

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO PARA CONTROLE DA FERTIRRIGAÇÃO DO TOMATEIRO CULTIVADO EM SUBSTRATO¹

ANTONIO J. STEIDLE NETO², SÉRGIO ZOLNIER³, WALDIR A. MAROUELLI⁴,
HERMINIA E. P. MARTINEZ⁵

RESUMO: Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de um sistema de controle automático de fertirrigação para a produção do tomateiro em substrato de areia, comparativamente ao sistema de controle convencional quanto à redução de solução nutritiva. No método de controle automático, os eventos de fertirrigação foram estabelecidos em função das condições meteorológicas do ambiente de cultivo e do estágio de desenvolvimento da cultura. Para isso, o modelo de Penman-Monteith foi utilizado como suporte para a tomada de decisão sobre a frequência adequada para aplicação da solução nutritiva. No sistema de controle convencional, os intervalos entre as fertirrigações permaneceram fixos durante todo o ciclo do tomateiro. Os resultados demonstraram que o sistema de controle automático atendeu plenamente às necessidades hídricas da cultura, sem comprometer a produção do tomateiro, proporcionando reduções expressivas no consumo de solução nutritiva. Por outro lado, o sistema de controle convencional realizou número excessivo de fertirrigações, principalmente durante o estágio inicial de desenvolvimento do tomateiro e nos dias caracterizados por elevada nebulosidade. No estágio inicial de crescimento, verificou-se que os volumes totais de solução nutritiva, aplicados ao tomateiro pelo sistema convencional, excederam as necessidades hídricas da cultura em 1,31 e 1,39 L planta⁻¹ em dias típicos com céu claro e nublado, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: *Lycopersicon esculentum*, hidroponia, solução nutritiva, automação.

PERFORMANCE EVALUATION OF AN AUTOMATIC SYSTEM FOR TOMATO FERTIGATION CONTROL IN SUBSTRATE

ABSTRACT: The objective of this work was to compare the performance of an automatic fertigation control system, for soilless tomato production in sand substrate, as compared to a conventional control system. In the automatic control, fertigation events were established by meteorological conditions in the cultivation environment and crop development stage. In this way, the Penman-Monteith model was utilized as a decision support tool regarding the appropriate frequency for delivering the nutrient solution. In the conventional control system, fertigation intervals remained fixed during the tomato crop cycle. The results demonstrated that the automatic control system attended to the irrigation requirements without affecting crop production, providing important reduction in nutrient solution usage. On the other hand, the conventional control system applied excess irrigation, mainly during the initial crop development period and during cloudy conditions throughout the crop cycle. In the initial growth stage, it was verified that the total volumes of the nutrient solution, applied to tomato plants by the conventional system, exceeded crop water requirements in 1.31 and 1.39 L plant⁻¹ under clear sky and cloudy days, respectively.

KEYWORDS: *Lycopersicon esculentum*, hydroponics, nutrient solution, automation.

¹ Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor. Bolsa de estudos concedida pela CAPES e suporte financeiro do PRODETAB.

² Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia de Biossistemas, UFSJ, Sete Lagoas - MG, Fone (0XX31) 3742-1701.

³ Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG.

⁴ Eng^o Agrícola, Pesquisador Doutor, Embrapa Hortaliças, CNPH, Brasília - DF.

⁵ Eng^a Agrônoma, Profa. Doutora, Departamento de Fitotecnia, UFV, Viçosa - MG.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 23-10-2007

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 22-7-2009

INTRODUÇÃO

Em cultivos hidropônicos, o controle dos eventos de fertirrigação é realizado, normalmente, utilizando-se de temporizadores. Por meio desse sistema de controle, denominado de convencional, a frequência e a duração dos eventos são fixas no decorrer do tempo e estabelecidas com base em recomendações empíricas. Em decorrência disso, pode haver déficit ou excesso de água e de nutrientes, pois não são consideradas as alterações da transpiração, provenientes de modificações das condições meteorológicas do ambiente de cultivo e da expansão foliar ao longo do ciclo da cultura (ROH & LEE, 1996; MAROUELLI et al., 2005).

Os cultivos hidropônicos em substratos e os que se baseiam na técnica do fluxo laminar de nutrientes requerem, usualmente, fertirrigações com alta frequência e curta duração, a fim de garantir às plantas a irrestrita disponibilidade de água e nutrientes (VAN OS, 1999). Nesse sentido, o emprego de sistemas de controle automático dos eventos de fertirrigação, que considerem as variáveis associadas ao ambiente de cultivo e à cultura, assume importância fundamental no crescimento e no desenvolvimento das plantas (STEIDLE NETO, 2007).

De acordo com INIESTA (1999), uma boa prática de manejo em cultivos que empregam substratos é manter constante o volume de solução nutritiva aplicado por evento e variar a frequência das fertirrigações, conforme as necessidades das plantas. Segundo LI et al. (2001), sob condições de casa de vegetação, aproximadamente 90% da água absorvida pelas raízes é consumida pelo processo de transpiração. Assim, estimativas precisas dessa variável possibilitam o controle mais adequado da frequência dos eventos de aplicação de soluções nutritivas em sistemas hidropônicos.

No caso do cultivo do tomateiro em substratos inertes, a maneira mais apropriada para controlar a irrigação é com base na demanda hídrica da cultura, representada pelas estimativas da transpiração, obtidas a partir do modelo de Penman-Monteith (HARMANTO et al., 2005; RINALDI et al., 2007). Dessa forma, o controle dos eventos de fertirrigação, com base na transpiração, pode reduzir o consumo de água e de energia elétrica, diminuir o volume de efluentes em dias nublados, contribuir significativamente na eliminação do estresse hídrico e salino em dias de elevada demanda de água, assim como aumentar a produtividade da cultura e a qualidade dos frutos.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de um sistema de controle automático de fertirrigação, comparativamente a um sistema de controle convencional, durante o cultivo do tomateiro em substrato de areia sob casa de vegetação, visando à redução no consumo de solução nutritiva nesse sistema de cultivo.

MATERIAL E MÉTODOS

Técnicas de cultivo e sistema de aquisição de dados meteorológicos

O cultivo do tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, cv. Duradoro) foi conduzido no período de 10-7-2006 a 10-11-2006, em casa de vegetação localizada na área experimental do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO), no Câmpus da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. As coordenadas geográficas do local de realização do experimento são: latitude 20°45' S, longitude 42°52' W e altitude 690 m.

As mudas do tomateiro foram produzidas em espuma fenólica e, posteriormente, transplantadas em substrato de areia com granulometria entre 1 e 3 mm, acondicionado em vasos plásticos com capacidade individual para 15 L. No fundo de cada vaso, foi feito um orifício circular (27 mm de diâmetro) para permitir a drenagem da solução nutritiva percolada no interior do substrato. Acima do orifício de drenagem, foi colocado um disco de tela plástica, para impedir a saída da areia, 0,5 L de cascalho fino, para melhorar as condições de drenagem, e 9,5 L de areia. Visando a minimizar a perda de água por evaporação, a partir da superfície do substrato, os vasos foram cobertos com filme plástico transparente.

Para possibilitar a aplicação da solução nutritiva diretamente no substrato, junto às raízes das plantas foi utilizado um sistema de fertirrigação do tipo localizado, empregando-se estacas gotejadoras para vasos (vazão média de $1,3 \text{ L h}^{-1}$), que foram conectadas a microtubos flexíveis que derivavam de tubulações de PVC de 20 mm de diâmetro.

O tomateiro foi fertirrigado por meio de ambos os sistemas de controle, com solução nutritiva preparada a partir de duas soluções-estoque concentradas, conforme a formulação recomendada por MORAES & FURLANI (1999), para a cultura do tomateiro nos estádios vegetativo, frutificação e maturação.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, com dois tratamentos, caracterizados pelos sistemas de controle automático e convencional, e quatro repetições. Cada tratamento foi aplicado em 32 plantas, que foram divididas em quatro pares de fileiras, totalizando oito plantas por repetição. As fileiras com plantas foram compostas por quatro vasos, que foram apoiados em blocos de concreto e espaçados de 0,5 m.

Perfis hidropônicos de polipropileno foram instalados embaixo dos vasos, em cada fileira com plantas, para a coleta da solução nutritiva drenada em baldes de 15 L. Os perfis foram dispostos na direção transversal da casa de vegetação com inclinação de 4% no sentido das laterais ao centro da instalação.

Medições das variáveis meteorológicas foram realizadas de maneira ininterrupta no ambiente de cultivo, durante todo o ciclo da cultura, por meio de sensores de velocidade do ar (modelo FMA-903-I, Omega, Stamford, EUA), de temperatura e umidade relativa do ar (modelo Humitter 50Y, Vaisala Inc., Woburn, EUA) e de radiação solar global (modelo CM3, Kipp & Zonen, Delft, Holanda), conectados a uma placa de aquisição de dados (modelo CYDAS 1602HR, CyberResearch, Branford, EUA) instalada na placa-mãe de um computador. Esses sensores foram posicionados em um pedestal de altura regulável, sendo mantidos a 0,5 m acima do dossel vegetativo da cultura.

Descrição do sistema de controle automático

O sistema de controle automático, constituído por componentes hidráulicos, foi associado a sensores, a microbombas de dosagem e a circuitos eletrônicos. Esse sistema foi conectado ao mesmo computador utilizado para a aquisição de dados meteorológicos do ambiente de cultivo.

O conjunto hidráulico era formado, basicamente, por quatro reservatórios plásticos, sendo um utilizado para o armazenamento da solução nutritiva diluída, denominado de reservatório de preparo (30 L), dois para as soluções-estoque concentradas (100 L cada) e outro para a água usada nas diluições (100 L). Na parte inferior da lateral dos reservatórios de água e de soluções-estoque, foram conectadas microbombas para a dosagem exata dos volumes a serem adicionados no reservatório de preparo. Após a diluição das soluções-estoque, a solução nutritiva era aplicada por meio de motobomba (potência de 0,05 cv), cuja função era realizar o recalque da solução até as 32 estacas gotejadoras associadas às plantas do sistema automático (STEIDLE NETO, 2007).

Uma placa de controle (modelo ERA-01, Keithley Instruments Inc., Cleveland, EUA), constituída de relés eletromecânicos e conectada à placa de aquisição de dados, foi utilizada para o acionamento das microbombas de dosagem de água e de soluções-estoque concentradas, assim como da motobomba de fertirrigação.

Visando a minimizar o volume de solução drenada nos vasos de plantas e, conseqüentemente, a contaminação ambiental causada pelo descarte desses efluentes, o sistema automático controlou o tempo de acionamento da motobomba de fertirrigação de maneira a suprir as necessidades hídricas das plantas e permitir que a drenagem fosse de, no máximo, 20% do volume de solução nutritiva aplicada. Esse percentual está em concordância com HOCHMUTH (2001), que considera necessária a aplicação de excesso de 10% a 20% de solução nutritiva para a manutenção de balanço adequado de nutrientes no substrato.

O manejo de fertirrigação preestabelecido na estratégia de controle, conforme sugerido por INIESTA (1999), foi o de manter constante o volume de solução nutritiva aplicado por evento e variar a frequência de fertirrigação.

Com base em observações realizadas em experimento preliminar, foi constatado que, no estágio inicial de crescimento do tomateiro, a maioria das raízes estava concentrada em um volume de substrato de 1 L, aproximadamente. Dessa forma, para a estimativa da duração apropriada dos eventos de fertirrigação, foi determinado, primeiramente, o volume de solução retido em 1.000 cm³ do substrato de areia. Em seguida, foi assumido que, quando ocorresse depleção de 25% desse valor, correspondente a 34,5 ml planta⁻¹ para o substrato em questão, o sistema de fertirrigação deveria ser acionado para repor a água consumida pelo processo de transpiração. No entanto, além disso, o volume total de solução aplicado deveria considerar a necessidade de lixiviação de 20%. Assim, a partir da quantidade de solução retida no substrato, da necessidade de lixiviação e da vazão média das 32 estacas gotejadoras, foi determinado que a duração apropriada dos eventos de fertirrigação deveria ser de aproximadamente 100 s.

A frequência de aplicação da solução nutritiva para o tomateiro foi estabelecida em tempo real, com base nas estimativas de transpiração realizadas por meio do modelo proposto por Penman-Monteith. Informações adicionais sobre a parametrização do modelo para a aplicação em casa de vegetação para a cultura do tomateiro estão descritas em STEIDLE NETO (2007). Nessas estimativas, foram considerados os estádios de desenvolvimento do tomateiro, representados pelos coeficientes de cultura (K_c), as variáveis meteorológicas do ambiente de cultivo e a densidade de plantio das mudas de tomateiro. A variação do K_c ao longo do ciclo do tomateiro foi estimada em função do tempo térmico, determinado pela somatória dos graus-dia acumulados após o transplântio das mudas para os vasos. A temperatura-base considerada no cálculo dos graus-dia para a cultura do tomateiro foi de 10 °C (JONES et al., 1989).

Para o monitoramento das variáveis meteorológicas e estimava da transpiração do tomateiro, em intervalos de um minuto, foi desenvolvido programa computacional utilizando-se da plataforma de programação C++ *Builder* (STEIDLE NETO, 2007). Adicionalmente, o programa realizava o balanço de água, totalizando as transpirações estimadas até que o valor acumulado fosse de 34,5 mL planta⁻¹. Quando essa depleção era alcançada, os relés controlados pelo programa acionavam as microbombas de dosagem a fim de preparar novo volume de solução nutritiva diluída, e, em seguida, um evento de fertirrigação era realizado com a duração necessária para repor o volume consumido pela transpiração das plantas e atender às necessidades de lixiviação.

Descrição do sistema de controle convencional

Nesse sistema de controle, a solução nutritiva era diluída manualmente, a partir de soluções concentradas e, posteriormente, armazenada em reservatório plástico (200 L). Para a aplicação da solução nutritiva, foi conectada ao reservatório uma motobomba de fertirrigação idêntica à do sistema de controle automático, porém controlada por temporizador associado a relé eletromecânico. Essa motobomba era responsável pelo recalque de solução nutritiva até as 32 estacas gotejadoras associadas às plantas do sistema convencional (STEIDLE NETO, 2007).

Apesar de alguns produtores de hortaliças do tipo fruto reduzirem o número de fertirrigações quando o volume de solução nutritiva drenada nos vasos de plantas é excessivo, reprogramando manualmente o temporizador, MAROELLI et al. (2005) relatam que, provavelmente, a maioria adota a mesma frequência e duração das fertirrigações ao longo de todo o ciclo da cultura. Assim, no sistema de controle convencional, condições médias de frequência de fertirrigação, normalmente programadas pela maioria dos produtores de hortaliças do tipo fruto que utilizam substratos, serviram de base para a elaboração do algoritmo de controle. Nesse sentido, a frequência de fertirrigação não foi afetada pelas variáveis meteorológicas internas a casa de vegetação, bem como pelo estágio de desenvolvimento da cultura. Para atender à variação da transpiração do tomateiro ao longo do período diurno, a frequência de fertirrigação do sistema de controle convencional foi implementada como descrito a seguir. Diariamente, a motobomba de fertirrigação era acionada das

7 às 10 h e das 16 às 19 h com intervalos de 30 min. Já nos horários tipicamente mais quentes do dia, compreendidos entre 10 e 16 h, o intervalo entre fertirrigações foi reduzido para 10 min. Adicionalmente, para que o intervalo de tempo entre o último evento de fertirrigação e o primeiro evento do dia seguinte não fosse muito longo, a motobomba também era acionada às 24 h. Similarmente ao sistema de controle automático, a duração de cada evento de fertirrigação foi fixada em 100 s.

Avaliação do desempenho dos sistemas de controle de fertirrigação

Com o propósito de evidenciar as diferenças entre as frequências de fertirrigações e os volumes totais diários de solução nutritiva aplicada pelos sistemas de controle automático e convencional, foram escolhidos dias típicos com céu claro e com nebulosidade intensa, associados aos estádios inicial e final de desenvolvimento do tomateiro. Adicionalmente, considerou-se o consumo total de solução nutritiva ao longo do ciclo do tomateiro para ambos os sistemas de controle.

Na avaliação do desempenho dos sistemas de controle, também foi considerada a produtividade comercial dos frutos de tomate por planta, baseada na classificação regulamentar técnica proposta pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação diária da radiação solar global (R_g), do déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) e da transpiração do tomateiro (T_c) são apresentados na Figura 1. Na parte superior de cada gráfico, também são apresentadas as distribuições diárias dos eventos de fertirrigação, realizados pelos sistemas de controle automático e convencional, correspondentes aos estádios inicial ($K_c = 0,21$ e $0,23$) e final ($K_c = 0,91$) de desenvolvimento do tomateiro, para dias típicos com céu claro e nublado em Viçosa, Minas Gerais.

Nos dias 25 e 30-7, o tomateiro encontrava-se no estágio inicial de desenvolvimento, com coeficiente da cultura (K_c) entre 0,21 e 0,23. Por outro lado, nos dias 5 e 13-9, o tomateiro havia alcançado o estágio de desenvolvimento pleno, com K_c de 0,91 para ambas as datas.

No estágio inicial de desenvolvimento da cultura, independentemente das condições meteorológicas predominantes no interior da casa de vegetação, tanto no dia típico com céu claro (25-7) como em condições com céu nublado (30-7), constataram-se diferenças marcantes entre os sistemas de controle automático e convencional, no que se refere ao número de fertirrigações e, conseqüentemente, ao volume total de solução nutritiva aplicada ao tomateiro. A magnitude dessas diferenças deve ser atribuída à moderação da transpiração pelo coeficiente K_c , o qual possibilitou que o sistema de controle automático estimasse adequadamente as necessidades hídricas da cultura. Além do K_c , a transpiração foi afetada pela radiação solar global (R_g) e pelo déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}). Os valores máximos medidos de R_g e do DPV_{ar} atingiram 450 W m^{-2} e $1,3 \text{ kPa}$ no dia 25-7, respectivamente. Já no dia 30-7, os valores máximos foram de 120 W m^{-2} e $0,7 \text{ kPa}$. Por outro lado, a transpiração máxima estimada pelo modelo de Penman-Monteith foi de $0,6$ e $0,3 \text{ mL planta}^{-1} \text{ min}^{-1}$ para os dias típicos com céu claro e com alta nebulosidade, respectivamente.

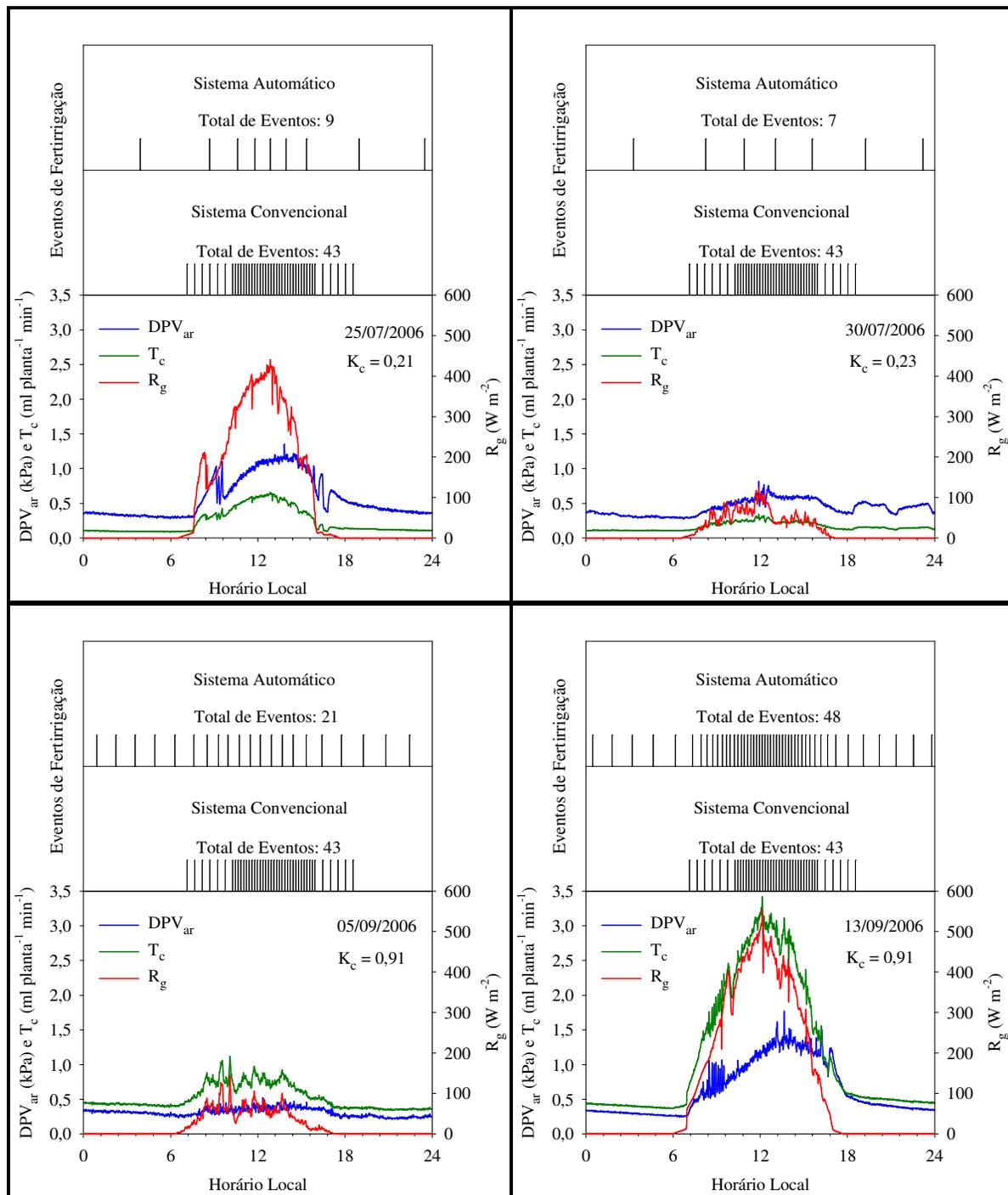


FIGURA 1. Eventos de fertirrigação realizados pelos dois sistemas de controle avaliados e variação diária da radiação solar global (R_g), do déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) e da transpiração do tomateiro (T_c) sob casa de vegetação, correspondentes aos estádios inicial ($K_c=0,21$ e $0,23$) e final ($K_c=0,91$) de desenvolvimento da cultura, para dias típicos com céu claro e nublado, em Viçosa - MG. **Fertigation events carried out by the two evaluated control systems and daily variation of the global solar radiation (R_g), of the vapor pressure deficit of the air (DPV_{ar}) and of the tomato transpiration (T_c) under greenhouse, corresponding to the initial growth stage of the crop ($K_c=0,21$ and $0,23$) and the final one ($K_c=0,91$), considering typical clear sky and cloudy days in Viçosa, Minas Gerais (Brazil).**

O sistema de controle convencional, preestabelecido para suprir a demanda hídrica no estágio final de desenvolvimento do tomateiro, em dias caracterizados por altos valores de radiação solar global e de déficit de pressão de vapor d'água no ar, realizou fertirrigações excessivas no período inicial de crescimento, muito além das necessidades hídricas das plantas. Com base no número de eventos de fertirrigação e na vazão das estacas gotejadoras, estimou-se que os volumes totais de solução nutritiva aplicada ao tomateiro excederam às necessidades hídricas da cultura em 1,31 e 1,39 L planta⁻¹ nos dias 25-7 e 30-7, respectivamente, em relação ao sistema de controle automático. Apesar de promover a remoção do excesso de sais fertilizantes acumulados no substrato, essas fertirrigações resultaram em gasto desnecessário de água e de nutrientes, com consequente aumento no volume de efluentes nos vasos submetidos ao sistema de controle convencional e, indiretamente, maior consumo de energia elétrica. Esses resultados estão em concordância com o mencionado por PUGLIESI (2003) para cultivos hidropônicos, nos quais a frequência de fertirrigações é controlada por meio de temporizadores programados com base em recomendações empíricas.

No estágio final de desenvolvimento da cultura do tomateiro ($K_c = 0,91$), as diferenças nas frequências dos eventos e nos volumes totais de fertirrigações entre os sistemas de controle automático e convencional, tanto para o dia típico com céu nublado (5-9) quanto para o dia típico com céu claro (13-9), não foram muito expressivas, comparadas às observadas no estágio inicial de desenvolvimento do tomateiro. Especificamente no dia 13-9, houve déficit no número de fertirrigações realizadas pelo sistema de controle convencional de, aproximadamente, 10% em relação às fertirrigações do sistema automático, o que representou redução no volume total de solução nutritiva requerido pela cultura de quase 0,19 L planta⁻¹. Entretanto, no dia típico de céu nublado (5-9), o número de fertirrigações realizadas pelo sistema de controle convencional superestimou bastante as reais exigências hídricas das plantas, causando desperdício de 0,85 L planta⁻¹ de solução nutritiva, assim como de energia elétrica para o acionamento dos equipamentos do sistema.

No dia 5-9, os valores máximos medidos de R_g e do DPV_{ar} atingiram 150 W m⁻² e 0,4 kPa, respectivamente. Já no dia 13-9, os valores máximos foram de 550 W m⁻² e 1,8 kPa. Por outro lado, a transpiração máxima estimada foi de 1,1 e 3,4 mL planta⁻¹ min⁻¹ para os dias típicos com alta nebulosidade e com céu claro, respectivamente.

Comparando o número de fertirrigações efetuadas pelo sistema de controle automático nos dias típicos com nebulosidade (5-9) e com céu claro (13-9), verificou-se diferença de 27 fertirrigações, o que representa percentual de 56% de eventos a menos no dia com céu nublado, em relação ao com céu claro, para o mesmo estágio de desenvolvimento da cultura. Em contraste com o período inicial de crescimento, essa diferença marcante no número de fertirrigações do sistema de controle automático deve ser atribuída, exclusivamente, às condições meteorológicas predominantes nesses dias.

Analisando-se isoladamente os dias típicos com céu claro (25-7 e 13-9), constata-se que o sistema de controle automático intensificou as fertirrigações nos horários próximos ao meio-dia, em resposta às altas taxas de transpiração. Inversamente, nos dias típicos com alta nebulosidade (30-7 e 5-9), as fertirrigações estiveram mais bem distribuídas ao longo do período diurno, em função da maior uniformidade da demanda hídrica da cultura. Portanto, o sistema de controle automático ajustou de maneira eficiente e em tempo real a frequência dos eventos de fertirrigação, conforme as necessidades das plantas. Esses resultados estão em concordância com os obtidos por HARMANTO et al. (2005) que, estimando os requerimentos hídricos do tomateiro sob condições de casa de vegetação, por meio do modelo de Penman-Monteith, confirmaram que as necessidades diárias de irrigação oscilam em função das condições meteorológicas do ambiente de cultivo e do estágio de desenvolvimento das plantas.

Fertirrigações excessivas, conforme as observadas nos dias 25 e 30-7 e 5-9, ou insuficientes, verificadas no dia 13-9, são normalmente constatadas quando o controle de aplicação da solução

nutritiva é temporizado (ROH & LEE, 1996). Assim, nos cultivos hidropônicos, em que a solução nutritiva drenada não é recirculada, o elevado volume de efluentes pode causar prejuízos financeiros e ambientais.

Na Tabela 1, são apresentadas as produtividades comerciais do tomateiro, referentes aos sistemas de controle automático e convencional. Apesar de ter sido constatado incremento médio de 16% na produtividade comercial do tomateiro cultivado com o sistema de controle automático em relação ao convencional, não foi verificada diferença significativa ($p > 0,05$) entre os sistemas de controle de fertirrigação devido ao erro experimental. Em estudos conduzidos em casa de vegetação, MAROUELLI et al. (2001) encontraram erros experimentais mais elevados, principalmente os relacionados à fertirrigação. De acordo com HANAN (1998), a transpiração diferencial no interior da casa de vegetação pode ser atribuída à estrutura da instalação e aos movimentos convectivos no ambiente de cultivo. A variação da transpiração, por sua vez, afeta a condutividade elétrica do substrato entre as parcelas experimentais e, portanto, o desempenho produtivo das plantas.

TABELA 1. Produtividade comercial do tomateiro cultivado em substrato de areia para os sistemas de controle automático e convencional de fertirrigação. **Commercial productivity of the tomato cultivated in sand substrate for the automatic and conventional fertigation control systems.**

	Sistema de Controle de Fertirrigação	
	Automático	Convencional
Produtividade comercial (kg planta ⁻¹)	2,58 (± 0,26)	2,18 (± 0,40)
Massa média de frutos grandes (g fruto ⁻¹)	247,55 (± 7,28)	245,40 (± 6,85)
Massa média de frutos médios (g fruto ⁻¹)	171,01 (± 3,63)	168,57 (± 5,56)
Massa média de frutos pequenos (g fruto ⁻¹)	85,11 (± 3,66)	84,65 (± 3,93)

Valores entre parênteses representam os desvios-padrão das repetições.

Todas as médias não diferiram significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste "F".

Muito embora PEET & WILLITS (1995) afirmem que eventos excessivos podem causar redução na produtividade e maior suscetibilidade a rachaduras na película dos frutos do tomateiro, o que não foi observado neste trabalho, também não foi verificado efeito significativo do tipo de sistema de controle de fertirrigação sobre a massa média de frutos das classes grande, médio e pequeno.

Considerando o período de 120 dias, ao longo do qual as plantas de tomateiro foram cultivadas, os sistemas de controle automático e convencional aplicaram 133,4 L planta⁻¹ e 200,8 L planta⁻¹, respectivamente, resultando em diferença de 67,4 L planta⁻¹.

A adoção de sistema de controle automático de fertirrigação, baseado em estimativas da transpiração da cultura, semelhante ao avaliado neste trabalho, além de proporcionar incrementos na produtividade, permite reduzir os custos com água, energia elétrica e fertilizantes e, por conseguinte, impactos ambientais, por minimizar a aplicação excessiva de solução nutritiva.

CONCLUSÕES

O sistema de controle automático, baseado na estimativa da transpiração da cultura do tomateiro a partir do modelo de Penman-Monteith, atendeu adequadamente às necessidades hídricas das plantas. Em decorrência disso, foram evitadas fertirrigações desnecessárias e, conseqüentemente, desperdícios de solução nutritiva, principalmente nos momentos de baixa demanda hídrica. Ao contrário, o sistema de controle convencional realizou número excessivo de fertirrigações, causando elevado consumo de solução nutritiva, principalmente durante o estágio inicial de desenvolvimento do tomateiro e nos dias caracterizados por elevada nebulosidade.

Portanto, o sistema de controle automático mostrou ter grande potencial para proporcionar maior economia de água, fertilizantes e energia elétrica em relação aos sistemas de controle temporizados.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SARC nº 085, de 6 de março de 2002. Regulamento técnico de identidade e qualidade para classificação do tomate. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, mar. 2002. consulta pública.
- HANAN, J.J. *Greenhouses - Advanced technology for protected horticulture*. Boca Raton: CRC Press LLC, 1998. 684 p.
- HARMANTO; SALOKHE, V.M.; BABEL, M.S.; TANTAU, H.J. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.71, n.3, p.225-242, 2005.
- HOCHMUTH, G.J. Irrigation of greenhouse vegetables. In: _____. *Florida greenhouse vegetable production handbook*. Gainesville: University of Florida, 2001. v.3, 5 p.
- INIESTA, T.M. Automatismos y sensores de actuación. In: FERNÁNDEZ, F.M.; GÓMEZ, I.M.C. *Cultivos sin suelo II*. Almeria: Dirección General de Investigación y Formación Agraria, 1999. p.321-332.
- JONES, J.W.; DAYAN, E.; JONES, P.; SEGNER, I.; ALLEN, L.H.; ZIPORI, I. On-line computer control system for greenhouses under high radiation and temperature zones. Gainesville: Agricultural Engineering Department, University of Florida, 1989. p.871-874.
- LI, Y.L.; STANGHELLINI, C.; CHALLA, H. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v.88, n.1, p.11-29, 2001.
- MAROUELLI, W.A.; CALBO, A.G.; CARRIJO, O.A. Avaliação de sensores do tipo IRRIGAS® para o controle da irrigação em hortaliças cultivadas em substrato. *Revista Irriga*, Botucatu, v.10, n.1, p.88-95, 2005.
- MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; CARRIJO, O.A.; SOUZA, A.F. Fontes de N para fertirrigação do tomateiro em ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.19, n.1, 2001. Suplemento. 1 CD-ROM.
- MORAES, C.A.G.; FURLANI, P.R. Cultivo de hortaliças de frutos em hidroponia em ambiente protegido. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.20, n.200-201, p.105-113, 1999.
- PEET, M.M.; WILLITS, D.H. Role of excess water in tomato fruit cracking. *Horticultural Science*, Alexandria, v.30, n.1, p.65-68, 1995.
- PUGLIESI, N.L. *Capacidade de retenção e frequência de aplicação de solução nutritiva ao sistema radicular da alface em cultivo hidropônico (NFT)*. 2003. 98 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.
- RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model: a case study from Southern Italy. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.87, n.1, p. 91-105, 2007.
- ROH, M.Y.; LEE, Y.B. Control of amount and frequency of irrigation according to integrated solar radiation in cucumber substrate culture. *Acta Horticulturae*, Wageningen, v.440, n.1, p.332-337, 1996.
- STEIDLE NETO, A.J. *Sistema computadorizado para preparo e aplicação de soluções nutritivas com base na estimativa da transpiração do tomateiro cultivado em casa de vegetação*. 2007. 159 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2007.

VAN OS, E.A. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. *Water Science Technology*, Oxford, v.39, n.1, p.105-112, 1999.