matéria seca final simulado fosse maior do que o observado. Isto se deve ao fato de que no modelo de produtividade potencial, não são inseridas as reduções, ou seja, não se considera a existência de problemas, como doenças, pragas, senescência de folhas, queda de frutos e outras que atingem a cultura no campo e proporcionam redução na produção e no acúmulo de matéria seca total final. Os máximos valores de matéria seca para parte aérea observada e simulada foram de  $669,94 \text{ g m}^{-2}$  e  $1214,87 \text{ g m}^{-2}$ , respectivamente aos 139 e 149 DAS. Aos 69 DAS, a matéria seca observada e simulada foram de  $4,074 \text{ g m}^{-2}$  e  $1,84 \text{ g m}^{-2}$ .

Com relação à matéria seca das folhas (Figura 3) foi observado comportamento similar ao descrito para matéria seca total, ou seja, o modelo superestimou essa variável a partir dos 99 DAS. Observou-se diferença entre os valores dos dados observados e simulados durante todo o ciclo da cultura, porém, até os 99 DAS (Figura 3), os valores simulados pelo modelo e os observados em campo, para o acúmulo da matéria seca das folhas, tiveram comportamento similar. Entretanto, a partir desta data observou-se que o modelo passou a superestimar a produção de matéria seca das folhas. A queda na matéria seca de folhas observada para

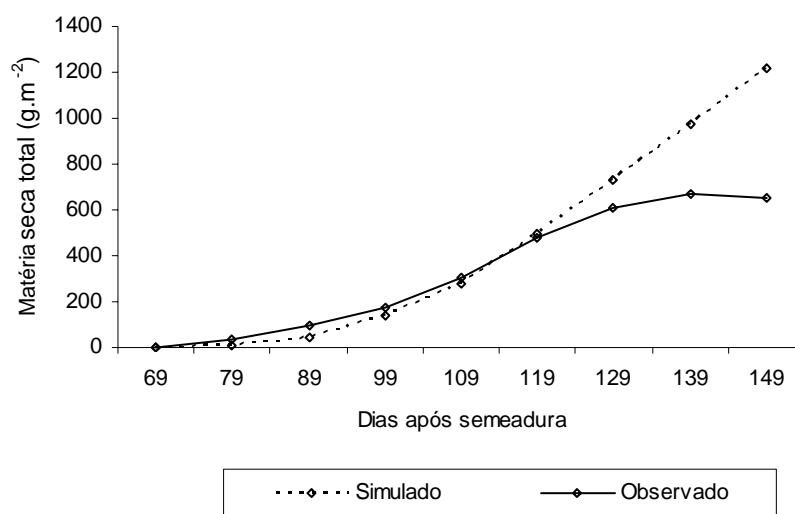
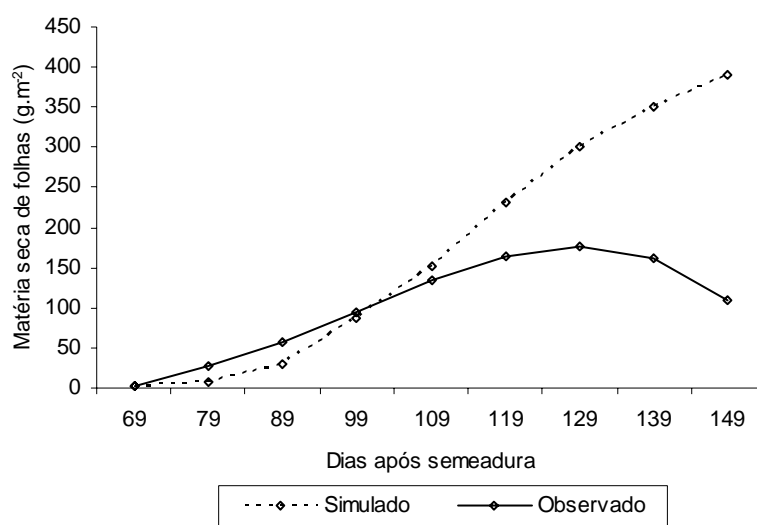


Figura 2. Matéria seca total da parte aérea do tomateiro, observada e simulada. Viçosa - 2003.



**Figura 3.** Matéria seca das folhas do tomateiro, observada e simulada. Viçosa - 2003.

os dados obtidos ao final do ciclo da cultura deveu-se principalmente à alta incidência de requeima do tomateiro. Devido a esta doença as plantas de tomate perderam folhas baixas, o que contribuiu para rápida redução de matéria seca de folhas das plantas (KIMATI et al., 1997).

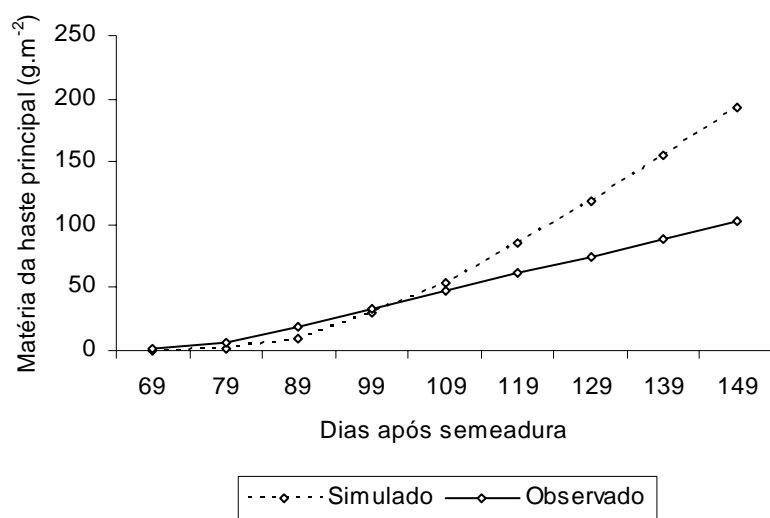
Os máximos valores de matéria seca das folhas observada e simulada foram de 175,76 g m<sup>-2</sup> e 391,23 g m<sup>-2</sup>, respectivamente aos 129 e 149 DAS. Aos 69 DAS, a matéria seca observada e simulada foram, respectivamente, 2,89 g m<sup>-2</sup> e 1,48 g m<sup>-2</sup>.

Para a matéria seca da haste (Figura 4), foi observada a mesma tendência descrita para matéria seca total e das folhas. O tomateiro de crescimento indeterminado cresce continuamente e, conseqüentemente, o incremento de matéria seca também é constante para todos os órgãos da planta (STEVENS & RICK, 1986), porém, deve-se ater ao fato de que a partição de fotoassimilados para a haste é diminuída logo após a antese, o que deve ao fato de que os drenos preferenciais de carboidratos, após a fecundação das flores, são os frutos (STEVENS & RICK (1986); TAIZ & ZEIGER (2004)).

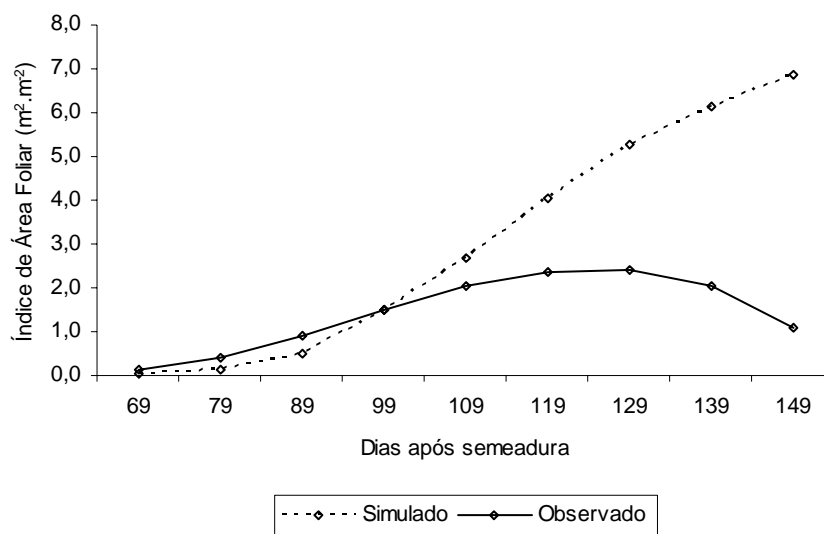
Os máximos valores de matéria seca da haste observada e simulada foram de 102,58 g.m<sup>-2</sup> e 193,33 g.m<sup>-2</sup>, respectivamente aos 149 DAS. Aos 69 DAS, a matéria seca observada e simulada foram, respectivamente, 1,18 g m<sup>-2</sup> e 0,32 g m<sup>-2</sup>.

Para o índice de área foliar (IAF) (Figura 5) foi observado comportamento semelhante ao descrito por PELUZIO (1991) e HEUVELINK (1999). Seu rápido crescimento no início é devido ao aumento da área foliar no início do cultivo, que se mantém até o ponto em que o incremento de folhas na planta se iguala à senescência destas. Após este máximo, ocorre redução da área foliar, que pode ser devido à senescência natural das folhas mais velhas e também à ocorrência de doenças nas folhas baixas, como ocorrido nas plantas observadas neste trabalho, que foram acometidas da requeima do tomateiro, doença fúngica que promove a senescência e redução da área foliar da planta.

De acordo com ANDRIOLO (1999), o maior valor de IAF que a planta pode ter, sem causar prejuízo ao balanço fotossintético, é de 3,5 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> o que não foi observado neste estudo, cujo máximo valor observado foi de 2,43 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>. Para o modelo de simulação, verificou-se valor máximo de 6,85 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>, o que se deu porque a matéria seca das folhas, que é utilizada diretamente no cálculo do índice de área foliar do modelo, aumentou constantemente, proporcionando aumento também crescente do IAF. PENNING DE VIRIES et al. (1989) afirmaram que os dados presentes na literatura são insuficientes para aproximações mais reais do cálculo de IAF. Tanto a matéria seca de folhas quanto a área foliar específica são extremamente dependentes dos fatores ambientais e climáticos. Ao se considerar valor fixo para um fator que se altera constantemente como a



**Figura 4.** Matéria seca da haste do tomateiro, observada e simulada. Viçosa - 2003.



**Figura 5.** Índice de área foliar do tomateiro, observada e simulada. Viçosa - 2003.

AFE, pode-se estar incorrendo em erro que pode prejudicar o resultado final do modelo. Aos 69 DAS, a matéria seca observada e simulada foram, respectivamente,  $0,16 \text{ g m}^{-2}$  e  $0,03 \text{ g m}^{-2}$ .

Com relação à produtividade (Figura 6), a simulada foi menor do que os dados observados até cerca de 135 DAS. Após essa data, conforme características anteriormente avaliadas, foram verificados os maiores valores simulados em relação aos observados. Isso se deve ao fato do modelo

desenvolvido ser para a determinação do potencial e como tal, não haver reduções de perdas de folhas e de frutos. A máxima produtividade verificada pelo modelo de simulação foi de  $126,43 \text{ t.ha}^{-1}$  enquanto para o observado no campo de cultivo foi de  $88,56 \text{ t.ha}^{-1}$ , aos 149 DAS. Aos 69 DAS, a matéria seca observada e simulada foram, respectivamente,  $0,19 \text{ t ha}^{-1}$  e  $0,17 \text{ t ha}^{-1}$ .

*Análise de sensibilidade* - A distribuição da matéria seca, assim como da produtividade, é

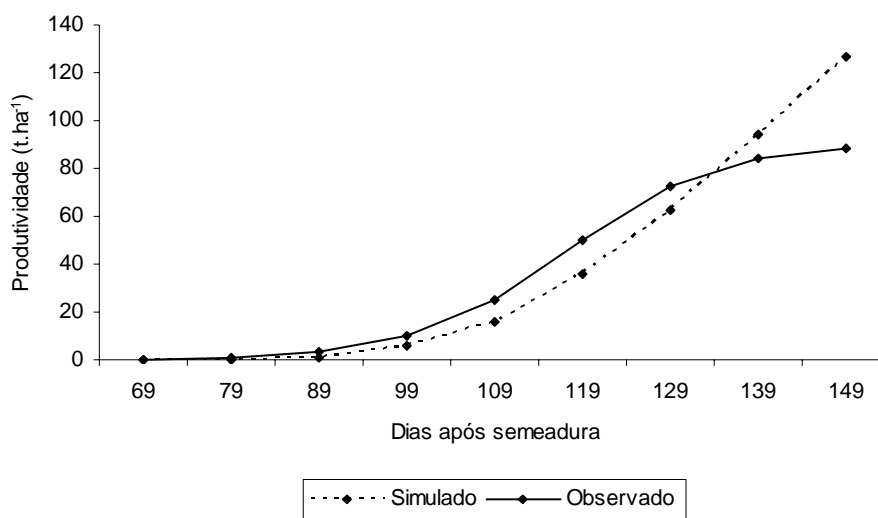
fortemente influenciada pelos fatores ambientais. Pela análise de sensibilidade do modelo em relação ao fator eficiência fotossintética ( $\alpha$ ) (Tabela 1), pode-se observar que os valores de produtividade aumentaram quando o valor de  $\alpha$  adotado (ACOCK et al., 1978) foi aumentado em 10 e 20% do seu valor original. Quando o valor de  $\alpha$  foi reduzido em 10 e 20%, foi verificada queda na produtividade final.

A variação observada na produtividade, quando se alterou o valor da eficiência fotossintética, foi percentualmente próxima ao da alteração do parâmetro. A queda brusca de produtividade observada quando se reduziu o parâmetro em 20% é devido ao fato de que baixos valores de eficiência fotossintética causam baixa resposta de fotossíntese à radiação, causando desta forma diminuição na produção de fotoassimilados, acarretando queda de produtividade.

A eficiência fotossintética ( $\alpha$ ) depende essencialmente do fator ambiental radiação e da estrutura fisiológica e bioquímica da planta. Segundo GYZIN (1995) em dias de plena radiação (céu aberto), ocorre aumento na eficiência de uso da luz. Este aumento na eficiência do uso da luz ocasiona aumento na eficiência fotossintética. As estruturas fisiológicas e bioquímicas também influenciam respectivamente na disposição e na quantidade de estruturas como estômatos e na concentração de enzimas como a Rubisco, que é responsável pela

fixação do  $\text{CO}_2$  nas plantas. Quanto maior o número de estômatos e maior a concentração da enzima Rubisco, maior será a eficiência fotossintética (HEUVELINK, 2005). Outros fatores como concentração de  $\text{CO}_2$ , temperatura e umidade do solo são importantes para o aumento e diminuição da eficiência fotossintética. Altas concentrações de  $\text{CO}_2$  podem proporcionar maior eficiência fotossintética já que mais moléculas de  $\text{CO}_2$  estariam à disposição para serem assimiladas sob uma mesma quantidade de energia.

Plantas submetidas à faixa de temperatura de 25 a 30°C também teriam sua eficiência fotossintética favorecida, pois os estômatos ficariam abertos por mais tempo, permitindo trocas gasosas e uma maior assimilação de  $\text{CO}_2$ . A umidade do solo também tem papel primordial na eficiência fotossintética. Solos secos estimulam o fechamento dos estômatos, independentemente da concentração de  $\text{CO}_2$  ou da temperatura ambiente. Já sob condições consideradas adequadas de umidade (0,5 a 2,0kPa), a eficiência tende a ser alta. Devemos observar que não é apenas um fator que atua diretamente na eficiência fotossintética e sim um conjunto de fatores. Os valores atribuídos ao parâmetro  $\alpha$  nos modelos de simulação para a cultura do tomateiro estão entre  $10,1 \cdot 10^{-6} \text{ gCO}_2 \cdot \text{J}^{-1}$  (ACOCK et al., 1978) e  $2,76 \cdot 10^{-6} \text{ gCO}_2 \cdot \text{J}^{-1}$  (BOONEN et al., 2002). Como podemos observar, o parâmetro  $\alpha$  pode apresentar valores diferentes em diferentes regiões de cultivo, o que nos permite sugerir o



**Figura 6.** Produtividade do tomateiro, observada em campo e simulada segundo o modelo potencial de desenvolvimento e produtividade da cultura do tomateiro. Viçosa - 2003.



**Tabela 1.** Alterações observadas na produtividade do tomateiro (%) quando se varia o valor adotado ( $10,1 \cdot 10^{-6} \text{ gCO}_2 \cdot \text{J}^{-1}$ ) (ACOCK et al., 1978) da eficiência fotossintética da cultura. Viçosa - 2004.

Alteração no Parâmetro ( $\alpha$ )	-20%	-10%	10%	20%
Varição da Produtividade	-32,60%	-13,28%	9,43%	16,41%

**Tabela 2.** Alterações observadas na produtividade do tomateiro (%) quando se varia o valor adotado ( $674,36 \cdot 10^{-6} \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (BOONEN et al., 2002)) da fotossíntese máxima da cultura. Viçosa - 2004.

Alteração no Parâmetro (Pmax)	-20%	-10%	10%	20%
Produtividade	-24,70%	-9,60%	6,23%	10,54%

**Tabela 3.** Alterações observadas na produtividade do tomateiro (%) quando se varia o valor adotado ( $0,015 \text{ gCO}_2 \cdot \text{gMS}^{-1}$ ) da respiração de manutenção da cultura. Viçosa - 2004.

Alteração no Parâmetro (Rmr)	-20%	-10%	10%	20%
Produtividade	8,09%	4,12%	-4,20%	-8,19%

desenvolvimento de experimentos e pesquisa para se determinar o valor da eficiência fotossintética para as condições de clima tropical. A utilização do parâmetro á desenvolvido nas condições climáticas do cultivo em questão tornará os valores potenciais obtidos com o modelo mais próximo dos valores observados em campo.

O segundo parâmetro avaliado foi à fotossíntese máxima da cultura (Pmax) que é a habilidade com que a planta ou a comunidade de plantas tem para atingir valores máximos de fotossíntese. Os valores de produtividade aumentaram significativamente quando o valor de Pmax adotado ( $674,36 \cdot 10^{-6} \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (BOONEN et al., 2002)) foi aumentado em 10 e 20% do seu valor original (Tabela 2). Quando o valor de Pmax foi reduzido em 10 e 20% verificou-se queda significativa na produtividade.

A variação observada na produtividade, quando se alterou o valor da fotossíntese máxima, foi percentualmente próxima ao da alteração do parâmetro á, o que mostra consistência do modelo em relação a este parâmetro. A fotossíntese máxima depende da fisiologia da cultura, assim como as condições ambientais as quais a planta está submetida, dentre elas podemos salientar: concentração de  $\text{CO}_2$  (altas concentrações de  $\text{CO}_2$  podem propiciar valores de fotossíntese maiores); temperaturas na faixa de 25 à 30°C (podem proporcionar maiores taxas de trocas gasosas e conseqüentemente aumento da fotossíntese

máxima); radiação solar (em dias de pleno sol, com alta radiação luminosa, pode ser favorecida a fotossíntese máxima); umidade do solo (se o solo estiver seco ou encharcado afeta negativamente a fotossíntese máxima). Lembramos que todos os fatores estão interligados e apenas a satisfação de um destes pode não proporcionar aumento na Pmax.

O terceiro parâmetro avaliado foi à respiração de manutenção da cultura (Rmr) (Tabela 3). Este parâmetro se refere à quantidade em gramas de  $\text{CO}_2$  que a planta consome por grama de matéria seca da mesma planta, para se manter viva e com suas funções fisiológicas normais. Os valores de produtividade diminuíram significativamente quando o valor de Rmr adotado ( $0,015 \text{ gCO}_2 \cdot \text{gMS}^{-1}$ ) foi aumentado em 10 e 20% do seu valor original. Quando o valor de Rmr foi reduzido em 10 e 20%, foi verificado aumento significativo na produtividade final (Tabela 3).

Condições ambientais como a temperatura, atuam na Rmr, uma vez que esta atua diretamente no metabolismo da planta através do fator Q10. Altas temperaturas geram alta Rmr que causa maior consumo de reserva, via respiração para manutenção da planta. A variação observada na produtividade, quando se alterou o valor da respiração de manutenção, foi percentualmente menor do que a da alteração do parâmetro, disto pode-se concluir que este modelo é menos sensível às variações da respiração de manutenção do que aos demais parâmetros.

Pela análise dos diferentes módulos considerados no modelo proposto observa-se que estes foram capazes de, no geral, representar adequadamente a tendência de crescimento e acúmulo de matéria seca nos diversos órgãos da cultura do tomateiro. No início do desenvolvimento da cultura até cerca de 99 DAS, os valores observados e simulados foram similares. Após os 99 DAS foi verificado no modelo, constante acréscimo de matéria seca nos órgãos das plantas, enquanto no experimento de campo foi verificado acréscimo de matéria seca somente para frutos e para haste.

Por meio da análise de sensibilidade foi possível determinar que o modelo é sensível a baixos valores do parâmetro eficiência fotossintética. Com relação ao parâmetro fotossíntese máxima, foi verificada variação percentual similar da produtividade quando comparada à variação percentual do parâmetro. O parâmetro respiração de manutenção foi o menos sensível quando teve seu valor alterado. Com os resultados obtidos pela análise de sensibilidade, verificamos a necessidade de novas pesquisas para a determinação dos referidos parâmetros para as condições de clima tropical. Com estes novos valores aplicados ao modelo, novas simulações de produtividade potencial irão apresentar valores mais próximos daqueles observados em cultivos realizados em campo.

O modelo do potencial produtivo do tomateiro desenvolvido apresenta uma enorme possibilidade de uso no meio agrário, científico e governamental, no entanto, se faz necessário o desenvolvimento de novas pesquisas para a criação de sub-modelos (chamados modelos de penalização), que possam tornar os valores obtidos de produção final, mais próximos da realidade. Estes sub-modelos devem ser elaborados para prever e, assim, decrescer no valor potencial final as diversas adversidades as quais são expostas às culturas. Um exemplo de sub-modelo a ser desenvolvido é o de doenças fúngicas que afetam folhas do tomateiro e que, conseqüentemente, contribuem para um decréscimo da produtividade final.

Sugerimos a utilização deste modelo por órgãos governamentais responsáveis pela liberação de crédito a produtores de hortaliças (neste caso tomate). Com este modelo potencial, os referidos órgãos podem selecionar as regiões do país com potencial climático para a produção de tomate, o

que diminuirá os riscos de perda de produção pelos produtores e garantirá a devolução do empréstimo realizado junto aos referidos órgãos.

### Referências Bibliográficas

ACOCK, B.; et al. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: an experimental examination of two canopy models. **Journal of Experimental Botany**, v. 29, n. 111, p. 815-827, 1978.

ANDRIOLO, J.L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Santa Maria: ed. Da UFSM, 1999. 142p.

ATHERTON, J. G.; RUDICH, J. **The tomato crop. A scientific basis for improvement**. Chapman & Hall, New York, 1986.

BERTIN, N. **Environnement climatique, compétition pour lês assimilats et modelisation de la nouaison de la tomate em culture sous serre**. Paris: Institut National Agronomique, 1993. 120p.

BOONEN, C.; et al. Scaling the spatial distribution of photosynthesis from leaf to canopy in a plant growth chamber. **Elsevier Science**, Belgium, v. 156, p. 201-212, 2002.

COSTA, L. C. **Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba**. 1988. 40p. Tese (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa, 1988.

COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 75-82, 2001.

FONTES, P. C. R. **Sugestões de adubação para hortaliças. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Mina Gerais**. 5ª Aproximação. p. 171-174. Viçosa, 1999.

FRANCE, J.; THORNLEY, J. H. M. **Matematic models in agriculture. The quantitative approach to problems in agriculture and related sciences**. London: Butterworth, 1984.

GARY, C.; BAILLE, A.; NAVARRETE, M.;

- ESPANET, R. **Tompousse, un modèle simplifié de prévisión du rendement et du calibre de la tomate.** Séminaire de L'aip "Serres". Alenya. 10p, 1996.
- GYZIN, H. **Interaction between CO<sub>2</sub> uptake and water loss.** In: BAKER, J.C.; BOT, G.P.A.; CHALLA, H.; VAN DE BRAAK, N.J. (eds). Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, pp. 51-62, 1995.
- HEUVELINK, E. **Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis.** Wageningen. Dissertation – Wageningen Agricultural University, 1996. 326p.
- HEUVELINK, E. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. **Annals of Botany**, Haagsteeg, v. 83, p. 413-422, 1999.
- HEUVELINK, E.; DORAIS, M. **Crop Growth and Yield.** In HEUVELINK, E. (eds). Tomatoes. CABI Publishing, Cambridge, USA, pp. 85-145, 2005.
- JONES, J. W.; et al. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 34, p. 663-672, 1991.
- KEULEN, H. V.; WOLF, J. **Modelling of agricultural production: weather, soils and crops.** Wageningen: Pudoc, p.13-26.1986.
- KIMATI, H.; et al. **Doenças das Plantas Cultivadas.** Manual de Fitopatologia. SP: Agronômica Ceres, v. 2, 1997. 774p.
- MARIM, B. G.; SILVA, D. J. H.; GUIMARÃES, M. A.; BELFORT, G. Sistemas de Tutoramento e condução do tomateiro visando produção de frutos para consumo *in natura*. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v. 23, n. 4, p. 951-955, 2005.
- MODELMAKER 2.0 SBTechnology. **Scientific Publishing Limited:** Oxford, GB, 1993, 1994.
- PELUZIO, J. M. **Crescimento e partição de assimilados em tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill) após a poda apical.** 1991, 49p. Tese (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- PELUZIO, J.M.; CASALI, V.W.D.; LOPES, N.F. Partição de assimilados em tomateiro após a poda apical. **Horticultura Brasileira**, v. 13, p. 41-43, 1995.
- PELUZIO, J.M.; et al. Comportamento da Fonte e do Dreno em tomateiro após a poda apical acima do quarto cacho. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 23, n. 3, p.510-514, 1999.
- PENNING DE VIRIES, F. W. T.; et al. **Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops.** Wageningen, Pudoc, 1989. 271p.
- STEVENS, M. A.; RICK, C. M. **Genetics and breeding**, p. 35-110. In: ATHERTON, J. G., RUDICH, J. The Tomato Crop: A scientific basis for improvement. NY: Chapman and Hall, 1986.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 3ª ed, 2004. 719p.
- THORNLEY, J. H.; JOHNSON, I. R. **Plant and crop modeling.** Oxford Science Publications. London: Claredon Press, 1990. 144p.