

Frações ótimas da adubação com fósforo no pré-plantio e na fertirrigação por gotejamento de tomateiro

Waldir Aparecido Marouelli⁽¹⁾, Tadeu Gracioli Guimaraes⁽²⁾, Marcos Brandão Braga⁽¹⁾
e Washington Luiz de Carvalho e Silva⁽¹⁾

⁽¹⁾Embrapa Hortaliças, Caixa Postal 218, CEP 70359-970 Brasília, DF, Brasil. E-mail: waldir.marouelli@embrapa.br, marcos.braga@embrapa.br, wash.silva@uol.com.br ⁽²⁾Embrapa Cerrados, Caixa Postal 08223, CEP 73310-970 Planaltina, DF, Brasil. E-mail: tadeu.gracioli@embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi estabelecer frações ótimas da dosagem total de fósforo, a serem aplicadas no pré-plantio e na fertirrigação do tomateiro de crescimento determinado, bem como determinar o efeito das diferentes formas de aplicação do nutriente sobre sua distribuição espacial no solo. Os tratamentos consistiram de cinco esquemas de aplicação do fertilizante: 100, 75, 50, 25 e 0% da dose total de P, dividida entre o pré-plantio (superfosfato triplo incorporado ao solo) e a fertirrigação (ácido fosfórico). O experimento foi realizado em Latossolo Vermelho argiloso com duas classes de disponibilidade de P – 7,5 e 32,9 mg dm⁻³ (Mehlich-1). Os tratamentos não apresentaram efeito sobre as variáveis de produção do tomateiro cultivado no solo com alta disponibilidade de P. Entretanto, no solo com menor disponibilidade do nutriente, a fertirrigação com P apresentou efeito quadrático sobre a produtividade de frutos, a receita líquida e a taxa líquida de retorno. Os melhores resultados foram obtidos com a aplicação de metade da dose total de P pela fertirrigação. A fertirrigação possibilitou movimento vertical do nutriente no solo para até 30 cm de profundidade, e movimento horizontal de até 15 cm.

Termos para indexação: *Solanum lycopersicum*, análise econômica, crescimento determinado, distribuição espacial no solo, parcelamento da adubação, tomate para processamento.

Optimal fractions of phosphorus fertilizer applied in preplanting and in drip fertigation of tomato crop

Abstract – The objective of this work was to establish the optimal fractions of the total amount of phosphorus to be applied in preplanting and in drip fertigation of determinate-growth tomato, as well as to determine the effect of the different forms of nutrient application on their soil spatial distribution. Treatments consisted of five schemes of fertilizer application: 100, 75, 50, 25, and 0% of P total dose divided between the pre-planting (triple superphosphate in band placement) and the fertigation (phosphoric acid). The experiment was carried out in a clayed Oxisol with two P availability classes – 7.5 and 32.9 mg dm⁻³ (Mehlich-1). The treatments showed no effect on tomato production variables in the soil with high P availability. However, in the soil with smaller availability of the nutrient, P fertigation showed a quadratic effect on fruit yield, net income, and net rate of return. The best results were obtained with half of the P total dose applied by fertigation. The fertigation allowed P movement in the soil up to 30 cm deep, and horizontal movement up to 15 cm.

Index terms: *Solanum lycopersicum*, economic analysis, determinate growth, soil spatial distribution, split fertilization, processing-tomatoes.

Introdução

Associada à prática de fertirrigação, a irrigação por gotejamento possibilita incrementos de até 30% de produtividade do tomateiro de crescimento determinado, em comparação à aspersão, além de reduzir o uso de água e a ocorrência de doenças da parte aérea (Marouelli et al., 2003, 2012; Hebbar et al., 2004). Como a irrigação por gotejamento concentra as raízes do tomateiro em um volume de solo muito menor do que a irrigação

por aspersão (Marouelli et al., 2013), o gotejamento sem o uso da fertirrigação concorre para a redução da eficiência do sistema produtivo e pode não resultar em ganhos compensadores ao sistema de produção (Hebbar et al., 2004; Shedeed et al., 2009).

Convencionalmente, a aplicação de fósforo é feita no sulco de plantio, e os principais argumentos para evitar seu uso via fertirrigação são: menor custo dos fertilizantes fosfatados convencionais, entupimento de gotejadores, baixa mobilidade do P no solo e

menor probabilidade de aumento da produtividade (Hochmuth & Smajstrla, 2003; Hebbbar et al., 2004; Marouelli et al., 2012).

Segundo Mohammad et al. (2004), a aplicação de P de forma localizada, em pré-plantio, possibilita a ocorrência de altos teores iniciais de P na solução do solo, adequados ao crescimento radicular das plantas. Entretanto, a disponibilidade de P diminui ao longo do ciclo de cultivo, em razão das reações de precipitação e adsorção dos íons de fosfato no solo, processos que dão origem a formas menos solúveis ou insolúveis do nutriente. Carrijo & Hochmuth (2000) verificaram aumento da produtividade do tomateiro, com o uso de P via fertirrigação por gotejamento, em solo com $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P (Mehlich-1). Contudo, em solo com 48 mg dm^{-3} de P, os autores não constataram diferenças de produtividade entre a fertilização convencional e a fertirrigação com P.

Embora alguns estudos tenham evidenciado que a aplicação de P via fertirrigação pode aumentar significativamente a produtividade de diversas culturas (Carrijo & Hochmuth, 2000; Mohammad et al., 2004; Enciso-Medina et al., 2007), eles foram conduzidos em solos de clima temperado e não avaliaram a aplicação de parte do P em pré-plantio e parte via fertirrigação. Como a resposta das culturas à adubação fosfatada é fortemente influenciada pela capacidade de adsorção de P ao solo, novas pesquisas devem ser conduzidas em condições específicas de solo e de cultivo (Shedeed et al., 2009; Zhang et al., 2010; Rehim et al., 2012). Nesse contexto, não se encontraram estudos sobre métodos e formas de parcelamento da aplicação de P à cultura do tomate, em solos distróficos de Cerrado, que tenham associado a aplicação convencional ao sulco, em pré-plantio, à adubação complementar via fertirrigação por gotejamento.

O objetivo deste trabalho foi estabelecer frações ótimas da dosagem total de fósforo, a serem aplicadas no pré-plantio e na fertirrigação do tomateiro de crescimento determinado, bem como determinar o efeito das diferentes formas de aplicação do nutriente sobre sua distribuição espacial no solo.

Material e Métodos

Dois experimentos foram realizados no campo experimental da Embrapa Hortaliças, Distrito Federal, em solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, fase cerrado, de textura argilosa (580

g kg^{-1} argila, 350 g kg^{-1} silte e 7 g kg^{-1} areia), sendo um em 2002 e outro em 2003.

Os tratamentos, em ambos os experimentos, consistiram de cinco esquemas de parcelamento da dose total de P: 100, 75, 50, 25 e 0% do P, fornecidos via fertirrigação por gotejamento, e as frações complementares fornecidas de modo convencional no sulco de plantio, antes do transplante das mudas. A fonte de P usada em pré-plantio foi o superfosfato triplo e, na fertirrigação, o ácido fosfórico.

No primeiro experimento, o híbrido Heinz 9498 foi cultivado em solo com classe de disponibilidade de P (Mehlich-1) muito alta ($\geq 18,0 \text{ mg dm}^{-3}$, Cantarutti et al. 2007) e, no segundo experimento, o híbrido Heinz 9992 foi cultivado em solo com classe de disponibilidade baixa ($4,1\text{--}8,0 \text{ mg dm}^{-3}$).

Antes da adubação de pré-plantio, 20 amostras simples foram retiradas do solo, da camada de 0–20 cm de profundidade, em cada área experimental. A variabilidade espacial dos atributos de fertilidade nas áreas dos experimentos não foi significativa, tendo-se observado médias, para os experimentos 1 e 2, respectivamente, de: pH, 6,2 e 6,0; P (Mehlich-1), $32,9$ e $7,5 \text{ mg dm}^{-3}$; K, 244 e 208 mg dm^{-3} ; Na, 34 e 26 mg dm^{-3} ; Ca, $4,8$ e $4,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg, $1,5$ e $1,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Al, $0,00$ e $0,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H + Al, $6,0$ e $5,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; e matéria orgânica, $36,9$ e $33,1 \text{ g dm}^{-3}$. No experimento 2, avaliaram-se as concentrações de P nas camadas de 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–35 e 35–40 cm de profundidade, tendo-se obtido os valores de $7,5$, $8,8$, $7,7$, $6,1$, $4,2$, $3,5$, $1,7$ e $0,7 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente.

As mudas, em ambos os experimentos, foram transplantadas no espaçamento de 120 cm entre fileiras, e de 30 cm entre plantas, na primeira quinzena de maio, início da estação seca na região. As parcelas experimentais foram constituídas de quatro fileiras de 6,0 m de comprimento, que totalizaram 80 plantas, distribuídas em $28,8 \text{ m}^2$ de área. Para a análise da produção, colheram-se os frutos na parcela útil, constituída pelas plantas presentes nos 5,0 m centrais das duas fileiras internas de cada parcela.

Em ambos os experimentos, aplicaram-se: 200 kg ha^{-1} de N; 250 kg ha^{-1} de K_2O ; 160 kg ha^{-1} de Ca; 40 kg ha^{-1} de Mg; 5 kg ha^{-1} de Zn; e 2 kg ha^{-1} de B. No caso do P, aplicaram-se 400 kg ha^{-1} de P_2O_5 , no experimento 1, e 600 kg ha^{-1} no experimento 2. Das doses totais, 15% de N, 15% de K, 60% de

Ca, 100% de Mg, 100% de Zn e 100% de B foram incorporados ao solo, no sulco de plantio, antes do transplante das mudas. O restante das doses de N, K e Ca foram fornecidos semanalmente via fertirrigação, tendo-se aplicado as mesmas quantidades de N e K, da 2^a à 13^a semana, e de Ca, da 5^a à 12^a semana após o transplante. Para a fertilização convencional, a quantidade de P aplicada foi incorporada no sulco de plantio, juntamente com os demais fertilizantes, antes do transplante. Para as parcelas que receberam P via fertirrigação, adotou-se esquema de parcelamento linear, com aplicação semanal das mesmas doses de P entre a 1^a e a 13^a semana. Os seguintes fertilizantes foram empregados: nitrato de potássio e de cálcio; ureia; sulfato de potássio, de magnésio e de zinco; cloreto de cálcio; cal hidratada; superfosfato triplo; ácido fosfórico; e bórax.

As irrigações foram aplicadas com uso de uma linha lateral de gotejadores, por fileira de plantas, com emissores espaçados em 30 cm. Os turnos de rega e as lâminas de irrigação, determinadas a partir da evaporação de tanque classe A, foram estabelecidos conforme Marouelli et al. (2012). Todas as parcelas foram irrigadas no mesmo dia e com a mesma lâmina d'água.

Para controlar a quantidade de nutrientes aplicada, o fornecimento de água aos tubos gotejadores das parcelas de um mesmo tratamento foi individualizado com tubulação de PVC de 32 mm. A injeção da solução fertilizante na tubulação foi realizada por bomba injetora de ação hidráulica por pistão, instalada no centro da área experimental.

A colheita foi realizada manualmente, em uma única operação, quando a proporção de frutos maduros atingiu 95%: aos 115 dias após o transplante (DAT), no experimento 1; e aos 118 DAT, no experimento 2.

As variáveis avaliadas foram: teor de P foliar; crescimento de plantas; estande final; produção de biomassa; produtividade comercial; número de frutos comerciais por planta; massa de frutos comerciais; percentagem de frutos verdes, podres e refugos; e teor de sólidos solúveis totais. Consideraram-se frutos comerciais os que se encontravam maduros, sem danos graves, e com diâmetro acima de 20 mm. A distribuição espacial e o teor médio de P no perfil do solo foi avaliada apenas no experimento 2, após a colheita dos frutos.

O teor de P total na matéria seca foliar foi determinado aos 45 e aos 80 DAT, no experimento 1, e aos 70 e 85 DAT no experimento 2. A avaliação foi feita na 3^a folha recém-formada a partir do ápice, coletada em um dos ramos, em quinze plantas de cada parcela útil. A análise, que utilizou digestão nitroperclórica com adição de peróxido de hidrogênio para dosagem de P, foi realizada pelo Laboratório de Nutrição Vegetal da Embrapa Hortaliças.

O crescimento, expresso pelo produto entre altura e diâmetro de copa das plantas, foi avaliado aos 14 e 28 DAT, em vinte plantas de cada parcela. A altura foi medida com as plantas em posição natural, e o diâmetro representou a largura máxima das ramas.

A produção de biomassa da parte aérea remanescente após a colheita foi determinada por pesagem, após a secagem de caules e folhas a 60 °C. A percentagem de frutos verdes, refugos e podres foi expressa com base na massa. O teor de sólidos solúveis totais foi medido com refratômetro digital, a partir de uma amostra da massa homogeneizada por trituração de 15 frutos maduros inteiros.

A distribuição espacial de P no perfil do solo, no experimento 2, foi medida na primeira semana após a colheita, nas parcelas úteis dos tratamentos que receberam 0, 50 e 100% de P via fertirrigação. As amostras de solo foram coletadas ao longo dos eixos transversal e longitudinal de uma fileira central de plantas, a partir de um gotejador localizado entre duas plantas, em camadas de 5 cm até 40 cm de profundidade. No eixo transversal, foram tomadas amostras a cada 7 cm, até a distância de 28 cm do gotejador, enquanto, no eixo longitudinal, as amostras foram obtidas a cada 5 cm até 15 cm do gotejador. Segundo Marouelli et al. (2013), entre 80 e 85% das raízes do tomateiro concentram-se nesse perfil de solo avaliado.

Para amostragem do solo, foram abertas trincheiras nos eixos transversal e longitudinal da fileira de plantas. A coleta das amostras foi feita com auxílio de trado tipo meia-cana, com 28 mm de diâmetro. O trado era introduzido horizontalmente, por 5 cm, na parede da trincheira. As amostras foram retiradas de duas posições centrais de cada parcela, em ambos os lados do gotejador, tendo-se utilizado as quatro subamostras, obtidas de uma mesma posição, para obtenção de uma amostra composta após a homogeneização. O teor médio de P (Mehlich-1) no perfil do solo foi

determinado pela média aritmética dos teores obtidos de cada amostra no tratamento.

Utilizou-se o delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições, em ambos os experimentos. Os dados foram submetidos à análise de variância e, no caso de significância dos tratamentos a 5% de probabilidade, as médias foram ajustadas a regressões por polinômios ortogonais. Como as classes de disponibilidade de P no solo e as cultivares de tomate, nos experimentos 1 e 2, foram distintas, os dados foram analisados separadamente.

Além da análise estatística, realizou-se a análise financeira, relativa aos custos com fertilizantes em ambos os experimentos, assim como a análise da eficiência econômica dos tratamentos. Para tal, considerou-se o tomate destinado para processamento em Goiás, principal estado produtor (Carvalho & Campos, 2009). As análises foram expressas em reais por hectare (R\$ ha⁻¹), e todos os custos e preços referem-se à safra de 2013.

O custeio parcial, relativo aos dispêndios de custeio incorridos na condução da cultura, colheita e transporte da produção – com exceção dos fertilizantes –, foi obtido junto à agroindústria de processamento de Goiás, e correspondeu a R\$ 5.580,00 por hectare.

Obtidos a partir de cotações feitas em três fornecedores, no mercado de Goiás, os preços dos fertilizantes foram os seguintes: nitrato de potássio, R\$ 3,04 kg⁻¹; nitrato de cálcio, R\$ 1,38 kg⁻¹; ureia, R\$ 1,20 kg⁻¹; sulfato de potássio, R\$ 2,58 kg⁻¹; sulfato de magnésio, R\$ 0,75 kg⁻¹; sulfato de zinco, R\$ 1,76 kg⁻¹; cloreto de cálcio, R\$ 1,92 kg⁻¹; cal hidratada, R\$ 0,32 kg⁻¹; superfosfato triplo, R\$ 1,30 kg⁻¹; ácido fosfórico, R\$ 2,29 kg⁻¹; e bórax, R\$ 2,15 kg⁻¹.

Os custos com a colheita (R\$ 20,00 Mg⁻¹) e o transporte (R\$ 30,00 Mg⁻¹) foram estimados com base na produção de tomate entregue na agroindústria, conforme previsto nos contratos de integração (Carvalho & Campos, 2009). Esses valores, bem como o preço médio do tomate pago ao produtor (R\$187,00 Mg⁻¹) com inclusão do prêmio por qualidade, foram obtidos junto à agroindústria. Assim, o valor do custeio total incluiu o custeio parcial, mais os custos com fertilizantes, colheita e transporte.

A receita bruta foi determinada pela multiplicação da produtividade comercial pelo preço da tonelada do produto. A análise econômica de curto prazo foi efetivada pelos indicadores de renda líquida (diferença

entre custeio total e receita bruta) e da taxa líquida de retorno (relação entre renda líquida e custeio total).

Resultados e Discussão

As variáveis avaliadas no experimento 1, com a disponibilidade muito alta do nutriente no solo (32,9 mg dm⁻³), não foram significativamente influenciadas pelo método de fertilização ou pelo fracionamento (0, 25, 50, 75 e 100%) da adubação com P no pré-plantio e na fertirrigação. Os seguintes valores médios das variáveis foram observados: crescimento de planta de 287,1 cm², aos 14 DAT, e de 1.913,9 cm² aos 28 DAT; teor de P total na matéria seca foliar de 2,3 g kg⁻¹, aos 45 DAT, e de 1,5 g kg⁻¹ aos 80 DAT; estande final de 27,2 mil plantas por hectare; produção de biomassa de 2,49 Mg ha⁻¹; produtividade comercial de 109,9 Mg ha⁻¹; 53,8 frutos comerciais por planta; massa de frutos comerciais de 74,9 g; 3,4% de frutos verdes, 3,6% de frutos podres e 7,9% de frutos refugos; e sólidos solúveis totais de 5,5°Brix. Estes resultados são similares aos relatados por Carrijo & Hochmuth (2000) e Hebbbar et al. (2004), que verificaram que o método de fertilização não afeta a produtividade do tomateiro em solos com 48 e 40 mg dm⁻³ de P, em experimentos com aplicação convencional de todo o P em pré-plantio ou via fertirrigação, respectivamente.

O custo total com fertilizantes apresentou pequeno incremento em razão do aumento da fração de P aplicada via fertirrigação (Tabela 1). Em relação à aplicação de 100% do P em pré-plantio, com superfosfato triplo, a aplicação de todo o P via fertirrigação, com ácido fosfórico, aumentou em 1,7% o custo da fertilização.

Tabela 1. Análise financeira dos custos totais com fertilizantes, usados na adubação convencional em pré-plantio ou via fertirrigação do tomateiro, conforme o esquema de parcelamento de P usado nos experimentos 1 e 2.

Variável	Porcentagem de P total aplicada via fertirrigação ⁽¹⁾				
	0	25	50	75	100
	Experimento 1 (classe de P muito alta, 39 mg dm ⁻³)				
Custo (R\$ ha ⁻¹)	4.394,75	4.412,91	4.431,08	4.449,24	4.467,40
Aumento de custo (%) ⁽²⁾	0,0	0,4	0,8	1,2	1,7
	Experimento 2 (classe de P baixa, 7,5 mg dm ⁻³)				
Custo (R\$ ha ⁻¹)	5.239,20	5.266,44	5.293,68	5.320,93	5.348,17
Aumento de custo (%)	0,0	0,5	1,0	1,6	2,1

⁽¹⁾Ácido fosfórico foi fonte de P via fertirrigação, e superfosfato triplo, em pré-plantio.⁽²⁾Aumento de custo em relação ao tratamento 0% de P via fertirrigação (100% de P em pré-plantio).

A despeito da variação dos custos totais com fertilizantes, entre os diferentes tratamentos, ter sido inferior a 2%, Reyes et al. (2008) relatam que o custo operacional da adubação convencional é menor do que o custo da fertilização via fertirrigação. Além do maior custo operacional, a aplicação de P via fertirrigação representa risco potencial de obstrução de gotejadores, sobretudo se Ca e Mg estiverem presentes em quantidades significativas na água de irrigação (Hochmuth & Smajstrla, 2003; Hebbar et al., 2004).

No experimento 2, em solo com baixa disponibilidade de P ($7,5 \text{ mg dm}^{-3}$), os tratamentos apresentaram efeito significativo sobre o crescimento inicial das plantas, o teor foliar de P aos 70 DAT, a produtividade comercial e a massa média de frutos comerciais. Contudo, os tratamentos não afetaram as seguintes variáveis: o teor foliar de P aos 85 DAT (média de $1,5 \text{ g kg}^{-1}$); o estande final (média de 27,7 mil plantas por hectare); a produção de biomassa da parte aérea ($2,78 \text{ Mg ha}^{-1}$); a produtividade de frutos comerciais ($79,3 \text{ Mg ha}^{-1}$); a percentagem de frutos verdes (3,5%), de frutos podres (2,6%) e de frutos refugos (média de 6,9%) por planta; e o teor de sólidos solúveis totais (média de $5,5^\circ\text{Brix}$).

O crescimento inicial das plantas, avaliado aos 14 e 28 DAT, diminuiu linearmente com o aumento da percentagem de P aplicada via fertirrigação (Figura 1). O crescimento das plantas que receberam todo P em pré-plantio foi 63 e 76% maior do que o crescimento das que receberam todo o P via fertirrigação, respectivamente para as avaliações aos 14 e 28 DAT.

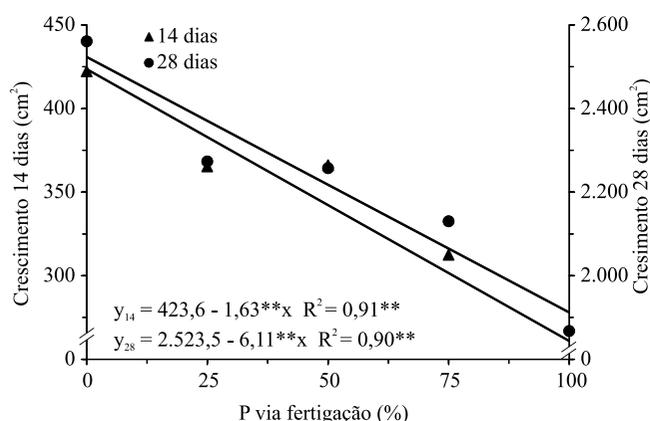


Figura 1. Crescimento de plantas (altura de planta multiplicada pelo diâmetro de copa), aos 14 e 28 dias após o transplante, em função da percentagem de P aplicada via fertirrigação ao tomateiro, no experimento 2.

Diferentemente do que foi observado no experimento 1, a disponibilidade inicial de P era bem menor no solo do experimento 2, o que limitou o crescimento inicial das plantas nos tratamentos em que parte do P foi fornecida via fertirrigação.

O teor foliar de P aos 70 DAT respondeu linearmente ao aumento da fração de P fornecida via fertirrigação (Figura 2), enquanto o teor aos 85 DAT não foi afetado pelos tratamentos. A aparente divergência entre as respostas do teor foliar aos 70 DAT e do crescimento de plantas aos 28 DAT pode ser explicada pelo fato de as avaliações de ambas variáveis terem sido espaçadas por um período de 42 dias. Durante esse período, e com o curso das fertirrigações, houve provavelmente aumento gradativo da disponibilidade de P na rizosfera, sobretudo nos tratamentos com maior fração de P fornecida pela fertirrigação, o que também foi observado por Hebbar et al. (2004) e Shedeed et al. (2009).

A produtividade e a massa média de frutos comerciais responderam de forma quadrática ao aumento da fração de P fornecida pela fertirrigação (Figura 3). A produtividade máxima foi obtida quando 52% do P foi fornecido via fertirrigação. No entanto, o valor máximo de massa de frutos foi obtido quando 47% do P foram aplicados por esse método. Como o estande final e o número de frutos por planta não foram influenciados significativamente pelos tratamentos, constata-se que a produtividade foi estritamente dependente da massa dos frutos.

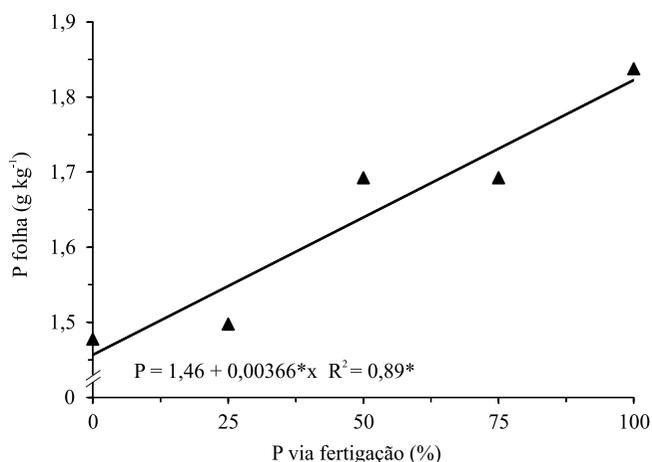


Figura 2. Teor foliar de P, aos 70 dias após o transplante, em função da percentagem de P aplicada via fertirrigação ao tomateiro, no experimento 2.

Os perfis transversais e longitudinais da distribuição de P no perfil do solo, ao final do ciclo do tomateiro, estão apresentados (Figura 4) para os tratamentos com 0, 50 e 100% do P via fertirrigação, respectivamente. Observou-se que, quanto maior a fração de P aplicada via fertirrigação, maior foi o teor final de P no solo, sobretudo a uma distância lateral do gotejador de até 10 cm, e profundidade de até 20 cm, com maiores teores no ponto de gotejamento. Segundo Zanini et al. (2007) e Shedeed et al. (2009), a aplicação parcelada e frequente de P via fertirrigação por gotejamento possibilita o movimento do nutriente no solo por fluxo de massa, tanto lateralmente quanto em profundidade. Além disso, os teores médios de P em todo o perfil do solo foram similares nos tratamentos com 100% do P em pré-plantio (38 mg dm^{-3}) e com 50% do P via fertirrigação (35 mg dm^{-3}), porém, respectivamente 43 e 48% menores do que o teor médio de P no tratamento com 100% do P via fertirrigação (67 mg dm^{-3}).

Apesar do maior crescimento inicial das plantas, a produtividade de frutos ($109,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), quando 100% do P foi aplicado em pré-plantio, não foi a maior observada no experimento. Neste caso, a elevada disponibilidade inicial de P no solo, suficiente para o maior crescimento inicial de plantas, deve ter diminuído ao longo do ciclo do tomateiro, em razão da absorção pelas plantas e, principalmente, da fixação do P, na fase sólida do solo, em formas de pouca ou nenhuma disponibilidade para as plantas (Mohammad et al., 2004; Shedeed et al., 2009). Assim, a aplicação de todo o P em pré-plantio, em solo com baixa disponibilidade

inicial de P, resulta em menor absorção do nutriente pelas plantas, à medida que o ciclo da cultura avança.

Da mesma forma, a produtividade verificada no tratamento com 100% do P via fertirrigação ($112,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) também foi menor do que a observada nos tratamentos em que parte do P foi aplicada em pré-plantio convencional. Essa menor produtividade deveu-se, provavelmente, à deficiência do nutriente nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura, em razão de sua baixa disponibilidade inicial no solo, e está de acordo com o menor crescimento inicial das plantas observado nesse tratamento (Figura 1). Ainda que a produção final de biomassa não tenha sido afetada pelos tratamentos, o menor crescimento inicial das plantas, com o fornecimento de 100% do P via fertirrigação, restringiu a produtividade de frutos.

Enquanto no tratamento com 100% do P em pré-plantio foram observados teores de P no perfil do solo sempre inferiores a 300 mg dm^{-3} (Figura 4) e teor médio de 38 mg dm^{-3} , no tratamento com 100% do P via fertirrigação foram observados valores máximos superiores a 900 mg dm^{-3} , com teor médio de 67 mg dm^{-3} . Segundo Mohammad et al. (2004), aplicações frequentes de P via fertirrigação reduzem expressivamente sua adsorção ao solo.

A maior produtividade, verificada no tratamento com 50% do P via fertirrigação, deveu-se provavelmente ao fato de esta estratégia ter sido suficientemente equilibrada, para manter a disponibilidade de P no solo em níveis adequados durante todo o ciclo de cultivo do tomateiro, o que teria possibilitado maior absorção de P pelas plantas. Assim, a aplicação de 50% do P em pré-plantio elevou a disponibilidade inicial de P e, conseqüentemente, promoveu o crescimento inicial das plantas, enquanto o fornecimento parcelado do P restante, via fertirrigação, mostrou-se adequado para a manutenção de alta disponibilidade de P no solo até a colheita. Neste tratamento, os teores finais de P no solo ficaram entre 400 e 800 mg dm^{-3} apenas na região próxima – cerca de 5 cm – aos gotejadores (Figura 4), e o teor médio final de P no perfil do solo foi 35 mg dm^{-3} , ligeiramente inferior ao observado no tratamento com 100% do P em pré-plantio. Esse menor valor residual do P no solo esteve provavelmente associado à maior produtividade de frutos neste tratamento, que foi o mais eficiente em fornecer P para o tomateiro.

Uma vez que o teor inicial de P no perfil do solo variou entre $0,7$ e $8,8 \text{ mg dm}^{-3}$, e que a profundidade e a largura

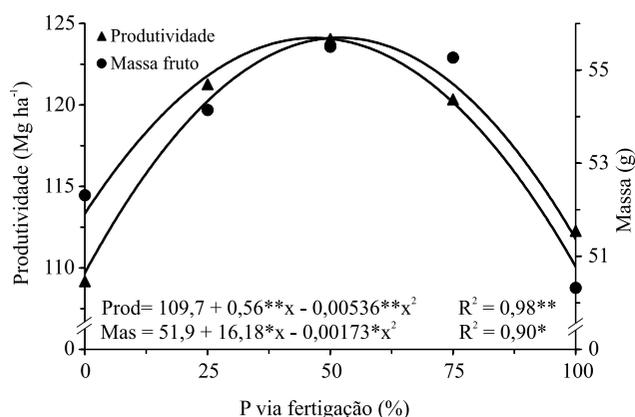


Figura 3. Produtividade e massa de frutos comerciais, conforme a percentagem de P aplicada via fertirrigação ao tomateiro, no experimento 2.

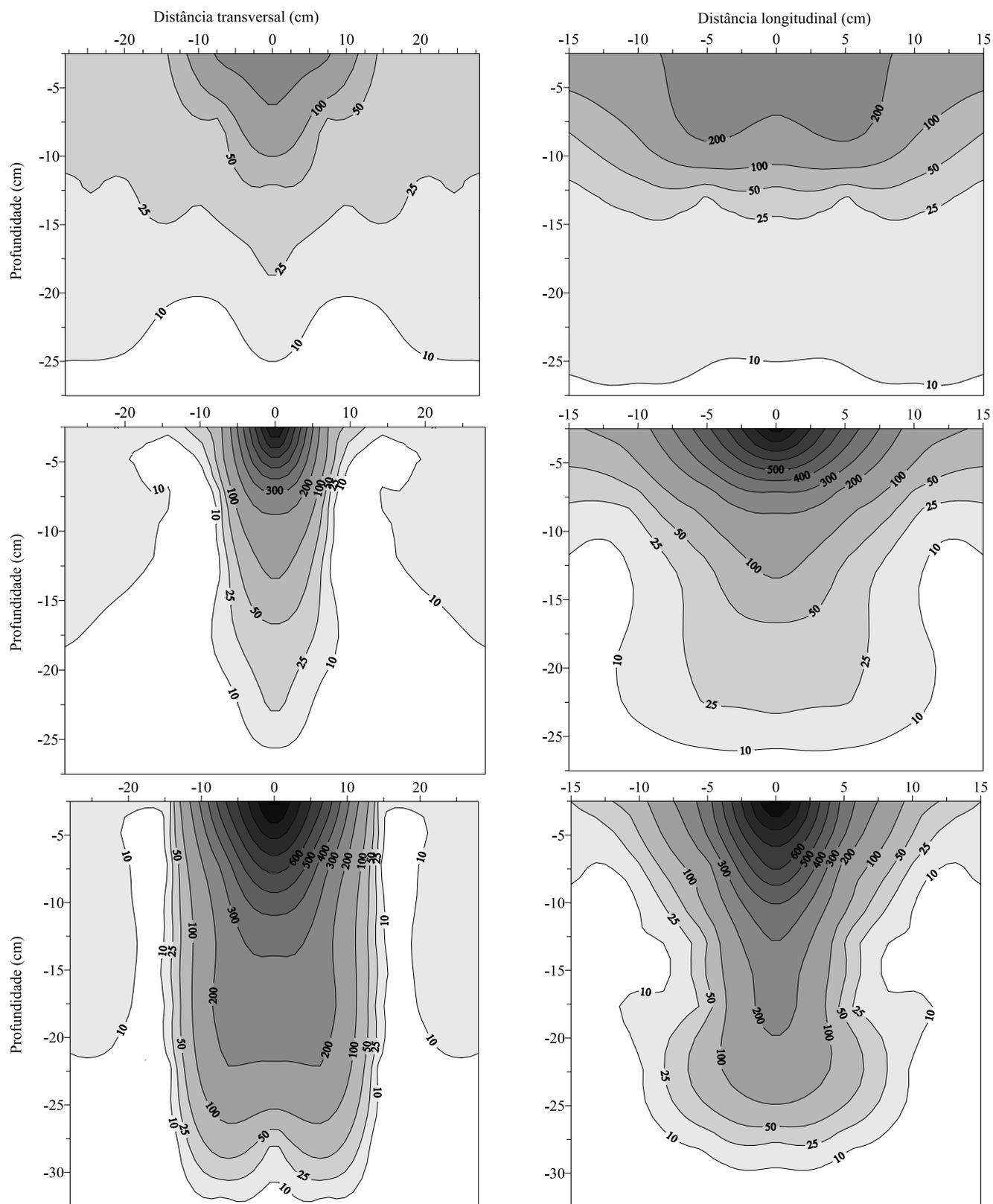


Figura 4. Perfis transversais e longitudinais da distribuição de P (mg dm^{-3}) no perfil do solo, após a colheita do tomateiro no experimento 2, nos tratamentos: 100% de P aplicado em pré-plantio na forma de superfosfato triplo (A e B); 50% de P aplicado em pré-plantio e 50% via fertirrigação (C e D); e 100% de P aplicado via fertirrigação na forma de ácido fosfórico (E e F).

do sulco de incorporação do adubo em pré-plantio foram de 15–20 e 20–25 cm, respectivamente, a ocorrência de teores de P acima de 25 mg dm⁻³, além dos limites do sulco de plantio, indicou a ocorrência de movimentação vertical e lateral do P no solo. Quando o nutriente foi aplicado via fertirrigação, no entanto, o movimento foi ainda mais expressivo, principalmente em profundidade. Esses resultados estão de acordo com os relatados por Zanini et al. (2007) e Shedeed et al. (2009).

O fósforo apresentou movimento vertical de até 30 cm, quando todo o P foi aplicado via fertirrigação, e de cerca de 20 cm, quando apenas 50% do P foram aplicados via irrigação (Figuras 4). O movimento horizontal variou entre 5 e 15 cm, de acordo com a percentagem de aplicação em fertirrigação. Como a fertirrigação possibilita que o P movimente-se no solo por fluxo de massa, a maior movimentação do nutriente no sentido vertical está de acordo com a direção predominante de movimento da água de irrigação.

A distribuição mais uniforme de P no sentido longitudinal, nos tratamentos com 100 e 50% do P em pré-plantio (Figuras 4), deveu-se ao efeito direto da localização do adubo fosfatado no sulco de plantio.

A ausência de efeito significativo dos tratamentos sobre o teor de sólidos solúveis totais, observado no presente trabalho, está de acordo com o relatado por Oke et al. (2005), que também não verificaram influência da adubação fosfatada sobre o pH, a acidez titulável e a cor de frutos de tomate.

Por fim, a ausência de efeito significativo dos tratamentos sobre a ocorrência de frutos verdes, podres e refugos indica que a aplicação de P, em pré-plantio ou via fertirrigação, não produziu efeito sobre a duração do ciclo do tomateiro, a ocorrência de insetos broqueadores e a incidência de doenças de apodrecimento de frutos.

O custo total com fertilizantes no experimento 2 aumentou de forma pouco expressiva com o aumento da fração de P aplicada via fertirrigação (Tabela 1). Em relação ao tratamento em que todo o P foi fornecido em pré-plantio, houve aumento de apenas 2,1% no custo com fertilizantes, quando todo o P foi aplicado via fertirrigação.

De acordo com as equações de regressão ajustadas, a maior receita líquida e a maior taxa de retorno foram obtidas quando 49% do P foram aplicados em pré-plantio e 51% via fertirrigação (Figura 5).

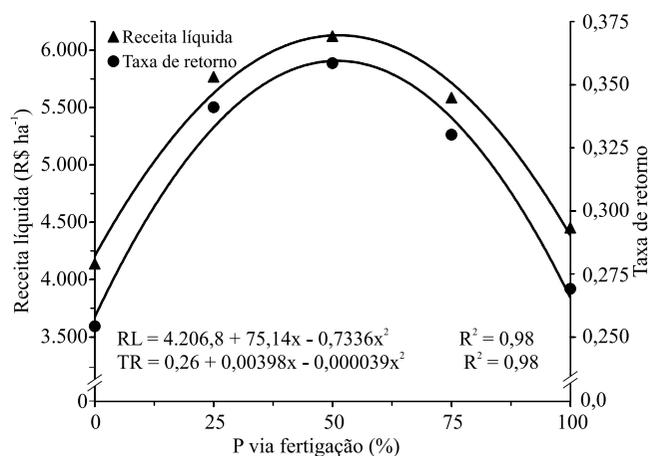


Figura 5. Receita líquida e taxa de retorno do experimento 2, conforme a percentagem de P aplicada via fertirrigação ao tomateiro.

A percentagem de P aplicada via fertirrigação, que maximizou os indicadores econômicos, foi praticamente a mesma que maximizou a produtividade de frutos (52%). A razão para a diminuta diferença entre os máximos físico e econômico deveu-se ao fato de a diferença entre custos com fertilizantes fosfatados (superfosfato triplo e ácido fosfórico), nos diferentes tratamentos (R\$ 108,98 ha⁻¹), ter sido inferior a 0,7% do custeio médio do tomateiro (R\$ 16.744,65 ha⁻¹).

Diferentemente do verificado no experimento 1, houve ganhos econômicos significativos quando parte do P foi aplicada via fertirrigação no experimento 2. A receita líquida, que no tratamento com 100% do P em pré-plantio foi de R\$ 4.137,79 ha⁻¹, aumentou para R\$ 6.122,19 ha⁻¹ quando 50% do P foram aplicados via fertirrigação, o que representa o incremento de 48%.

Conclusões

1. A forma de aplicação do P não influencia a produtividade do tomate de crescimento determinado, em solo com teor inicial do nutriente muito elevado.

2. Em solo com baixa disponibilidade de P, a maior produtividade é obtida quando 48% do P total é aplicado em pré-plantio e o restante via fertirrigação; enquanto a maior eficiência econômica é obtida com a aplicação de 49% em pré-plantio e o restante via fertirrigação.

3. A aplicação de todo P via fertirrigação, ou em pré-plantio, não é a estratégia mais adequada

para fertilização fosfatada, em solo com baixa disponibilidade inicial do nutriente.

4. A fertirrigação com ácido fosfórico possibilita expressivo movimento vertical e horizontal de P no solo.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por concessão bolsa de produtividade.

Referências

- CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade de solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.769-850.
- CARRIJO, O.A.; HOCHMUTH, G. Tomato responses to preplant-incorporated or fertigated phosphorus on soils varying in Melhlich-1 extractable phosphorus. **HortScience**, v.34, p.67-72, 2000.
- CARVALHO, C.R.R.; CAMPOS, F.R. Análise dos aspectos econômicos e ambientais da cadeia agroindustrial do tomate no Estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, v.29, p.163-178, 2009. DOI: 10.5216/bgg.v29i1.7304.
- ENCISO-MEDINA, J.; COLAIZZI, P.D.; MULTER, W.L.; STICHLER, C.R. Cotton response to phosphorus fertigation using subsurface drip irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.299-304, 2007. DOI: 10.13031/2013.22688.
- HEBBAR, S.S.; RAMACHANDRAPPA, B.K.; NANJAPPA, H.V.; PRABHAKAR, M. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **European Journal of Agronomy**, v.21, p.117-127, 2004. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00091-1.
- HOCHMUTH, G.J.; SMAJSTRLA, A.G. **Fertilizer application and management for micro (drip)-irrigated vegetables**. Gainesville: University of Florida; IFAS Extension, 2003. 33p. (Circular, 1181).
- MAROUELLI, W.A.; LAGE, D.A. da C.; GRAVINA, C.S.; MICHEREFF FILHO, M.; SOUZA, R.F. de. Sprinkler and drip irrigation in the organic tomato for single crops and when intercropped with coriander. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, p.825-833, 2013. DOI: 10.1590/S1806-66902013000400020.
- MAROUELLI, W.A.; SANT'ANA, R.R.; SILVA, W.L.C.; MORETTI, C.L.; VILELA, N.J. Avaliação técnica e econômica do espaçamento de gotejadores em tomateiro para processamento cultivado em fileiras simples e duplas. **Horticultura Brasileira**, v.21, p.202-206, 2003. DOI: 10.1590/S0102-05362003000200016.
- MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; SILVA, H.R.; BRAGA, M.B. Irrigação e fertigação. In: CLEMENTE, F.M.V.T.; BOITEUX, L.S. (Ed.). **Produção de tomate para processamento industrial**. Brasília: Embrapa, 2012. p.131-154.
- MOHAMMAD, M.J.; HAMMOURI, A.; FERDOWS, A.E. Phosphorus fertigation and preplant conventional soil application of drip irrigated summer squash. **Journal of Agronomy**, v.3, p.162-169, 2004. DOI: 10.3923/ja.2004.162.169.
- OKE, M.; AHN, T.; SCHOFIELD, A.; PALIYATH, G. Effects of phosphorus fertilizer supplementation on processing quality and functional food ingredients in tomato. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.53, p.1531-1538, 2005. DOI: 10.1021/jf0402476.
- REHIM, A.; FAROOQ, M.; AHMAD, F.; HUSSAIN, M. Band placement of phosphorus improves the phosphorus use efficiency and wheat production under different irrigation regimes. **International Journal of Agricultural & Biology**, v.14, p.727-733, 2012.
- REYES, L.M.; SANDERS, D.C.; BUHLER, W.G. Evaluation of slow-release fertilizers on bell pepper. **HortTechnology**, v.18, p.393-396, 2008.
- SHEDEED, S.I.; ZAGHLOUL, S.M.; YASSEN, A.A. Effect of method and rate of fertilizer application under drip irrigation on yield and nutrient uptake by tomato. **Ocean Journal of Applied Sciences**, v.2, p.139-147, 2009.
- ZANINI, J.R.; BARRETO, A.K.G.; FORATTO, L.C.; NATALE, W. Distribuição de fósforo no bulbo molhado, aplicado via fertirrigação por gotejamento com ácido fosfórico. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.180-193, 2007. DOI: 10.1590/S0100-69162007000100012.
- ZHANG, T.Q.; TAN, C.S.; LIU, K.; DRURY, C.F.; PAPADOPOULOS, A.P.; WARNER, J. Yield and economic assessments of fertilizer nitrogen and phosphorus for processing tomato with drip fertigation. **Agronomy Journal**, v.102, p.774-780, 2010. DOI: 10.2134/agronj2009.0346.

Recebido em 6 de março de 2015 e aprovado em 5 de agosto de 2015