SIMULAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA POR RAÍZES. I. TEORIA

C. A. Sansigolo*

A extração de água pelas raízes é um dos principais componentes do balanço hídrico em solos vegetados.

Em princípio, duas aproximações alternativas são adotadas na sua modelagem físico-matemática. A primeira baseia-se nas propriedades integradas do sistema radicular explorando um volume de solo significativo e a segunda concentra-se nas propriedades de uma raíz simples. Na aproximação integrada ou macroscópica, o sistema radicular é considerado como um sumidouro de água, simplesmente adicionado à equação da continuidade:

$$\partial\Theta/\partial t = -\nabla . q - q_r \tag{1}$$

onde $\underline{\Theta}$ é a umidade volumétrica do solo, $\underline{t}$ o tempo, $\underline{q_r}$ o termo de extração de água pelas raízes e $\underline{q}$ as densidades de fluxo de água no solo, comumente descritas, em função da condutividade hidráulica ($\underline{K}$) e do potencial total da água no solo ($\underline{\psi_s}$), pela equação de Darcy:

$$q = - K \nabla \psi_s \tag{2}$$

Combinando-se (1) e (2), tem-se a equação diferencial básica para fluxo de água no solo e extração pelas raízes.

$$\partial\Theta/\partial t = \nabla . (k \nabla \psi_s) - q_r \tag{3}$$

Considerando-se um fluxo unidimensional, na direção vertical, e o potencial total da água no solo em função de seus dois componentes principais, o potencial matricial ($\underline{\xi}$) e o gravitacional ($\underline{z}$) ($\underline{\psi_s} = \underline{\xi} - \underline{z}$), (3) torna-se:

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z[k(\partial\xi/\partial z) - k] - q_r \tag{4}$$

No modelo da raíz simples ou microscópico, esta é tomada como um cilindro infinitamente longo, de raio constante e com propriedades uniformes de absorção de água. Neste caso, o termo de extração q_r não aparece, e a eq.(3), em coordenadas cilíndricas, supondo geometria radial na direção horizontal, torna-se:

$$\partial\Theta/\partial t = 1/\nu \, \partial/\partial\nu \quad (\nu k \quad \partial\psi_s/\partial\nu) \tag{5}$$

onde ν é a coordenada radial.

Em condições de equilíbrio dinâmico, com a água fluindo de uma distância $\underline{\nu_2}$ para as raízes de raio $\underline{\nu_1}$ e supondo-se $\underline{k}$ constante, tem-se como solução analítica para (5):

$$q'_r = - [2\pi k \, (\psi_r - \psi_s)]/\ell n \, (\nu_2/\nu_1) \tag{6}$$

onde $\underline{q'_r}$ é a taxa de extração de água por unidade de comprimento de raíz e ψ_1 o potencial da água na superfície das raízes. O modelo da raíz simples (eq. 6) pode ser extendido para um sistema radicular completo, desde que uniforme, através de:

$$q_r = q'_r \, Z_r \, \ell_r \tag{7}$$

onde $\underline{Z_r}$ é a profundidade do sistema radicular $\underline{\ell_r}$ o comprimento de raíz por unidade de volume do solo.

A extração de água pelas raízes pode, também, ser expressa analogicamente à Lei de Ohm. Considerando-se um fluxo unidimensional em equilíbrio dinâmico, tem-se:

$$q_r = - (\psi_r - \psi_s)/r_s = - (\psi_p - \psi_r)/r_r = - (\psi_p - \psi_s)/(r_r + r_s) \tag{8}$$

---

*Departamento de Meteorologia, IAG-USP, São Paulo.

onde ψ_p é o potencial da água na planta, r_r a resistência das raízes, que pode ser subdividida numa resistência à absorção e outra à condução e r_s a resistência do solo, que pode ser obtida através da combinação das eq. (6) e (7):

$$q_r = - (\psi_r - \psi_s)/(b/k) \qquad (9)$$

onde b é um parâmetro relacionado ao comprimento e à geometria do sistema radicular:

$$b = \ell n\ (\nu_2/\nu_1)/\ 2\ \pi\ \ell_r\ z_r \qquad (10)$$

Verifica-se através da combinação do segundo termo da eq. (8) com a eq.(10) que $b/k = r_s$

O modelo de simulação implementado é desenvolvido a partir da eq. (4), onde o termo de extração é dado, para cada camada à profundidade z, pelo último termo da equação (6):

$$\partial\Theta/\partial t = \partial/\partial z\ [k(\partial\xi/\partial z) - k] + [\psi_p - \psi_s(z)]/[r_r(z) + r_s(z)] \qquad (11)$$

O volume de água extraído pelas raízes de uma camada de solo compreendida entre dois planos horizontais às profundidades z_1 e z_2 é dado por:

$$\int_{z_1}^{z_2}\int_{t_1}^{t_2} q_r(z)\ dzdt = \int_{t_1}^{t_2} (q_{z_1} + q_{z_2})\ dt - \int_{z_1}^{z_2}\int_{t_1}^{t_2} (\partial\Theta/\partial t)\ dzdt \qquad (12)$$

onde q_z são os fluxos verticais nos limites da camada.

A partir das taxas médias de extração pelas raízes às diferentes profundidades $\bar{q}_r(z)$, pode-se fazer uma análise quantitativa da magnitude e variaçao das resistências do solo e das raízes, além do potencial total da água na planta. Com esse objetivo, aplica-se a função de extração ($q_r = - (\psi_p - \psi_s)/(r_r + r_s)$) às varias profundidades z e desse modo, para cada período, uma série de equações podem ser formuladas com os valores conhecidos de $q_r(z)$, $\psi_s(z)$ e $1/k(z)$, para se determinar as 3 outras variáveis desconhecidas ψ_p, $b(z)$ e $r_r(z)$.

Supondo-se uma variação exponencial de $b(z)$ e $r_r(z)$ em profundidade, devido à um decréscimo exponencial em massa do sistema radicular, $\omega(z) = \omega(o)\exp(- \alpha\ z)$, obtem-se:

$$b(z) = b(o)\ \exp\ (\alpha\ z) \qquad (13)$$

$$r_r(z) = r_r(o)\ \exp\ (\alpha\ z) \qquad (14)$$

Após substituição de (13) e (14) na função de extração e rearranjamento, tem-se:

$$- [\psi_s(z)/\bar{q}_r(z)]\ \exp\ (- \alpha\ z) = \psi_p/\bar{q}_r(z)\ \exp\ (- \alpha\ z) - b(0)/k(z) - r_r(0) \qquad (15)$$

Aplicando-se a equação (15), do tipo $y = a_2x_2 + a_1x_1 + a_o$ a 3 ou mais níveis às profundidades z, tem-se a solução para as váriáveis ψ_p, $b(o)$ e $r_r(o)$.

Este modelo foi testado em condições de campo e os resultados obtidos são apresentados na segunda parte do trabalho.