

Modelação bidimensional da dinâmica da água e dos fertilizantes azotados num solo regado com águas salinas

Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate in plots with sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters

Tiago B. Ramos¹, Jirka Šimůnek², Maria C. Gonçalves³, José C. Martins³, Ângela Prazeres³ e Luís S. Pereira¹

¹ CEER – Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, email: tiago_ramos@netcabo.pt

² Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, CA, 92521, USA.

³ Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Quinta do Marquês, Av. República, 2784-505 Oeiras, Portugal.

Resumo

A região do Alentejo enfrenta problemas de escassez de água que potenciam alguns problemas ambientais, nomeadamente: (i) os riscos de salinização/sodicização do solo devido a práticas de rega desadequadas, e (ii) a poluição difusa resultante de práticas de fertilização pouco eficientes. Neste trabalho, o modelo HYDRUS-2D foi usado para simular a dinâmica da água e das formas azotadas num solo cultivado com sorgo sacarino e regado com um sistema de rega gota-a-gota que incluía cenários de águas com diferentes teores em sais e níveis de fertirrega. Os teores de água no solo (θ), a condutividade eléctrica da solução do solo (CE_{ss}), e as concentrações de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ foram monitorizadas entre 2007 e 2010 em cada parcela. A comparação entre os dados medidos e simulados resultou num RMSE de $0.030\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$, 1.764 dS m^{-1} , $0.042\text{ mmolc L}^{-1}$ e $3.078\text{ mmolc L}^{-1}$, respectivamente para θ , CE_{ss} , e as concentrações de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$. A transpiração real variou entre 264 e 334 mm, dependendo do ano e dos níveis de salinidade do solo. O sorgo sacarino revelou-se tolerante a águas salinas durante um ciclo cultural, mas o seu uso continuado resultou na salinização do solo e na diminuição da transpiração. Por outro lado, a absorção e lixiviação de N dependeram da dotação e frequência da rega, da quantidade de N aplicada em cada fertirrega e da forma de N no adubo. O efeito do stress osmótico na lixiviação de azoto foi mínimo. A função de produção desenvolvida a partir das concentrações simuladas de $N-NO_3^-$ absorvidas pelas plantas e do rendimento do sorgo sacarino em termos de biomassa seca, mostrou que as necessidades de N variaram entre 50 e 180 kg/ha dependendo da qualidade de água aplicada. As simulações com o HYDRUS-2D foram, portanto, úteis para entender as melhores estratégias a seguir de modo a aumentar a absorção de nutrientes pelas plantas e reduzir as perdas por lixiviação.

Palavras-chave: azoto nítrico e amoniacal; HYDRUS-2D; salinização; sorgo sacarino.

Abstract

The Alentejo region in southern Portugal faces water scarcity and environmental problems as a result of high atmospheric demands and irregular rainfall. The HYDRUS software package has been calibrated and validated in the last few years in order to minimize human-induced salinization and sodification, and non-point source pollution from agricultural fertilization in the region. In this study, HYDRUS-2D was used to assess the fate of nitrogen in a plot planted with sweet sorghum, while considering drip irrigation scenarios with different levels of nitrogen and salty waters. HYDRUS-2D simulated water contents, EC_{sw} , and $N-NH_4^+$ and $N-NO_3^-$ concentrations continuously between 2007 and 2010, while producing RMSE between simulated and measured data of $0.030 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, 1.764 dS m^{-1} , $0.042 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, and $3.078 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, respectively. Actual transpiration varied between 264 and 334 mm depending upon the crop season and the irrigation treatment. Sweet sorghum showed to be tolerant to saline waters only during one crop season. After that, the continuous use of saline waters led to soil salinization, and to root water uptake reductions due to the increasing salinity stress. N uptake and leaching were dependent on the amount of water flowing through the root zone, the amount of N applied, the form of N in the fertilizer, and the timing and number of fertigation events. The effect of the osmotic stress on nitrogen leaching was only minimal. The yield function developed from $N-NO_3^-$ uptake and dry biomass yield estimated N needs between 50 and 180 kg/ha depending of the quality of the water applied. The simulations with HYDRUS-2D were thus useful to understand the best strategies toward increasing nutrient uptake and reducing nutrient leaching.

Keywords: ammonium; HYDRUS-2D; nitrate; salinization; sweet sorghum.

Introdução

Na região do Alentejo, o regadio desempenha um importante papel socioeconómico em função de problemas de escassez de água que limitam a produção agrícola durante longos períodos do ano. No entanto, também reforçou vários problemas ambientais em resultado de práticas de rega desadequadas, nomeadamente, problemas de salinização/sodicização induzida e de poluição difusa dos fertilizantes aplicados. É fundamental, portanto, estabelecer políticas sustentáveis para o regadio de modo a mitigar e até evitar aqueles riscos. Essas políticas podem incluir a adopção de culturas menos exigentes em água e nutrientes, assim como basearem-se na análise quantitativa do movimento subsuperficial da água e dos produtos químicos dissolvidos.

O modelo HYDRUS (Šimůnek *et al.*, 2008) tem sido utilizado na região do Alentejo ao longo da última década, de modo a compreender a dinâmica da água e o transporte de solutos na zona vadosa do solo e prever a qualidade das águas subterrâneas, implementar melhores práticas de rega e de fertilização e quantificar os riscos de salinização e sodicização dos solos da região. Destacam-se os trabalhos de Gonçalves *et al.* (2006) e Ramos *et al.* (2011) que analisaram com sucesso os fluxos e teores de água no solo, a condutividade eléctrica da solução do solo (CE_{ss}), o transporte dos catiões de troca (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+) e das formas azotadas ($N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$), a razão de adsorção de sódio (SAR) e a percentagem de sódio de troca (ESP) ao longo de vários anos. Estes estudos permitiram uma melhor compreensão dos

complexos processos associados ao transporte dos solutos no solo e das relações entre o stress salino causado pelo uso de águas salinas e absorção e lixiviação de nutrientes. No entanto, foram limitados pela abordagem unidimensional seguida, negligenciando os fluxos e gradientes na direcção horizontal, não conseguindo também simular adequadamente os sistemas de micro-rega que podem aplicar eficientemente a água e os nutrientes nas quantidades e locais adequados.

Neste estudo seguiu-se, portanto, uma abordagem bidimensional para prever o destino das formas azotadas num campo com sorgo sacarino regado por um sistema de rega gota-a-gota, considerando simultaneamente diferentes níveis de fertirrigação e cenários de qualidade da água. Os dados de campo foram usados para calibrar e validar o modelo HYDRUS-2D de modo a prever (i) os teores de água no solo e fluxos, (ii) a CE_{ss} , (iii) redução da absorção de água pelas raízes com a utilização de águas salinas, e (iv) as concentrações de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ no solo e lixiviação. Para cada cenário foram calculados os balanços de água e de nutrientes com base nas previsões do modelo. Uma descrição completa deste estudo pode ser encontrada em Ramos *et al.* (2012).

Material e Métodos

Dados de campo

A experiência foi realizada no campo experimental de Alvalade do Sado (37° 56' 48" N e 8° 23' 40" W) entre Maio de 2007 e Abril de 2010. O campo experimental foi dividido em 12 parcelas (12 × 6.75 m²) onde uma cultura de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) foi regada por um sistema gota-a-gota que aplicava, em cada parcela experimental, diferentes quantidades de água de boa qualidade, água salina e água com um fertilizante azotado (NH_4NO_3). A qualidade de água variava, portanto, entre as diferentes parcelas experimentais embora a quantidade de água aplicada em cada uma das parcelas fosse idêntica.

A quantidade total de água aplicada variou entre 425–546 mm ao longo dos anos, enquanto que a dotação média variou entre 15–17 mm. A adubação azotada foi aplicada entre 3–6 fertirregas, durante o mês de Julho. A CE das águas de boa qualidade, águas salinas e águas com fertilizantes foi de 0.8, 7.6–10.6 e 6.8–9.5 dS m⁻¹, respectivamente. A concentração de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ nas águas com fertilizantes variou entre 67.7-95.0 mmol_c L⁻¹.

Nas parcelas com maior aplicação de águas salinas e naquelas regadas apenas com a água da região, foram instaladas sondas TDR e cápsulas de cerâmica às profundidades de 20, 40 e 60 cm, para medir os teores de água no solo, a CE_{ss} e os teores de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ na solução do solo. A biomassa seca de sorgo sacarino foi determinada no final de cada ano após secagem em estufa, a 70 °C até peso constante, das plantas colhidas em cada parcela experimental.

Modelação dos processos

O modelo HYDRUS-2D (Šimůnek *et al.*, 2008) foi utilizado para simular a dinâmica da água e transporte de nutrientes num domínio aximétrico, com o eixo localizado sobre a posição de um gotejador. O domínio de transporte foi, assim, definido como um rectângulo com uma largura de 37.5 cm (metade da distância entre os laterais colocados ao longo das linhas de

sorgo) e uma profundidade de 100 cm. O fluxo de cada gotejador foi calculado em função do volume de água aplicado e da superfície molhada ($\pi \times 20^2$), tendo sido ajustado à duração de cada rega de modo a permitir a aplicação de águas de diferente qualidade no mesmo dia, sem produzir pressões positivas na superfície do solo.

A dinâmica da água no solo foi calculada com a equação de Richards, enquanto que a equação de convecção-dispersão (CDE) foi utilizada no transporte de solutos. As propriedades hidráulicas do solo foram descritas de acordo com o modelo de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980). Tendo em conta o tipo de adubo utilizado (NH_4NO_3), a nitrificação de N-NH_4^+ em N-NO_3^- foi considerada o principal processo do ciclo do N a ocorrer no solo. Este processo foi descrito por meio de uma cadeia de degradação sequencial de primeira ordem:

$$\phi_{\text{N-NH}_4^+} = -\phi_{\text{N-NO}_3^-} = -\mu_{w,\text{N-NH}_4^+} \theta c_{\text{N-NH}_4^+} - \mu_{s,\text{N-NH}_4^+} \rho \bar{c}_{\text{N-NH}_4^+} \quad (1)$$

em que c e \bar{c} são as concentrações do soluto nas fases líquida [ML^{-3}] e sólida [M^{-1}] do solo, respectivamente, μ_w e μ_s (0.2 d^{-1}) são as constantes de degradação de primeira ordem do soluto nas fases líquida e sólida [T^{-1}], respectivamente, θ é o teor de água [L^3L^{-3}] e ρ é a densidade do solo [ML^{-3}]. A interacção dos solutos entre as fases sólida e líquida foi descrita por meio de uma adsorção isotérmica linear, embora apenas o N-NH_4^+ tenha sido considerado como passível de ser adsorvido na fase sólida do solo ($K_d=3.5 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$).

As equações de Richards e CDE incorporam um termo que tem em conta a absorção de água pelas raízes. Esta foi definida através das taxas de evaporação do solo e de transpiração das plantas, obtidas a partir dos valores diários da evapotranspiração de referência, determinada pelo método de Penman-Monteith, dos coeficientes culturais duais (Allen *et al.*, 1998) e do índice de área foliar (LAI). Os stresses de água e osmótico, que limitam a transpiração potencial da cultura, foram depois definidos de acordo com as funções propostas por Feddes *et al.* (1978) e Maas (1990), respectivamente. A absorção de nutrientes pelas plantas foi simulada considerando uma abordagem passiva e ilimitada para as espécies azotadas (Šimůnek e Hopmans, 2009). A validação do modelo foi realizada através da comparação dos valores medidos no campo e das simulações obtidas com o modelo HYDRUS-2D, utilizando-se o erro quadrático médio (RMSE) para quantificar a incerteza do modelo.

Resultados e Discussão

A comparação dos teores de água medidos e simulados entre 2007 e 2010 resultou num RMSE de $0.030 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Os valores de transpiração potencial (T_p) e actual (T_a) variaram entre 360–457 e 264–334 mm, respectivamente. As reduções da T_p devido ao stress hídrico (21.9–27.4%) foram função do calendário de rega adoptado. As reduções da T_p devido ao stress salino (2.3–7.0%) foram função do uso contínuo de águas salinas, fazendo-se apenas sentir no final da segunda época cultural. A diminuição da T_p devido ao aumento do stress osmótico foi, portanto, mínima, uma vez que o sorgo sacarino é moderadamente tolerante à salinidade (Maas, 1990). O RMSE obtido entre CE_{ss} medidos e simulados foi de 1.764 dS m^{-1} .

A lixiviação do azoto esteve directamente relacionada com o fluxo de água no solo, a quantidade de N aplicada, na forma do N no adubo e o número de fertirregas realizadas. Com base nos resultados do modelo, a maior parte do N-NH_4^+ foi rapidamente nitrificado em N-NO_3^- .

NO_3^- , não atingindo profundidades superiores a 20 cm. A lixiviação do azoto ocorreu principalmente na forma de N-NO_3^- (Figura 1). Quanto maior o número de fertirregas realizadas, menor a quantidade de N aplicada por evento e menor a quantidade de N-NO_3^- lixiviado. A absorção de nutrientes pelas raízes das plantas ocorreu principalmente na forma de N-NO_3^- . O número de fertirregas teve também influência na quantidade de N-NO_3^- absorvido pelas raízes das plantas. Os efeitos do stress salino na absorção de nutrientes (e inversamente sobre lixiviação de nutrientes) foi, novamente, relativamente reduzido, uma vez que o sorgo sacarino apresenta uma tolerância moderada à salinidade e, como referido anteriormente, as reduções da transpiração potencial com o aumento do stress osmótico, foram também reduzidas. Os valores de RMSE obtidos entre os valores medidos e simulados das concentrações de N-NH_4^+ e N-NO_3^- foram de 0.042 e 3.078 mmolc L^{-1} , respectivamente.

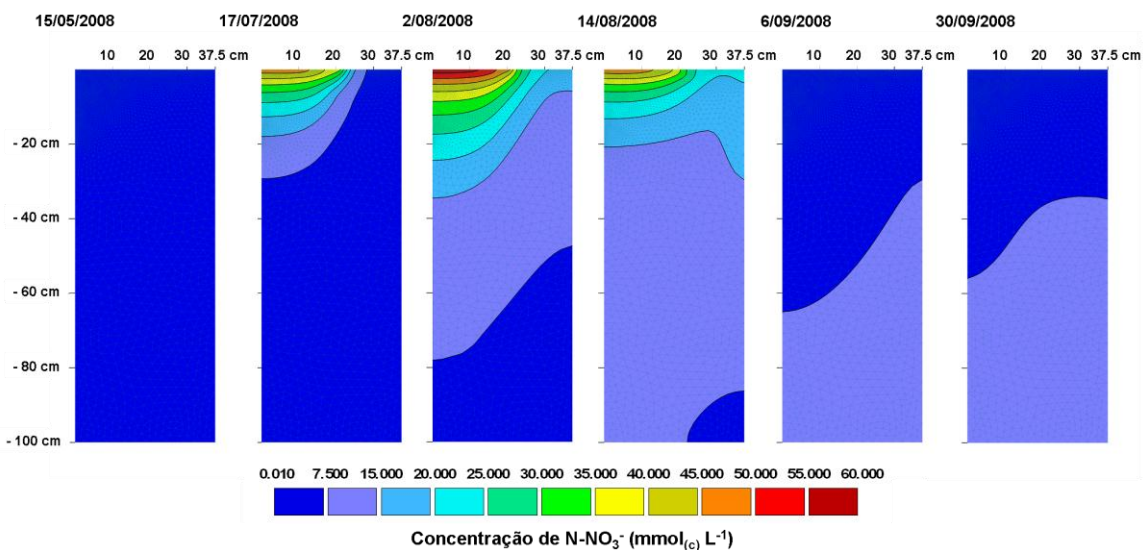


Figura 1 – Distribuição das concentrações de N-NO_3^- numa das parcelas regadas com águas salinas durante a segunda época cultural. O gotejador foi localizado no canto superior esquerdo de cada data.

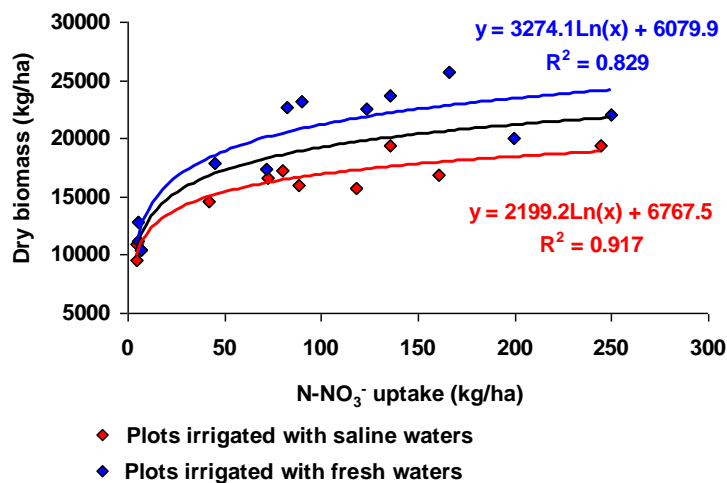


Figura 2 – Relação entre os teores simulados de N-NO_3^- absorvidos pelas plantas e o rendimento em biomassa seca (Y).

A Figura 2 apresenta as relações logarítmicas entre a absorção de N-NO_3^- , tal como simuladas pelo modelo HYDRUS-2D, e o rendimento de biomassa seca determinado experimentalmente nas modalidades regadas com águas salinas e águas de boa qualidade. As funções obtidas nas parcelas regadas com água de boa qualidade revelaram que o aumento na absorção de N-NO_3^- pela cultura resultou em acréscimos decrescentes na resposta da biomassa seca total, com níveis óptimos a serem atingidos entre os 130-180 kg $\text{N-NO}_3^-/\text{ha}$. Nas parcelas regadas com águas salinas esses níveis foram inferiores (50-100 kg $\text{N-NO}_3^-/\text{ha}$).

Conclusões

O modelo HYDRUS-2D conseguiu prever com sucesso o destino do fertilizante aplicado nas diferentes parcelas experimentais. O uso de águas marginais mostrou-se viável para a rega do sorgo sacarino durante o primeiro ano cultural. Para além disso, as necessidades de água relativamente reduzidas (360-457 mm) e as baixas exigências de N (130-180 kg/ha) tornam o sorgo sacarino como uma boa alternativa quando comparado com outras culturas mais tradicionais. A lixiviação de N foi função da drenagem interna, da quantidade de N aplicado, da forma de N no adubo, da frequência e dotações de rega e do número de fertirregas realizadas. A modelação dos processos envolvidos foi útil para entender melhor quais as práticas de rega e de fertilização mais adequadas de modo a aumentar a absorção e reduzir a lixiviação de nutrientes.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto EUTROPHOS (PTDC/AGR-AAM/098100/2008) da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). T. B. Ramos foi financiado pela bolsa FCT SFRH/BD/60363/2009.

Bibliografia

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. e Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrig. Drain. Paper, 56, FAO, Rome, Italy, pp 326.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. e Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp 188.
- Gonçalves, M.C., Šimůnek, J., Ramos, T.B., Martins, J.C., Neves, M.J. e Pires, F.P., 2006. Multicomponent solute transport in soil lysimeters irrigated with waters of different quality. Water Resour. Res., 42, W08401.
- Maas, E.V., 1990. Crop salt tolerance. In: Tanji, K.K. (Ed.), Agricultural Salinity Assessment and Management. Manual Eng. Pract., vol. 71, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va., p. 262–304.
- Ramos, T.B., Šimůnek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.L. e Pereira, L.S., 2011. Field Evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. J. Hydrol., 407: 129-144.
- Ramos, T.B., Šimůnek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A. e Pereira, L.S., 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. Agric. Water Manage., 111: 87-104.

- Šimůnek, J. e Hopmans, J.W., 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecol. Model.*, 220: 505-521
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. e Šejna, M., 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J.*, 7(2): 587-600.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.