

Modelo matemático para manejo em fertirrigação de precisão
Mathematical model for handling in precision fertigation
Modelo matemático para el manejo de fertirrigación de precisión

Recebido: 06/04/2020 | Revisado: 20/04/2020 | Aceito: 22/04/2020 | Publicado: 22/04/2020

Edgo Jackson Pinto Santiago

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-7635>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: edgoj@hotmail.com

Ana Karla da Silva Freire

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0338-9536>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: akarlasf@hotmail.com

Jackson Freitas de Amorim

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5288-968X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: ibamorim@gmail.com

Claudio Tadeu Cristino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6748-209X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: ctcristino@gmail.com

Alessandro Dal'Col Lúcio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0761-4200>
Universidade Federal de Santa Maria
E-mail: adlucio@ufsm.br

Frank Gomes-Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3481-3099>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: franksinatrags@gmail.com

Antonio Samuel Alves da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8759-0036>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: samuelsmathematical@gmail.com

José Ramon Barros Cantalice

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8209-341X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: cantalice21@hotmail.com

Moacyr Cunha Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3466-8143>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: moacyr.cunhafo@ufrpe.br

Resumo

A fertirrigação tem sido fundamental para impulsionar o suprimento alimentar mundial, pois mais de 40% da produção agrícola total é obtida em áreas irrigadas com uso dessa técnica. Apesar disso, quando mal manejada, pode elevar consideravelmente a concentração de sais no solo, além de aumentar a probabilidade de perdas de nutrientes por lixiviação, sobretudo, em solos arenosos. A técnica como realizada hoje em dia, ainda que siga critérios técnicos pode imprimir restrições à absorção de água e nutrientes em face da elevação momentânea e abrupta do potencial osmótico no volume de solo explorado. Isso porque a concentração da solução fertilizante injetada no sistema de irrigação é habitualmente constante durante toda operação. Objetivou-se, assim, desenvolver um modelo matemático para manejo de fertirrigação de precisão em que a concentração da solução fertilizante injetada no sistema de irrigação possa ser variável com tempo, além de verificar o alcance vertical produzido pela técnica assim realizada. O modelo matemático desenvolvido é apropriado para descrever a variação na concentração de solução fertilizante injetada em sistema de irrigação de modo não uniforme. A fertirrigação quantitativa, realizada segundo o modelo matemático obtido, proporciona, em Neossolo Quartzarênico, redução de 25% no alcance vertical e maior eficiência de aplicação da solução fertilizante comparada a fertirrigação proporcional.

Palavras-chave: Fertirrigação; Solução nutritiva; Concentração variável; Quimigação de precisão; Fluxo contínuo.

Abstract

Fertirrigation has been instrumental in boosting the world's food supply, since more than 40% of agricultural production is total in areas irrigated with the use of this technique. However, when poorly managed, it is possible to increase the concentration of salts in the soil, besides

increasing the probability of losses of nutrients by leaching, especially in sandy soils. Fertigation as performed today, still being able to print water and nutrients in the face of momentary and abrupt elevation of osmotic potential in the volume of soil explored. This is because the concentration of injected fertilizer solution is not a constant habit irrigation system throughout the operation. The objective of this work was to develop a mathematical program for the management of precision fertigation in an injected fertilization solution without a variable irrigation system, over time, besides verifying the reach of vertical processes by the fertigation thus performed. The mathematical model is used to describe a change in your injectable fertilizer solution in an irrigation system nonuniformly. A quantitative fertigation rate, obtained according to the obtained mathematical model, gives a 25% reduction in vertical range and a higher efficiency of fertilizer solution compared to proportional fertirrigation

Keywords: Fertigation; Nutrition solution; Variable concentration; Precision chemistry; Continuous flow.

Resumen

La fertirrigación ha sido fundamental para impulsar el suministro mundial de alimentos, ya que más del 40% de la producción agrícola total se obtiene en áreas de regadío utilizando esta técnica. Sin embargo, cuando se maneja mal, puede aumentar considerablemente la concentración de sales en el suelo, además de aumentar la probabilidad de pérdidas de nutrientes por lixiviación, especialmente en suelos arenosos. La fertirrigación realizada hoy, incluso si sigue criterios técnicos, puede imponer restricciones a la absorción de agua y nutrientes en vista del aumento momentáneo y abrupto del potencial osmótico en el volumen de suelo explorado. Esto se debe a que la concentración de la solución de fertilizante inyectada en el sistema de riego suele ser constante durante toda la operación. Por lo tanto, el objetivo era desarrollar un modelo matemático para el manejo de fertirrigación de precisión en el que la concentración de la solución de fertilizante inyectada en el sistema de riego puede ser variable con el tiempo, además de verificar el rango vertical producido por la fertirrigación así realizada. El modelo matemático desarrollado es apropiado para describir la variación en la concentración de la solución de fertilizante inyectada en un sistema de riego de manera no uniforme. La fertirrigación cuantitativa, realizada de acuerdo con el modelo matemático obtenido, proporciona, en Neossolo Quartzarênico, una reducción del 25% en el alcance vertical y una mayor eficiencia de aplicación de la solución de fertilizante en comparación con la fertirrigación proporcional.

Palabras clave: Fertilización; Solución nutricional; Concentración variable; Química de precisión; Flujo continuo.

1. Introdução

Fertirrigar consiste em utilizar o sistema de irrigação como meio condutor e distribuidor de fertilizantes (Bernardo et al., 2008) para fornecer nutrientes no volume de solo explorado pelo sistema radicular da cultura, após introdução de solução fertilizante na água de irrigação (Pinto & Brito 2010). Essa técnica tem sido fundamental para impulsionar o suprimento alimentar mundial, visto que, mais de 40% da produção agrícola total é obtida em áreas irrigadas com uso de fertirrigação (Frizzone et al., 2012).

A prática da fertilização via água de irrigação, apesar de adequar-se principalmente à irrigação localizada (Busato et al., 2011), pode ser implementada em qualquer sistema pressurizado. Para isso é necessário que o mesmo seja munido com equipamentos que permitam a injeção de solução fertilizante na água de irrigação. Injeção essa que pode ser quantitativa, quando há diluição da solução fertilizante com o tempo de injeção, e proporcional, na qual não há variação na concentração da solução com o tempo de aplicação (Trani, Tivelli & Carrijo 2011).

Dessa forma, a fertirrigação possibilita a aplicação controlada de nutrientes ajustada aos estádios fenológicos (Coelho et al., 2018) e, apesar de favorecer a obtenção de altos rendimentos em cultivos irrigados, se mal manejada, pode aumentar consideravelmente a concentração de sais no solo que ao ultrapassar limites de tolerância das plantas, repercutem negativamente sobre o crescimento e a produtividade dos cultivos (Silva et al., 2013).

Situação como esta ocorre quando os irrigantes, com baixo conhecimento técnico e que desconhecem os fundamentos da tecnologia, empregam-na sem critérios para favorecer a sustentabilidade edáfica; já que os sais dissolvidos na água de irrigação, ao ingressarem no sistema, alteram a composição da solução promovendo modificações no equilíbrio iônico entre as fases sólida e líquida o que pode influenciar o estado salino do solo com riscos de aumento instantâneos da salinidade, levando a alterações de características físico-químicas do ambiente edáfico (Teixeira, Coelho & Barros 2014).

Assim, a adição de qualquer fertilizante, mesmo nas quantidades adequadas, pode afetar temporariamente a disponibilidade e a lixiviação de outros nutrientes (Ernani et al., 2007). De acordo com Silva et al. (2013), a salinidade no solo por excesso de fertilizantes, altera o potencial osmótico do meio, provoca desequilíbrios nutricionais e, mesmo o solo úmido e com

nutrientes, esses não são absorvidos pelas plantas, seja por desequilíbrio químico ou por efeito osmótico.

Durante as irrigações que visam suprir a demanda evapotranspiratória das plantas é que são realizadas as fertirrigações e de acordo com Almeida (2009) e Bassoi et al. (2010), o tempo de funcionamento de um sistema de irrigação, quando em fertirrigação, usualmente segue o modelo 1:2:1. De maneira geral, independente do tempo de injeção, a concentração da solução fertilizante injetada no sistema de irrigação é habitualmente constante (injeção proporcional).

Isto pode aumentar a probabilidade de perdas de nutrientes por lixiviação, sobretudo em solos arenosos que naturalmente possuem baixa capacidade de troca catiônica, ainda mais se tratando de fertilizantes potássicos e nitrogenados, os quais possuem alta mobilidade no perfil de solo.

Nutrientes muito móveis atingem o volume de solo explorado pelas raízes rapidamente, todavia, perdem-se facilmente por lixiviação (Sangoi et al., 2003) e, se manejados de forma inoportuna, podem comprometer águas subterrâneas. Pedrotti et al. (2015) comentam que o manejo inadequado da fertirrigação tem contribuído sensivelmente para expansão de área de solos degradados por salinidade e sodicidade e dentre os impactos causados por sais no solo, estão: baixa produtividade agrícola e alto custo de produção; aumento no escoamento superficial e diminuição na recarga dos aquíferos.

Para Silva (2014), todos estes fatores geram prejuízos que ocorrem por obtenção de produto final com baixa qualidade comercial, devastação do solo e recursos hídricos ou, ainda, por desperdício de fertilizantes, já que os sais fertilizantes acumulados no solo e que são lixiviados foram adquiridos por investimento de capital (Silva et al., 1999) e, uma vez fora da rizosfera, acarreta em dano de ordem econômica e ambiental.

Não obstante, pouca importância ainda tem sido dada à concentração da solução fertilizante, apesar de estudos recentes como os de Takahashi et al. (2018) apontarem a forma de manejo da fertirrigação e a concentração inicial da solução nutritiva como preponderante para qualidade pós-colheita de frutos.

É por esta razão que a solução a ser injetada no sistema de irrigação deve ter na saída dos emissores uma concentração de nutrientes que permita a aplicação da quantidade desejada de fertilizante, sem causar com isso elevação do potencial osmótico ou da salinidade do solo (Coelho, Filho & Cruz 2007). Vale ressaltar que, quanto maior a concentração na saída dos emissores, maior a possibilidade de entupimentos e maior risco de desequilíbrio osmótico à solução do solo.

Dessa forma, torna-se importante o desenvolvimento de novas técnicas para aplicação de solução nutritiva em face daquelas tradicionalmente empregadas.

Neste sentido é razoável propor uma alternativa ao manejo da fertirrigação de modo que a concentração da solução fertilizante, injetada via sistema de irrigação, varie ao longo da fertirrigação. Sendo, por exemplo, maior no início do processo e reduzindo-se ao longo do tempo sem prejuízo para o tempo total de aplicação da lâmina de irrigação necessária ao suprimento hídrico da cultura.

Com isso, a concepção de um tanque aberto com fluxo contínuo tendo vazão de entrada para diluição do fertilizante diferente da vazão de injeção no sistema de irrigação, pode mostrar-se como promissor para aplicação de fertirrigação quantitativa diante dos potenciais riscos da fertirrigação proporcional. Vale ressaltar que neste caso, a injeção de solução fertilizante no sistema de irrigação deve ser realizada por bomba injetora, por exemplo, ou qualquer outro mecanismo de injeção de fluido.

De acordo com Medeiros et al. (2011), quando a concentração de nutrientes no tanque de injeção é variável ao longo do tempo, como no caso do tanque de derivação de fluxo, a concentração da solução fertilizante no interior do tanque, em qualquer tempo, é dada pela equação proposta por Shani (1981). No entanto, ela é de uso restrito, aplicando-se bem apenas a tanque de derivação de fluxo pois as vazões de entrada de água e saída de solução fertilizante são iguais (Pinto & Brito 2010).

Não obstante, não há na literatura equação capaz de descrever o comportamento da concentração de solução fertilizante ao longo do tempo, para situações em que as vazões de entrada de água e saída de solução fertilizante são diferentes. Desse modo, torna-se necessário o desenvolvimento de um modelo matemático para emprego em tanques de fertirrigação abertos com fluxo contínuo.

Nesse contexto a proposta do trabalho foi desenvolver um modelo matemático para manejo de fertirrigação de precisão em que a concentração da solução fertilizante injetada no sistema de irrigação possa ser variável com tempo, além de verificar o alcance vertical produzido pela fertirrigação assim realizada.

2. Metodologia

A pesquisa realizada é de natureza quantitativa e experimental com enfoque matemático ao fenômeno em estudo. De acordo com Pereira et al. (2018) uma das formas de aquisição do

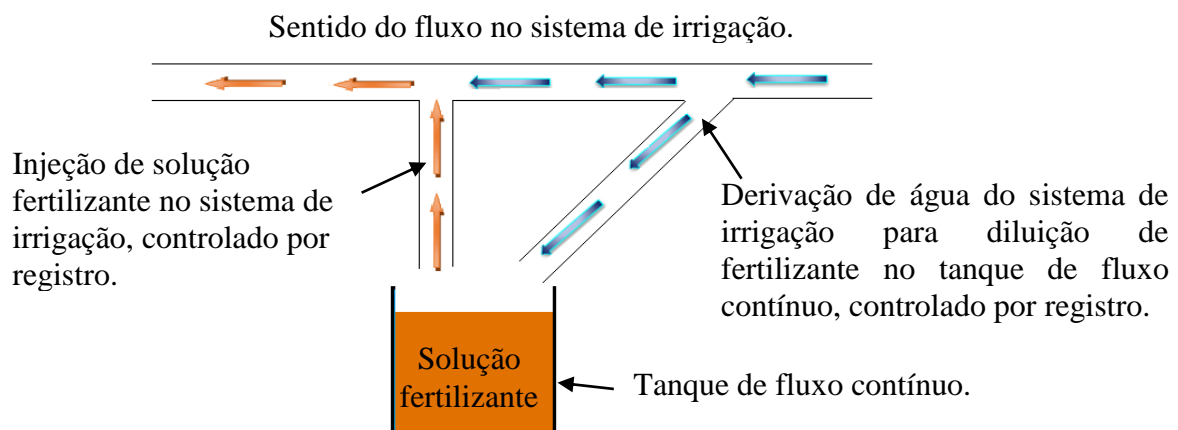
conhecimento é por meio de pesquisa experimental a partir da qual as hipóteses ou proposições de estudo são validadas ou refutadas, o que leva ao conhecimento científico.

Ainda para estes autores o método quantitativo produz o conjunto ou massa de dados a serem analisados por meio de técnicas matemáticas e estatísticas que, por sua vez, pode gerar equações e/ou fórmulas aplicáveis a algum processo. Dessa forma o enfoque matemático e estatístico, muitas vezes, torna-se importante por possibilitar previsões de acontecimentos em relação a algum fenômeno em estudo (Pereira et al. 2018).

Inicialmente procedeu-se a parte teórica de desenvolvimento do modelo, via cálculos matemáticos e, posteriormente, sua validação em experimento a campo. A formulação do modelo matemático baseou-se no pressuposto de que a concentração da solução fertilizante aplicada por sistema de irrigação pressurizado, quando injetada de forma decrescente com o tempo de aplicação, gera um perfil de distribuição que varia exponencialmente em função das vazões de entrada e saída do tanque de dissolução, iniciando com máxima concentração e finalizando o processo com concentração nula.

A concepção do modelo matemático proposto deu-se, então, pela resolução de uma equação diferencial ordinária separável de primeira ordem, construída para descrever a situação hipotética, a saber. Considere um tanque aberto de dissolução contendo V_0 litros de água, no qual foi inserido M kg de fertilizante e considere a entrada de água no tanque à vazão Q_1 L min^{-1} e a solução fertilizante injetada deste no sistema de irrigação à vazão Q_2 L min^{-1} , com $Q_1 < Q_2$ (Figura 1). Deseja, em geral, determinar a concentração de fertilizante no tanque de dissolução (Figura 1) ao fim de t minutos.

Figura 1. Esquema de injeção de solução fertilizante na linha de irrigação a partir de um tanque, similar ao de derivação de fluxo, com diluição contínua ao longo do tempo de fertirrigação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Na Figura 1 a injeção da solução fertilizante no sistema de irrigação deve ser realizada por bomba injetora com controle de vazão (por registro por exemplo). A entrada de água diretamente do sistema de irrigação para o tanque de fluxo contínuo dispensa o uso de bomba, mas não algum mecanismo que controle a vazão de entrada.

Sabe-se que a concentração de um soluto em uma solução é dada por:

$$C = \frac{M}{V}$$

em que M é a massa do soluto (em unidades de massa), e V é o volume da solução (em unidades de volume).

Seja $x(t)$ a quantidade (kg) de fertilizante restante no tanque de dissolução no tempo “ t ” minutos ($0 < t < T$). Assim, a concentração de fertilizante no tanque no instante t é dada por:

$$C(t) = \frac{M(t)}{V(t)} = \frac{x(t)}{V_0 + t(Q_1 - Q_2)}$$

Deve-se observar que no instante $t = 0$, o volume do tanque de dissolução é V_0 e transcorridos t minutos o volume do tanque passa a ser função das vazões e do tempo, ou seja,

$$V = V(Q_1, Q_2, t) = V_0 + t(Q_1 - Q_2).$$

Sabe-se que no instante t entram no tanque de dissolução Q_1 litros de água e saem dele Q_2 litros de solução. Logo a taxa de variação da quantidade de fertilizante no tanque em função do tempo pode ser dada por:

$$\begin{aligned} dx &= 0 - Q_2 C(t) dt = - Q_2 \frac{x(t)}{V_0 + t(Q_1 - Q_2)} dt \\ \frac{dx}{x(t)} &= - Q_2 \frac{dt}{V_0 + t(Q_1 - Q_2)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Integrando a equação (1) acima com limites de integração no primeiro membro de M até x e no segundo de 0 até t tem-se:

$$\int_M^x \frac{dx}{x} = -Q_2 \int_0^t \frac{dt}{V_0 + t(Q_1 - Q_2)}.$$

Depois de alguns desenvolvimentos algébricos chegamos a equação dada por:

$$x = M \left(1 + \frac{t(Q_1 - Q_2)}{V_0} \right)^{\left(\frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \right)} \quad (2)$$

em que x é a massa de fertilizante no tanque de dissolução em um tempo t (min). A concentração (kg L^{-1}) da solução de fertilizante no tanque de dissolução em um tempo (min) é dado por:

$$C(t) = \frac{M \left(1 + \frac{t(Q_1 - Q_2)}{V_0} \right)^{\left(\frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \right)}}{V_0 + t(Q_1 - Q_2)}. \quad (3)$$

Sendo $T_{M=0}$ o tempo (min) para que a massa de fertilizante adicionada ao tanque de dissolução seja zero, ou seja, o tempo necessário para que a concentração da solução fertilizante no tanque se anule, tem-se:

$$T_{M=0} = \frac{V_0}{Q_2 - Q_1}. \quad (4)$$

Para validação e verificação, em termos de eficiência do modelo desenvolvido, foi realizado um experimento de campo delineado em faixa com intuito de analisar o alcance vertical da solução fertilizante produzida pela fertirrigação proporcional versus a fertirrigação quantitativa. Assim o experimento foi instalado em Petrolina-PE em Neossolo Quartzarênico, nas entrelinhas de um pomar de manga. Foram testados dois tratamentos: injeção de solução fertilizante a concentração constante (fertirrigação proporcional) e injeção de solução fertilizante com concentração reduzindo-se ao longo da fertirrigação (fertirrigação quantitativa segundo o modelo matemático desenvolvido). Ambos os tratamentos tiveram dez repetições e cada um foi distribuído no campo de modo a formar faixas.

A solução fertilizante foi preparada utilizando 4,6 kg (M da Eq. 3) de nitrato de potássio na qual foi adicionado corante na cor azul turquesa para visualizar nas trincheiras até onde iria a redistribuição da solução nutritiva ao logo do bulbo molhado.

O sistema de irrigação utilizado foi o de micro aspersão com coeficiente de uniformidade de distribuição de 0,94 e com emissores desprovidos de bailarinas ou difusores com vazão nominal de 100 L h^{-1} espaçados a cada 2,50 m. A solução fertilizante foi injetada no sistema de irrigação a uma vazão de 25 L min^{-1} (Q_2 da Eq. 3) por bomba injetora e a entrada de água no tanque de dissolução com capacidade para 230 L (V_0 da Eq. 3), quando necessário, foi realizado a uma vazão de $7,9 \text{ L min}^{-1}$ (Q_1 da Eq. 3).

Os tempos de irrigação, inicial e de limpeza do sistema de irrigação após fertirrigação foram comuns a ambos os tratamentos, sendo de 8,26 e 4,26 minutos, respectivamente. Já o tempo de injeção da solução fertilizante na fertirrigação proporcional foi de 13,80 minutos e na fertirrigação quantitativa de 13,45 minutos.

Tendo em vista que uma solução fertilizante após ser aplicada torna-se potencialmente passível de ser carregada para fora da zona radicular, estimou-se a eficiência de aplicação da solução nutritiva pela equação $E_{as} = \{1 - [(P_{sf} - P_{sr}) / P_{sr}]\} * 100$ em que P_{sr} é a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura considerada e P_{sf} é a profundidade média alcançada pela solução fertilizante.

A eficiência de aplicação da solução fertilizante reflete seu grau de percolação traduzindo o quanto uma solução fertilizante migrou para profundidade inexplorada pelas raízes efetivas.

Para quantificar o alcance vertical produzido pelos métodos de fertirrigação foram abertas trincheiras abaixo de cada emissor e realizadas medidas da profundidade por meio de fita métrica.

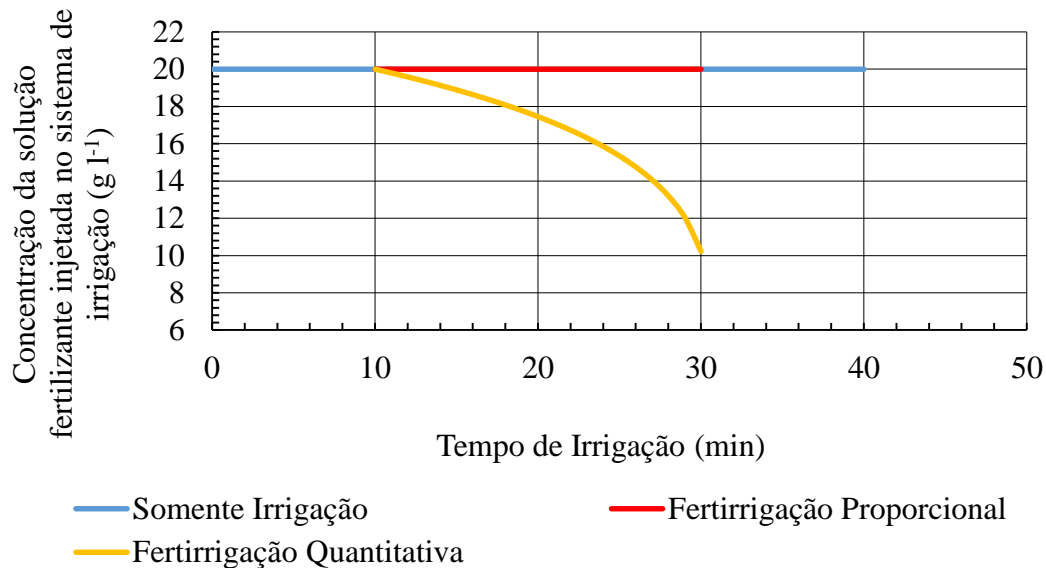
Para comparar as médias de profundidade referente a cada método de fertirrigação pelo teste t de Student a 5% de probabilidade de erro tipo I foi inicialmente checado a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk a uma probabilidade máxima de erro tipo I de 5%.

3. Resultados

Para efeito de funcionamento do modelo matemático desenvolvido é apresentada uma situação demonstrativa a partir da qual se tange comentários pertinentes. Considere uma fertirrigação sendo aplicada por dois modelos: o primeiro com injeção de solução fertilizante a concentração constante (proporcional) com vazão de injeção de $25,0 \text{ L min}^{-1}$. O Segundo com variação de concentração (quantitativa) com vazões de entrada no taque de $5,0 \text{ L min}^{-1}$ (Q_1) e saída dele de $29,0 \text{ L min}^{-1}$ (Q_2), ambos injetados no sistema de irrigação por bomba injetora.

Ao se considerar uma quantidade hipotética de 10 kg de um dado fertilizante para aplicação, um tanque para dissolução com capacidade de 500 L (V_0) cheio e um tempo de irrigação de 40 minutos. Se a fertirrigação, dentro do tempo total de irrigação atender o modelo de 1:2:1, ocorrerá o que se segue na Figura 2.

Figura 2. Variação da concentração de solução fertilizante dentro do tempo total de irrigação em dois modelos de fertirrigação: proporcional e quantitativa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

De acordo com a Figura 2 é possível observar a nítida variação da concentração da fertirrigação quantitativa quando comparado com a proporcional. Verifica-se, pois, que apesar da vazão de injeção no sistema quantitativo ser pouco maior que no proporcional, ambos os tempos para aplicação de aproximadamente a mesma quantidade de fertilizantes foram aproximadamente de 20 minutos.

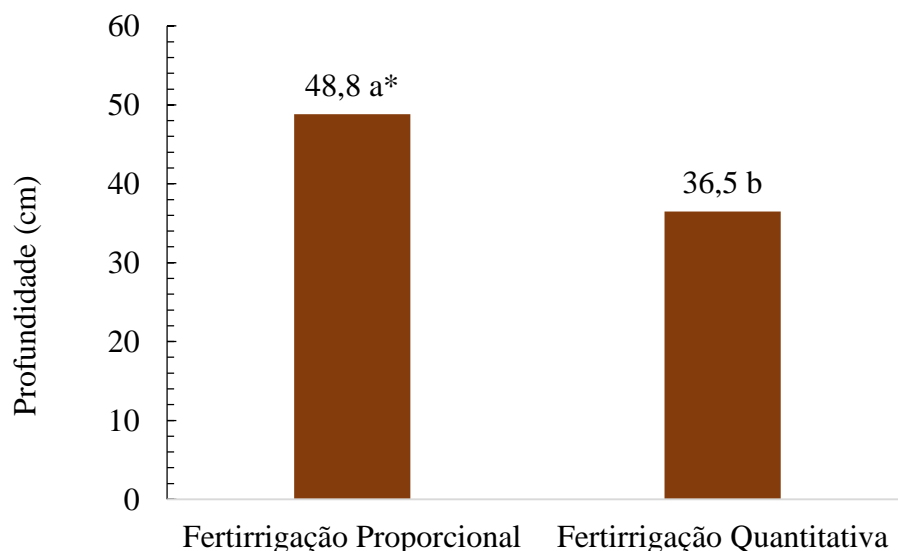
Constata-se, ainda, potencial vantagem no método quantitativo uma vez que ao final do processo de fertirrigação a concentração foi cerca de 50% menor do que no método proporcional. Essa razoável diferença, que se torna tanto maior quanto maior o tempo de fertirrigação, certamente pode contribuir para um maior equilíbrio iônico a nível de rizosfera, redução da pressão osmótica da solução do solo com menor restrição à absorção de água pelas raízes e, conseqüentemente, de nutrientes, além de minimização de riscos associados à lixiviação.

Em cultivo de laranjeiras, avaliando a dinâmica de nutrientes na solução do solo após a aplicação via fertirrigação, de nitrogênio, fósforo e potássio com doses variando de 0 a 200% da dose recomendada, Souza et al. (2012), constataram que houve redução do pH e aumento da condutividade elétrica da solução do solo com a elevação da dose de fertilizante aplicada.

De acordo com Souza et al. (2006) há perigo de acidificação em regiões tropicais, quando são utilizadas fontes de fertilizantes de reação ácida. Este resultado é porque quanto maior a dose aplicada, maior o efeito acidificante na solução do solo (Souza et al., 2012). Estes mesmos autores verificaram que em razão da maior acidificação, observada para aplicação das maiores doses de fertilizantes, o Ca^{+2} e o Mg^{+2} permaneceram livres na solução do solo com a diminuição das cargas negativas do solo dependentes do pH e ficaram passíveis de serem lixiviados. Situação semelhante foi observada por Delbem et al. (2011), porém com diminuição dos teores de Ca e Mg no solo, resultante da lixiviação, por causa dos baixos valores de pH.

Em relação ao alcance vertical em profundidade produzido pelas formas de fertirrigação testadas (Figura 3), foi constatada diferença significativa pelo teste t (p-valor = 0,0338) a uma probabilidade máxima de erro tipo I de 5%.

Figura 3. Alcance vertical em profundidade (cm) de solução fertilizante produzido por fertirrigação proporcional e quantitativa em Neossolo Quartzarênico.



* Médias não seguidas por mesma letra diferem pelo teste t a 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

A profundidade atingida pela solução fertilizante na fertirrigação quantitativa, segundo o modelo matemático desenvolvido, foi cerca de 25% menor do que a obtida no modo tradicional de aplicação de fertirrigação proporcional (Figura 3).

Na Tabela 1 é apresentado a eficiência da aplicação de solução fertilizante produzida por fertirrigação proporcional e quantitativa em Neossolo Quartzarênico.

Tabela 1. Eficiência da aplicação de solução fertilizante (E_{as}) produzida por fertirrigação proporcional e quantitativa em Neossolo Quartzarênico (considerando profundidade efetiva de 30 cm), desvios padrao (DP), coeficientes de variação (CV) e intervalos de confiança construído com 95% de chance de conter o verdadeiro valor da eficiência de aplicação.

Fertirrigação	E_{as} (%)	DP (cm)	CV (%)	Intervalo de confiança 95% (cm)
Proporcional	37,33	11,18	22,9	40,80 - 56,80
Quantitativa	78,33	12,70	34,8	27,41 - 45,59

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Verifica-se que a eficiência de aplicação da solução fertilizante pelo método quantitativo (78,33%) foi duas vezes mais eficaz do que a fertirrigação proporcional (37,33%), considerando efetividade do sistema radicular de 30 cm (Tabela 1).

Esses resultados indicam o grande potencial do modelo matemático desenvolvido para fertirrigação em solos arenosos e com nutrientes de alta mobilidade no perfil, ao mesmo tempo que evidencia riscos iminentes e potencial da fertirrigação proporcional devido maior possibilidade de percolação de nutrientes.

Amaral et al. (2014), ao monitorarem os teores de potássio de um Neossolo Quartzarênico em área de vegetação nativa de Caatinga e em área comercial cultivada com Manga (*Mangifera indica* L.) irrigada, ao final da época seca e chuvosa, em Petrolina-PE, concluíram que a adubação com potássio, em sistemas irrigados de produção de manga, incrementou a translocação desse nutriente para camadas profundas do solo. Este efeito foi mais pronunciado nas camadas de 0,40 a 1,20 m, após o período chuvoso. Segundo os mesmos autores, isto poderia estar associado a forma de aplicação do fertilizante, por meio de fertirrigação com microaspersores.

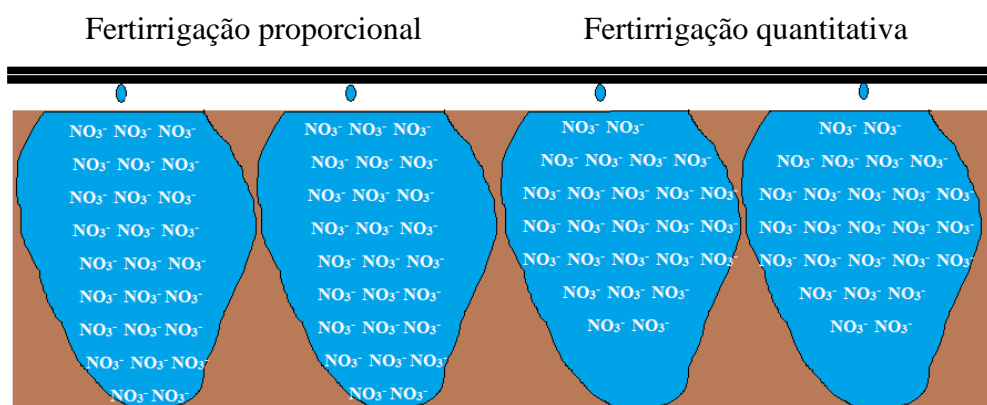
Essa hipótese levantada é, portanto, agora reforçada com os resultados desse estudo o qual evidencia que o maior alcance vertical em profundidade é produzido por fertirrigações proporcional, realizadas dogmaticamente nas áreas irrigadas da região. Tal prática, associada a

aplicação de nutrientes no sistema solo a uma taxa constante ao longo do tempo de fertirrigação, aumentam os riscos de alta mobilidade vertical de nutrientes, os quais podem ser lixiviados por ocorrência de chuva ou mesmo irrigação desprovida de manejo, levando a uma não sustentabilidade da atividade agrícola, degradação de solos e mananciais subterrâneos.

Os riscos tornam-se maiores ainda quando a fertirrigação proporcional é realizada em solos arenosos, utilizando nutrientes como nitrogênio ou potássio. Isso porque os principais nutrientes aplicados via fertirrigação referem-se ao nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) e qualquer fonte de N aplicada resulta em íons de nitrato no perfil do solo, os quais são altamente solúveis em água e não adsorvidos às partículas do solo, tornam-se extremamente móveis (Coelho et al. 2010) e, portanto, potencialmente lixiviáveis.

Em fertirrigações realizadas por sistema de gotejamento, os íons fertilizantes mantem-se concentrado no volume de solo correspondente ao bulbo úmido. De acordo com Lopes; Souza & Santoro (2010) e Barros et al. (2010) os íons mais solúveis acompanham a frente de avanço da água, movimentando-se um pouco à frente dos sais, em direção ao extremo do bulbo. Isto leva a crer que se a incorporação de nutrientes é realizada a uma taxa constante, espera-se maior redistribuição de íons ao longo de boa parte do bulbo, com maiores acúmulos na região abaixo do gotejador. Diferente do que se espera quando a concentração da solução nutritiva diminui com o tempo de incorporação como pode ser esquematizado na Figura 4.

Figura 4. Esquema do perfil de distribuição da concentração de íons na solução do solo ao longo do bulbo de umedecimento após injeção de fertilizantes por fertirrigação proporcional e quantitativa aplicada via sistema de gotejamento.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Neste caso (Figura 4), espera-se menor concentração iônica à superfície e no limite da seção controle do bulbo úmido.

Estudo conduzido por Santoro et al. (2013) com plantas de pimentão objetivando monitorar a distribuição da solução no solo em função de duas taxas de aplicação ($2,0 \text{ L h}^{-1}$ e $4,0 \text{ L h}^{-1}$) via fertirrigação, constatou que a condutividade elétrica do solo para vazão de $4,0 \text{ L h}^{-1}$ mostrou-se maior em relação ao tratamento com vazão de $2,0 \text{ L h}^{-1}$ na camada de 0 a 20 cm e comportamento inverso na camada de 20 a 40 cm. Isto indica redução de sais à superfície com aumento gradativo em profundidade se a concentração de sais adicionados ao solo for decrescente.

Dessa forma, a fertirrigação quantitativa como descrita, apresenta-se como alternativa mais adequada para aplicação de fertilizantes via água de irrigação, uma vez que o volume de solo explorado pela maior parte das raízes de absorção (finas e muito finas) ficam predispostas a maior interceptação de nutrientes, o que favorece o desenvolvimento das plantas.

Verifica-se que a aplicação de solução fertilizante em concentração constante ao longo do tempo, além de poder contribuir para diminuição do pH, favorece a elevação da condutividade elétrica do solo por tender a promover distribuição menos heterogênea de íons no bulbo úmido (Figura 4). Valores de condutividade além do limite de tolerância da cultura podem afetar a produção (Souza et al., 2012) e a aplicação de doses elevadas de fontes de nitrogênio e potássio com alto índice salino, associados à aplicação localizada à taxa constante, exercem potencial ação danosa às plantas.

É importante destacar que, em sistemas de irrigação localizado, como gotejamento em superfície ou subsuperfície, algumas das principais limitações são as constantes obstruções dos emissores decorrentes da formação de precipitados resultantes da aplicação de fertilizantes via água de irrigação. Isso por sua vez provoca desuniformidade de irrigação com o tempo e repercute negativamente na produtividade dos cultivos agrícolas (Cunha et al., 2013).

Na tentativa de minimizar problemas dessa natureza a prática mais comum é a utilização de ácido fosfórico. No entanto, diversos estudos, como o de Santos et al. (2015), tem demonstrado que a aplicação de ácido fosfórico para desobstrução de emissores não é eficiente. Segundo os autores, porque há desprendimento de partículas das paredes dos tubos das linhas de irrigação, ocasionadas pelo ácido, que por sua vez podem se concentrar nas saídas dos emissores e elevar o grau de entupimento ao em vez de diminuir.

Neste contexto, a fertirrigação quantitativa segundo o modelo matemático desenvolvido, pode mostrar-se altamente viável já que a concentração da solução fertilizante circulante nas linhas de irrigação decaem com tempo. E este fato reduz em muito a possibilidade de formação de precipitados e conseqüente entupimento de emissores. Além disso, o tempo de aplicação de lâmina de água necessária a limpeza do sistema de irrigação após a técnica é bem

menor na quantitativa do que na proporcional. Isso porque no final do processo de injeção, a concentração de nutrientes circulando nas tubulações já estará bem reduzida, necessitando de um volume muito menos expressivo para total limpeza do sistema de irrigação.

4. Considerações Finais

O modelo matemático desenvolvido é apropriado para descrever a variação na concentração de solução fertilizante injetada em sistema de irrigação de modo não uniforme.

A fertirrigação quantitativa, realizada segundo o modelo matemático obtido, proporciona redução de 25% no alcance vertical em profundidade bem como maior eficiência de aplicação da solução fertilizante quando comparada a fertirrigação proporcional.

É preciso ter em conta que essa profundidade é função não só da fertirrigação, mas, principalmente, das irrigações que sucedem, uma vez que na vertical prevalece a energia gravitacional. Portanto, o fluxo de massa deve predominar com o fluxo dispersivo. Desse modo é recomendável considerar em estudos futuros a teoria de fluidos miscíveis, tipos de fluxo de massa e coeficientes de retardamento para melhor entender a dinâmica do processo como um todo.

Referências

- Almeida, O.A.(2009). Equipamento de injeção de fertilizantes. In: Borges, A.L., Coelho, E.F. (Org.). *Fertirrigação em fruteiras tropicais*. 2. Ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, p. 37-60.
- Barros, A.C., Folegatti, M.V., Souza, C.F. & Santoro, B.L. (2010). Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. *Irriga*. 15(4):361-372.
- Basso, L.H., Braga, M.B., Calgaro, M., Simões, W.L & Pinto, J.M. Irrigação e fertirrigação. (2010). *Embrapa Semiárido* (2th ed). Disponível em:
<http://www.cpatas.embrapa.br:8080/sistema_producao/spuva/irrigacao.html>.
- Bernardo, S., Soares, A.A. & Mantovani, E.C. (2008). *Manual de irrigação* (8th ed.). Viçosa (MG):UFV, p. 625.

Busato, C.C.M., Soares, A.A., Sediya, G.C., Motoike, S.Y. & Reis, E.F. (2011). Manejo da irrigação e fertirrigação com nitrogênio sobre as características químicas da videira 'Niágara Rosada'. *Ciência Rural*. 41(7):1183-1188.

Coelho, E.F. & Filho, M.A.C. (2007). *Orientações práticas para a fertirrigação do mamoeiro*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. (Circular Técnica, 85).

Coelho, E.F., Costa, E.L., Borges, A.L., Andrade Neto, T.M. & Pinto, J.M. (2010). Fertirrigação. *Informe Agropecuário*. 31(259):58-70.

Coelho, V.P.M., Rosa, K.M., Paiva, P.E.B., Moreira, E.F.A. & Carvalho, M. (2018). Fertigation and growth regulator on coffee seedling production in tubes. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 48(4):350-357.

Cunha, F.N., Oliveira, R.C., Silva, N.F., Moura, L.M.F., Teixeira, M.B. & Filho, R.R.G. (2013). Variabilidade temporal da uniformidade de distribuição em sistema de gotejamento. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. 7(4):248 - 257.

Delbem, F.C., Scabora, M.H., Filho, C.V.S., Heinrichs R., Crociolli, C.A. & Cassiolato, A.M.R. (2011). Fontes e doses de adubação nitrogenada na atividade microbiana e fertilidade do solo cultivado com *Brachiaria brizantha*. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 33(2):361-367.

Ernani, P.R., Bayer, C., Almeida, J.A. & Cassol, P.C. (2007). Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo Método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. *Revista Brasileira de ciência do solo*. 31(1):393-402.

Frizzone, J.A. (2012). *Microirrigação: Gotejamento e microaspersão* (1th ed). Maringá (PR): Eduem.

Lopes, L.N.; Souza, C.F.; Santoro, B.L. (2010). Utilização da TDR para monitoramento da solução de nitrato de potássio em Latossolo Vermelho-Amarelo. *Engenharia Agrícola*. 30(5):932-947.

- Medeiros, J.F., Sousa, V.F., Maia, C.E., Coelho, E.F. & Marouelli, W.A. (2011). Determinação e preparo da solução de fertilizantes para fertirrigação. In: Sousa, V.F., Marouelli, W.A., Coelho, E.F., Pinto, J.M., Coelho Filho, M.A. *Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças*. (1th ed.) Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. p. 265-288.
- Pedrotti, A., Chagas, R.M., Ramos, V.C., Prata, A.P.N., Lucas, A.A.T. & Santos, P.B. (2015). Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas*. 19(2):1308-1324.
- Pereira, A.S., Shitsuka, D.M., Parreira, F.J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.
- Pinto, J.M. & Brito, R. A. L. (2010). *Equipamentos para aplicação de fertilizantes via irrigação*. Petrolina: Embrapa Semiárido. (Documentos, 231).
- Sangoi, L., Ernani, P.R., Lech, V.A., & Rampazzo, C. (2003). Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. *Ciência Rural*. 33(1):65-70.
- Santoro, B.L., Sato, L.M., Brunhara, J.P.B., Peres, J.G. & Souza, C.F. (2013). Monitoramento da distribuição de uma solução no solo via fertirrigação por gotejamento. *Irriga*. 18(3):572-586.
- Santos, G.S., Medeiros, P.R.G., Teles, E.C.V.P.A., Gonçalves, D.R. & Nascimento, R.C (2015). Entupimento de gotejadores em função do uso da fertirrigação e controle com ácido fosfórico. *Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem*: São Cristovão-SE.
- Silva, E.F.F.; Duarte, S.N. & Coelho, R.D. (1999). *Salinização dos solos cultivados sob ambiente protegidos no Estado de São Paulo*. In: Folegatti, M.V. (ed.) *Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças*. Guaíba: Agropecuária. p.267-277.

Silva, P.F., Lima, J.G.S., Barros, A.C., Silva, E.M. & Duarte, S.N. (2013) Sais fertilizantes e manejo da fertirrigação na produção de tomateiro cultivado em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 17(11):1173-1180.

Silva, A.O.A. (2014). Fertirrigação e o processo de salinização de solos em ambiente protegido. *Pesquisas Agrárias e Ambientais*. 2(3):180-186.

Souza, T.R., Quaggio, J.A. & Silva, G.O. (2006). Dinâmica de íons e acidificação do solo nos sistemas de fertirrigação e adubação sólida na citricultura. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 28(3):501-505.

Souza, T.R. (2012). Dinâmica de nutrientes na solução do solo em pomar fertirrigado de citros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47(6):846-854.

Shani, M. (1983). *La fertilizacion combinada con el riego*. Telaviv: Ministério de Agricultura de Israel, p. 36.

Takahashi, H.W., Barzan, R.R., Bertocelli, D.J., Suzuki, A.B.P., Fregonezi, G.A.F., Sampaio, M.D.L., Firmano, R.F. & Silva, J.B. (2018). Manejo da solução nutritiva sobre a qualidade pós-colheita de tomate salada fertirrigado em areia. *Brazilian Journal of Food Technol.* 21(e2016144):1-6.

Texeira, J.C., Coelho, E.F. & Barros, D.L. (2014). Concentração da solução de injeção e frequência de fertirrigação em Latossolo Amarelo. In: *II INOVAGRI International Meeting*. Fortaleza, Anais... Fortaleza. p. 4226-4231.

Trani, P.E., Tivelli, S.W. & Carrijo, O.A. (2011). *Fertirrigação em hortaliças*. Campinas: Instituto Agronômico. (Boletim Técnico, 196).

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Edgo Jackson Pinto Santiago – 27%

Ana Karla da Silva Freire – 5%

Jackson Freitas de Amorim – 5%

Cláudio Tadeu Cristino – 15%

Alessandro Dal'Col Lúcio – 15%

Frank Gomes-Silva – 13%

Antonio Samuel Alves da Silva – 10%

José Ramon Barros Cantalice – 5%

Moacyr Cunha Filho – 5%