

# Modelagem matemática do crescimento e absorção da água do solo pela raiz vegetal

## Msc. Minéia Cappellari Fagundes

Depto de Matemática, UNEMAT  
78390-000, Barra do Bugres, MT  
E-mail: mineiacf@gmail.com

## **Dr. Pedro Augusto Pereira Borges**

Rua São Francisco, 501 Ijuí, RS  
E-mail: pborges@unijui.tche.br

### **Resumo**

*O estudo das variações do teor de umidade do solo juntamente com absorção da água pelas plantas é de grande interesse para pesquisas em sistemas florestais e agrícolas, pois o movimento de nutrientes depende basicamente do movimento da água no sistema solo/planta/atmosfera. Neste trabalho foram propostos dois modelos matemáticos, um sobre o movimento da água no solo considerando a presença de raízes e outro sobre o crescimento das raízes: o primeiro modelo é a própria equação de Richards em coordenadas cilíndricas [3], com condições de fronteira de 2ª espécie, com um termo fonte tipo sorvedouro, cuja intensidade está relacionada com a presença das raízes; o segundo modelo expressa o crescimento das raízes através de uma equação de difusão, que relaciona a densidade de ápices com o espaço e o tempo. Os modelos foram resolvidos numericamente pelo método das Diferenças Finitas Centrais (CDS – Central Difference Scheme), pelo esquema temporal explícito. A densidade de ápices foi obtida experimentalmente para uma espécie arbórea (Louro-pardo [*Cordia trichotoma*]) em seis instantes de tempo durante 45 dias, cujos dados foram utilizados para determinar os parâmetros do modelo de crescimento das raízes. Os parâmetros da curva característica do solo (proposta por Van Genuchten)[6] foram obtidos por ajuste com base nos dados experimentais da medição do potencial matricial em função do teor de umidade e foram usados para a solução do primeiro modelo. Foram realizadas simulações que mostraram o aumento da densidade de ápices para diversos tempos, e simulações do movimento da água no solo considerando a absorção de água pelas raízes. As simulações realizadas*

*mostraram a versatilidade do modelo para descrever diferentes tipos de sistemas radiciais, constituindo-se em um poderoso instrumento auxiliar para a análise do movimento da água no solo, crescimento e absorção de água pelas raízes.*

### **1. Introdução**

O solo é um reservatório natural de água para as plantas e todas as práticas da agricultura que visam promover condições ideais para o crescimento das culturas [2]. A compreensão dos processos dinâmicos da água no solo faz parte de assuntos científicos terrestres do ciclo hidrológico. Esses processos são de grande interesse e importância, e inclui infiltração, redistribuição e evapotranspiração. O conhecimento detalhado da dinâmica da água durante o desenvolvimento de uma cultura fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola, reflorestamentos, irrigação, adubação visando a otimização da produtividade.

No entanto o solo é um sistema complexo constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos. As partículas sólidas formam um meio poroso, que armazenam líquidos e gases [4]. Dentro desse sistema complexo a água se movimenta devido à ação dos potenciais, gravitacional, pressão, matricial, osmótico e outros. A soma de todos os potenciais é chamada de potencial total. A capacidade de armazenamento de água no solo (retenção de água no solo) é influenciada pelas propriedades do solo: textura do solo, estrutura, compactação, densidade, porosidade, condutividade hidráulica, teor de umidade e outras.

A pesquisa do movimento da água no solo utiliza elementos da teoria sobre o

comportamento de fluidos em meios porosos. Richards, em 1931 [3], utilizou o princípio de conservação de massa e a equação de Darcy para relacionar as variações do teor de umidade com os potenciais gravitacional, matricial, osmótico e de pressão para solos saturados e não saturados, cuja demonstração é encontrada em vários trabalhos, tais como [3],[4],[5]. Assim Richards apresenta a equação diferencial que rege o movimento da água que é denominada Equação de Richards. Para este trabalho será utilizada a equação de Richards em coordenadas cilíndricas, considerando um caso bidimensional com a presença de um termo fonte do tipo sorvedouro. O problema consiste em estimar o fluxo de água do solo que a planta absorve pelas raízes em um determinado intervalo de tempo, no interior de um cilindro de solo, submetido à irrigação na superfície. Para isto foram desenvolvidos dois modelos um para o movimento da água no solo, e outro para descrever o crescimento do sistema radicial.

## 2. Modelo Matemático

### 2.1. Modelo para o movimento da água no solo

O modelo matemático que descreve o movimento da água no solo, em condições isotrópicas é descrito pela equação de Richards, em coordenadas cilíndricas relacionando o teor de umidade com o potencial total, e com um termo fonte (sorvedouro), toma a seguinte forma

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ k_r(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ k_\phi(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial \phi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - g(z,t) \quad (1)$$

onde

$\Theta$  é o teor de umidade volumétrico adimensional do solo;

$k(\Theta)$  é a condutividade hidráulica ( $m^2 s^{-1} Pa^{-1}$ );

$\psi$  é o potencial hidráulico total (Pa);

$\phi$  é o ângulo polar (rad);

$t$  é o tempo (s);

$r$  e  $z$  são as variáveis espaciais (m).

Para um problema de eixo simétrico as variações do potencial em relação a  $\phi$  são nulas e a equação (1) torna-se

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ k_r(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z(\Theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - g(z,t) \quad (2)$$

A equação (2), que será utilizada neste trabalho, descreve um modelo matemático para o movimento de água no solo com as seguintes condições iniciais e de fronteira:

$$\Theta(r, z, 0) = \Theta_0 \quad 0 < r < R, 0 < z < H$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z}(r, 0, t) = q_{ir}^* \quad 0 < r < R, 0 < t < t_i$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z}(r, H, t) = 0 \quad 0 < r < R, t > t_i$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial r}(R, z, t) = 0 \quad 0 < z < H, t > 0$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z}(r, H, t) = 0 \quad 0 < r < R, t > 0$$

onde

$g(z,t)$  é a absorção de água pela raiz ( $m^3 s^{-1}$ )

$H$  é a profundidade do tubo (m)

$R$  é o raio do tubo (m)

$t$  é o tempo (s)

$t_i$  é o tempo de irrigação (s)

$\Theta_0$  é o teor de umidade volumétrico inicial ( $m^3 m^{-3}$ )

$q_{ir}^*$  é o fluxo de irrigação por unidade de área ( $ms^{-1}$ )

O potencial total de água no solo é a soma de todos os potenciais (gravitacional, pressão, matricial, osmótico), porém dependendo das condições hídricas do solo (saturado ou não saturado), esses potenciais podem assumir valores nulos, permitindo escrever a equação de Richards de formas específicas para cada condição [1].

### 2.2. Modelo para o crescimento do sistema radicial

A equação (2) possui um termo fonte do tipo sorvedouro, que quantifica a absorção de água do solo pela raiz da planta. Neste trabalho, esse termo será considerado proporcional ao número de ápices da raiz por unidade de volume ( $\rho$ , densidade de ápices,  $na \cdot m^{-3}$ , onde “na” é o número de ápices).

O crescimento do sistema radicial foi simulado considerando uma dispersão

difusiva, descrita pela conhecida equação diferencial parcial da difusão. Nessa equação relacionou-se a densidade de ápices em função do tempo e do espaço

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( R_r \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( R_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \frac{g_a(z,t)}{K_c} \quad (3)$$

para  $0 < r < R, 0 < z < H$  e  $t > 0$

Com as seguintes condições iniciais e de fronteira

$$\rho(r, z, 0) = \rho_0, \quad 0 < r < R, \quad 0 < z < H$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial z}(r, 0, t) = 0, \quad 0 < r < R, \quad t > 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial r}(R, z, t) = 0, \quad 0 < z < H, \quad t > 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial z}(r, H, t) = 0, \quad 0 < r < R, \quad t > 0$$

onde

$\rho$  é a densidade de ápices ( $na m^{-3}$ )

$\rho_0$  é a densidade de ápices inicial ( $na m^{-3}$ )

$R_r$  e  $R_z$  são constantes de difusão dos ápices ( $m^2 h^{-1}$ )

$g_a(z, t)$  é o termo de geração de massa de raiz ( $na h m^{-3}$ )

$K_c$  é o fator de crescimento da raiz ( $h^{-1}$ )

$H$  é a profundidade do tubo ( $m$ )

$R$  é o raio do tubo ( $m$ )

$r$  e  $z$  são variáveis espaciais ( $m$ )

$t$  é a variável temporal ( $h$ )

O número de ápices por volume de controle foi estimado experimentalmente através da imagem da raiz obtida por scanner, mostrada na Figura 2. Para um problema de eixo simétrico em coordenadas cilíndricas, o volume de controle é um anel. Conforme a Figura 1.

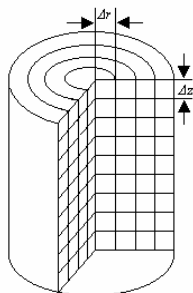


Figura 1 – Esquema dos anéis no volume de controle

A Figura 2 apresenta a raiz em forma plana

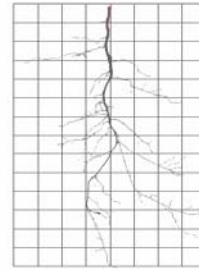


Figura 2 – Sistema radicular planificado da espécie arbórea (Louro-pardo [*Cordia trichotoma*]), para tempo experimental de 0 dias.

Como cada ápice situado em uma quadricula da malha plana pode estar ocupando qualquer posição dentro do volume de controle, a densidade de ápices é dada por:

$$\rho = \frac{na}{VC} \quad (4)$$

onde

$\rho$  é a densidade de ápices ( $na m^{-3}$ )

$na$  é o número de ápices

$VC$  é o volume de um volume de controle ( $m^3$ )

### 3. Experimentos

A parte experimental da pesquisa foi realizada na casa de vegetação do campus da UNIJUÍ, e nos laboratórios de Botânica, Ictiopatologia e Física do Solo da UNIJUÍ.

O solo utilizado nos experimentos foi homogeneizado e através da medida do potencial matricial em função da variação do teor de umidade em laboratório, foi determinada a curva característica, cujo ajuste é feito encontrando os parâmetros da equação de Van Genuchten [6].

$$\psi_m = \frac{1}{a} \sqrt[n]{\Theta^{-1/m} - 1} \quad (5)$$

onde

$\Theta$  teor de umidade volumétrico adimensional do solo;

$\psi_m$  potencial matricial ( $Pa$ );

$a, m, n$  parâmetros de ajuste.

Foi realizado também o experimento de monitoramento do crescimento do sistema radicial para determinar os parâmetros do modelo de crescimento de raízes. No centro de cilindros foram plantadas as mudas da espécie (Louro-pardo [*Cordia trichotoma*]), conforme a Figura 3.



Figura 3 – Fotografia dos cilindros com as plantas da espécie [Louro pardo (*Cordia trichotoma*)], no estágio inicial do experimento (Casa de Vegetação- Campus UNIJUÍ).

Para avaliar o crescimento das raízes, obtivemos seis imagens através de scanner do sistema radicial da espécie arbórea [Louro pardo (*Cordia trichotoma*)] para diferentes tempos  $t = 0, t = 7, t = 14, t = 21, t = 35, t = 45 \text{ dias}$ , usando a hipótese que uma raiz seria seqüência da outra, ou seja, a seqüência de imagens demonstraria o crescimento das raízes durante o período experimental.

Devido a impossibilidade de se obter mudas da espécie arbórea com arquitetura inicial igual. As imagens não apresentaram um crescimento regular. Essa constatação, juntamente com a evidente perda de micro-raízes durante a extração, além da planificação do sistema tridimensional, inviabiliza análises da evolução espacial das raízes em função do tempo, porém o método dá uma idéia da distribuição espacial (mesmo com problemas de precisão) e uma informação global com relativa precisão sobre o somatório de ápices presentes no sistema.

A contagem do número de ápices ocorreu da seguinte maneira:

1. Cada imagem foi quadriculada com malha  $0,01m \times 0,01m$ , de acordo com a Figura 2. Cada quadrado corresponde à seção radial de um anel de solo de raio  $r_i$ ,  $\Delta r = 0,01m$  e profundidade  $\Delta z = 0,01m$ . Esse anel será chamado de volume de controle.

2. Para cada volume de controle foi contado o número de ápices.

Após a contagem os dados sobre o número de ápices por volume de controle foram organizados em matrizes.

#### 4. Implementação numérica

O método numérico utilizado para a resolução numérica das equações diferenciais parciais, foi de Diferenças Finitas Centrais (CDS – Central Difference Scheme), com o esquema temporal explícito, por se tratar de problemas onde predominam a difusão.

No modelo do movimento da água no solo, a simulação da irrigação considera um fluxo de água  $q_{ir}^*$  em toda a região da superfície ( $0 < r < R$ ), sendo ela uma condição de fronteira de Neumann, as condições de fronteira de  $r = R$ ,  $z = H$  são de isolamento e em  $r = 0$  é um eixo simétrico (onde há a presença da raiz), com um termo fonte do tipo sorvedouro.

No modelo do crescimento de raízes, as condições de fronteira que envolve a solução numérica para a fonte são de isolamento em  $z = 0$ ,  $r = R$  e  $z = H$ , e em  $r = 0$  é um eixo simétrico.

Foram desenvolvidos dois programas computacionais para implementar a solução numérica dos dois modelos acima referidos. Os algoritmos foram implementados com base nos dados experimentais e na solução numérica de (2) e (3). Na Figura 4 é apresentado o fluxograma da implementação da solução numérica da equação (2):

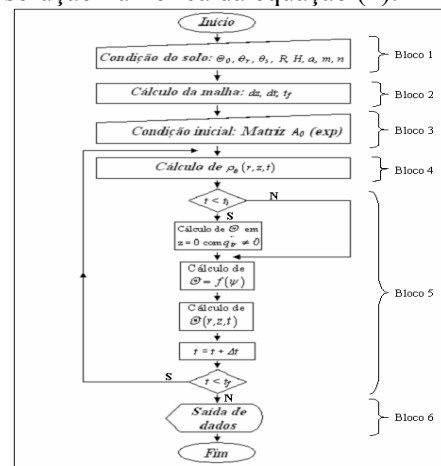


Figura 4 - Fluxograma da implementação sobre as variações do teor de umidade considerando a absorção de água pelas raízes.

Onde cada bloco, representa:

**Bloco 1 – Condição do solo** – Neste bloco é feita a entrada de dados referentes a algumas condições em que o solo se encontra, tais como: teor de umidade inicial, teor de

umidade do solo residual, teor de umidade do solo saturado, condutividade hidráulica para solo saturado, raio do cilindro, altura do cilindro e parâmetros de ajuste da curva característica.

**Bloco 2 – Cálculo da malha** - Neste bloco é feito o cálculo da malha, onde a mesma pode ser refinada com a precisão desejada.

**Bloco 3 – Condição inicial** - Entrada da matriz com o número de ápices, de acordo com os dados experimentais.

**Bloco 4 – Cálculo de  $\rho(r, z, t)$**  - O cálculo de  $\rho(r, z, t)$  (densidade de ápices) é feito através de volumes de controle, onde o mesmo será o termo fonte do tipo sorvedouro para o cálculo de  $\Theta$ .

**Bloco 5 – Cálculo de  $\Theta$**  - Neste bloco é feito o cálculo de  $\Theta$ . Considera-se o tempo durante a irrigação em  $z = 0$  com fluxo  $q''_{ir}$ , e após isolamento nesta superfície. Calcula-se o  $\Theta = f(\psi)$  através da equação de van Genuchten (5). É feita a solução numérica da equação de Richards. Esses procedimentos ocorrem a cada iteração temporal.

**Bloco 6 – Saída de dados** - São apresentados gráficos referentes às simulações.

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma da implementação da solução numérica da equação (3):

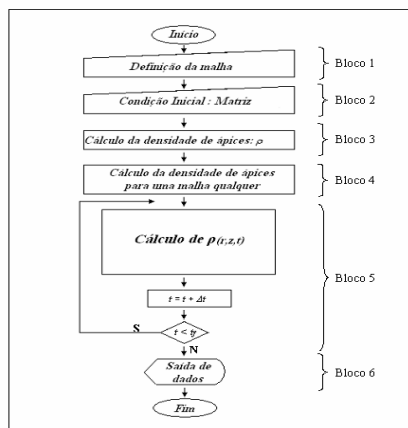


Figura 5 - Fluxograma da implementação sobre as variações do teor de umidade considerando a absorção de água pelas raízes.

Onde cada bloco, representa:

**Bloco 1 - Definição da malha** - Entrada de dados referentes à altura do solo, raio do cilindro, número de células da malha, tempo, variação temporal e espacial, constantes de difusão dos ápices.

**Bloco 2 - Condição Inicial** - Entrada de dados experimentais – número de ápices

distribuídos em uma malha de  $0,01m \times 0,01m$ .

**Bloco 3 - Cálculo da densidade de ápices  $\rho(r, z, t)$**  - O cálculo da densidade de ápices é feito através da equação (4), para uma malha  $0,01m \times 0,01m$ .

**Bloco 4 - Ajuste da densidade para uma malha qualquer** - Com os dados do bloco 3, que estão com a malha  $0,01m \times 0,01m$ , é feita a mudança desses dados para uma malha que pode variar de  $15 < L < 45$  e  $30 < M < 90$ , onde  $L$  é o número de pontos em  $r$ , e  $M$  é o número de pontos em  $z$ .

**Bloco 5 - Cálculo de  $\rho(r, z, t)$**  - O cálculo de  $\rho(r, z, t)$  é feito através da solução numérica da equação (3).

**Bloco 6 - Saída de dados** - São apresentados gráficos referentes aos dados experimentais e calculados.

## 5. Resultados

### 5.1. Crescimento de raízes

De acordo com as condições do experimento, a concentração de ápices ocorreu de acordo com o esperado, pois a planta foi alocada aproximadamente em  $r = 0$ , ou seja, no centro do cilindro. A Figura 6 mostra a condição inicial da densidade de ápices, os quais são dados experimentais da primeira planta sacrificada. Observa-se a maior concentração de ápices na direção  $r$  de  $r = 0$  até  $r = 0,05m$ , e na direção  $z$  de  $z = 0$  até  $z = 0,15m$  que pertence à parte central do cilindro. São salientes na Figura os “picos” de densidade de ápices. Isto ocorre, pois nestes pontos a concentração do número de ápices é bem maior que nos pontos vizinhos.

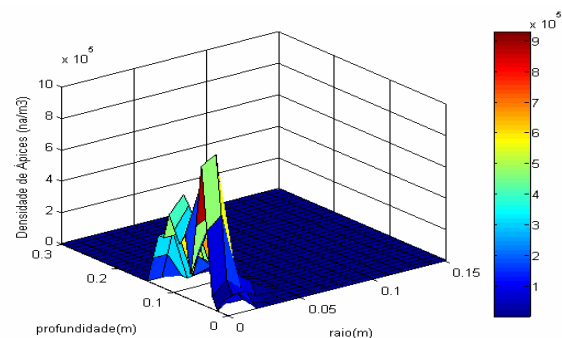


Figura 6 – Densidade de ápices ( $\rho$ ) do sistema radicular da espécie arbórea [Louro pardo (*Cordia trichotoma*)], para  $t = 0$  dias.



É importante ressaltar que pela definição da densidade de ápices (número de ápices / volume de solo), ocorre uma distorção no valor da densidade, já que o volume do solo (anel de solo) cresce proporcionalmente ao quadrado do raio, ou seja, para duas células vizinhas horizontalmente com o mesmo número de ápices identificado na seção plana  $r$  por  $z$  do experimento, o valor da densidade será maior para a célula que estiver mais próxima do centro do vaso.

A Figura 7 mostra o resultado da aplicação do modelo para o aumento da densidade de ápices para o período de 45 dias. O modelo propõe um crescimento difusivo, com fonte geradora de novos ápices. O processo de difusão sem fonte deveria espalhar a grandeza  $\rho$  nas direções  $r$  e  $z$ , diminuindo os pontos de alta concentração para aumentar a concentração em outros pontos, conservando a massa total. Porém isto não ocorre com as raízes, pois com o aumento da densidade de ápices a massa total vai aumentar, e a introdução da fonte geradora de novos ápices nos pontos onde existem ápices proporciona esse aumento de massa total além da conservação dos  $\rho$  nestes pontos. Devido a isto se pode observar na Figura 7 que ao longo de  $r$  e  $z$  ocorre aumento da densidade de ápices, em relação à condição inicial apresentada na Figura 6.

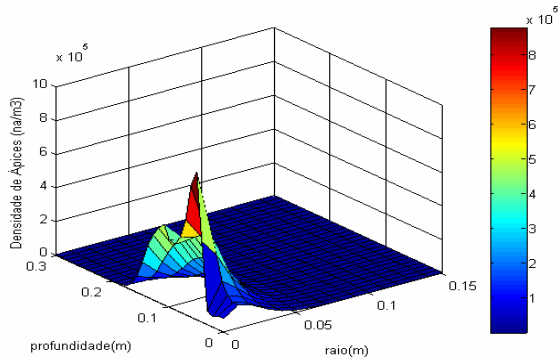


Figura 7 – Densidade de ápices ( $\rho$ ) do sistema radicial da espécie arbórea [Louro pardo (*Cordia trichotoma*)], para  $t = 45$ .

Na figura 8 apresentamos a comparação entre o total da densidade de ápices dos dados calculados e experimentais. Percebe-se que os pontos experimentais para os tempos  $t = 7 \text{ dias}$  e  $t = 21 \text{ dias}$  encontram-se fora da tendência dos demais pontos, isso se observa na figura através da diferença entre cada ponto experimental em relação à curva calculada pelo modelo matemático.

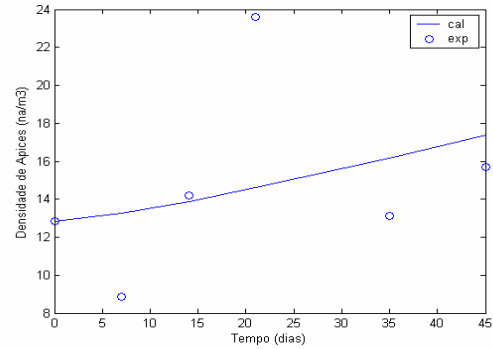


Figura 8 - Comparação entre a densidade de ápices em um intervalo de tempo (0 – 45 dias) entre dados calculados (cal) e experimentais (exp).

Desse modo, esse resultado mostra que a hipótese de que a raiz de uma planta seria seqüência da outra, não ocorreu com todas as raízes mesmo sendo elas da mesma espécie (Louro-pardo [*Cordia trichotoma*]). Isso pode ter ocorrido devido a diversos fatores, tais como: impossibilidade de obter 6 plantas idênticas em seu estágio inicial; a arquitetura da raiz pode sofrer alterações durante seu crescimento; apesar da tentativa de homogeneização, é muito difícil tornar o solo totalmente isotrópico; perda de micro-raízes durante a extração da raiz.

Nas Figuras 9 e 10, são apresentadas variações nas constantes  $R_r$  e  $R_z$  da equação (3), as quais determinam o comportamento difusivo do crescimento de raízes nas direções  $r$  e  $z$ , ou seja, quanto maior a constante maior será a difusão naquela direção. Na figura 9 foi considerado  $R_r > R_z$ , e pode-se constatar o efeito difusivo maior na direção  $r$ . Na figura 10 consideramos  $R_r < R_z$ , onde percebe-se a maior difusão na direção  $z$ .

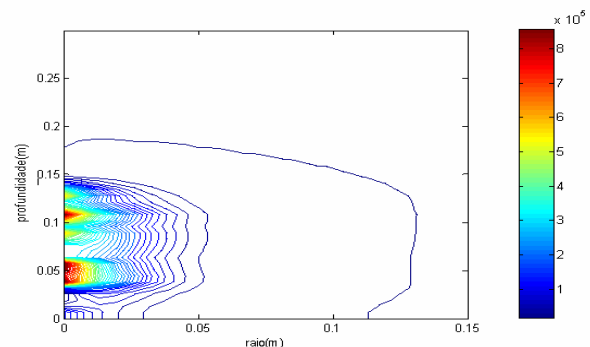


Figura 9 - Simulação das linhas de contorno da densidade de ápices ( $\rho$ ) com  $R_r > R_z$

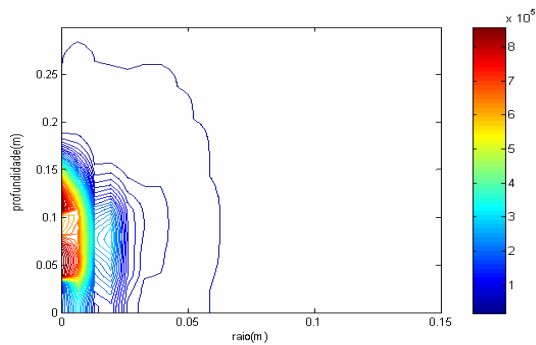


Figura 10 - Simulação das linhas de contorno da densidade de ápices ( $\rho$ ) com  $R_r < R_z$ .

A análise das Figuras 9 e 10 mostram que o programa computacional usado para descrever o crescimento da densidade de ápices é sensível às variações espaciais permitindo a descrição da tendência de crescimento do sistema.

## 5.2. Simulações numéricas do movimento da água no solo com absorção de água pelas raízes.

A Figura 11 apresenta uma simulação para  $t = 12h$ , com irrigação em toda a superfície  $z = 0$  de  $4l$ . A irrigação foi feita na primeira hora da simulação, e posteriormente interrompida. Na Figura 11 observa-se a expansão das linhas de contorno da distribuição da água no solo considerando a presença da raiz como um sorvedouro. Pode-se observar o efeito da absorção de água pela raiz na direção  $r$  de  $0 < r < 0,05m$ , e na direção  $z$  de  $0 < z < 0,12m$ , o que indica a absorção de água pelos ápices nessa região.

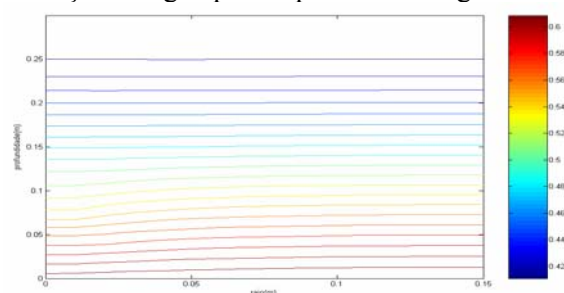


Figura 11 - Linhas de contorno da distribuição da água no solo para  $t = 12h$ . Com absorção de água pela raiz.

A Figura 12 apresenta uma simulação para  $t = 12h$ , com irrigação em toda a superfície  $z = 0$  de  $4l$ . A irrigação foi feita na primeira hora da simulação, e posteriormente interrompida. Os dados referentes a raiz foram dos dados experimentais do número de ápices da planta sacrificada com  $45dias$ . Comparando com a Figura 11 percebe-se que

a influência da absorção de água pela raiz aumentou.

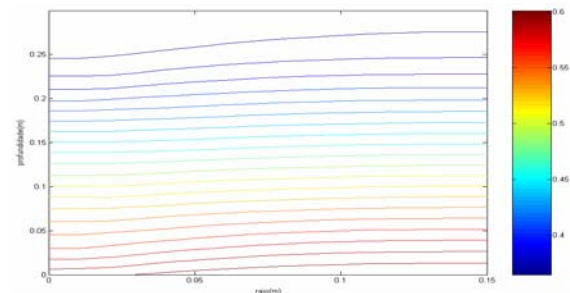


Figura 12 - Linhas de contorno da distribuição da água no solo para  $t = 12h$ . Com absorção de água pela raiz.

## 6. Conclusão

O modelo de raízes reproduz a tendência geral do crescimento do sistema radicial, indicada pelos dados experimentais, no que se refere à soma geral da densidade (não fornece informações precisas sobre a arquitetura da raiz). Mesmo com essa limitação considerou-se o modelo difusivo viável para descrever esse fenômeno.

O modelo de absorção de água pelas raízes apresentou simulações que mostraram a ação de absorção de água pela raiz em diferentes estágios de crescimento, reduzindo o teor de umidade nos pontos onde havia presença de raiz em cada intervalo de tempo.

## 7. Agradecimentos

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal em Nível Superior) pelo apoio financeiro.

## 8. Referências

- [1] Fagundes, M. C. Modelagem Matemática do crescimento e absorção de água do solo por sistemas radiciais de espécies arbóreas. Dissertação de mestrado, Unijuí, Ijuí – RS, p. 75, (2006).
- [2] Jury, W.; Gardner, W. R.; Gardner, W. H. Soil Physics. New York, 5ª ed, John Wiley & Sons, 328p. (1991).
- [3] Libardi, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: P. L. Libardi, 497p. Cap.7: Movimento da água no solo, (1995).
- [4] Reichardt, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole Ltda, (1990).
- [5] T. Miyazaki, S. Hasegawa and T. Kasubuchi Water Flow in Soils. New York, Marcel Dekker, Inc., (1993).
- [6] Van Genuchten, M. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept/Oct. 1980.