

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**MODELAGEM DAS VIAS DE TRANSPORTE
HÍDRICO DA RAIZ EM PLANTAS VASCULARES -
ANÁLOGO ELÉTRICO**

WILLANNY LEAL CORREIA SIQUEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

Cuiabá, MT,
Maio de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**MODELAGEM DAS VIAS DE TRANSPORTE
HÍDRICO DA RAIZ EM PLANTAS VASCULARES -
ANÁLOGO ELÉTRICO**

WILLANNY LEAL CORREIA SIQUEIRA

*Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal de Mato Grosso,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Física Ambiental.*

ORIENTADOR: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

Cuiabá, MT,
Maio de 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L435m Leal Correia Siqueira, Willanny.
Modelagem das Vias de Transporte Hídrico da Raiz em Plantas Vasculares -
Análogo Elétrico / Willanny Leal Correia Siqueira. -- 2014
64 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Denilton Carlos Gaio.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2014.
Inclui bibliografia.

1. Análogo Elétrico. 2. Dinâmica hídrica. 3. Raiz. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: MODELAGEM DAS VIAS DE TRANSPORTE HÍDRICO DA
RAIZ EM PLANTAS VASCULARES - ANÁLOGO ELÉTRICO**

AUTORA: WILLANNY LEAL CORREIA SIQUEIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 06 de maio de 2014, pela
comissão julgadora:

Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio
Orientador
Instituto de Física - UFMT

Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado
Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT

Prof. Dr. Higo José Dalmagro
Examinador Externo
Universidade de Cuiabá - UNIC

DEDICATÓRIA

Á Deus, presente em todos os momentos. Ao meu amado esposo Heber, companheiro e amigo. Ao meu querido pai, Darci, pelo carinho, autodisciplina e confiança que sempre me transmitiu, motivando-me nas decisões tomadas em minha vida. A minha amada mãe, Maria (in memoriam), pelo amor, educação, conselhos. E meus queridos irmãos Geovana Fernanda e Alexandre (in memoriam). Lamento por eles não terem presenciado minha vitória, pois ao longo de minha trajetória acadêmica sempre me estimularam em meio às dificuldades a não desistir.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus que, durante todo o período de realização desse trabalho, não deixou que meus ânimos e as minhas esperanças se abalassem pelas dificuldades e perdas sofridas. Pelo contrário, tudo fez para que o sofrimento se transformasse em tempo de profundo crescimento e amadurecimento.
- Aos meus amados irmãos, Suzana e Gean, aos meus queridos cunhados, e meus amados sobrinhos, vocês são presentes de Deus para minha vida.
- A minha madrastra Joana, sogros Alci e Dinair pela ajuda, conselhos, compreensão, dedicação e carinho, que Deus continue abençoando-lhes.
- Agradeço aos parentes e amigos que me ajudaram na minha caminhada acadêmica.
- Ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio, pela confiança em mim depositada e pelo suporte acadêmico durante todo esse período.
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira pela dedicação e empenho no programa de pós-graduação.
- A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, pelo apoio, paciência, incentivo e amizade.
- Aos meus colegas do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, pela amizade construída nestes anos de trabalho.
- A Soilce e ao Cesário pela colaboração nos serviços de secretaria, que nos auxiliou para o desenvolvimento deste trabalho;
- A CAPES pelo auxílio financeiro.

“Eis que o temor do Senhor é a sabedoria, e apartar-se do mal é a inteligência” (Jó 28:28b).

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes” (Marthin Luther King).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE SÍMBOLOS	iii
RESUMO	v
ABSTRAT	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA	3
2.2. POTENCIAL HÍDRICO	4
2.3. PROCESSOS DE MOVIMENTAÇÃO DA ÁGUA	6
2.3.1 Fluxo de Massa e Difusão.....	6
2.4. ÁGUA NO SOLO	7
2.5. ESTRUTURA ANATÔMICA DA RAIZ DE PLANTAS VASCULARES ...	8
2.6. ABSORÇÃO E MOVIMENTO DE ÁGUA NAS RAÍZES.....	11
2.7. O ANÁLOGO ELÉTRICO BÁSICO	15
2.8. LEIS ANÁLOGAS DE KIRCHHOFF	16
2.9. O SIMULADOR DE CIRCUITO	17
2.10. ESPÉCIES MODELADAS	18
2.10.1. Milho.....	19
2.10.2. Trigo	20
3. METODOLOGIA	22
3.1. A DISTRIBUIÇÃO DAS FUNÇÕES EM COMPONENTES	22
3.2. AS VIAS DE FLUXO	24
3.3. COMPONENTES DO MÓDULO DA RAIZ.....	27
4. RESULTADOS	30

4.1. FLUXO HÍDRICO NAS VIAS DA RAIZ DO TRIGO	30
4.2. FLUXO HÍDRICO NAS VIAS DA RAIZ DO MILHO.....	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Representação esquemática da molécula de água.	3
Figura 02 – Esquema do corte longitudinal com as principais zonas da raiz.	9
Figura 03 – Esquema de estrutura longitudinal da raiz primária.	10
Figura 04 – Esquema das rotas de fluxo de água no tecido vegetal.....	12
Figura 05 – Vias de absorção de água pela raiz.....	13
Figura 06 – Ilustração representativa do corte longitudinal e transversal da raiz.....	18
Figura 07 – Partes estruturais da planta do milho.	19
Figura 08 – Partes estruturais da planta do trigo.....	21
Figura 09 – Ilustração representativa da raiz numa estrutura primária.	23
Figura 10 – Circuito hídrico básico das camadas da raiz.....	24
Figura 11 – Figura ilustrativa do corte longitudinal do cilindro da raiz.	25
Figura 12 – Símbolos dos componentes do módulo da raiz.	27
Figura 13 – Símbolo do módulo da raiz em regime estacionário	28
Figura 14 – Símbolo do módulo da raiz em regime oscilatório.....	29
Figura 15 – Símbolo do Circuito hídrico do módulo da raiz do trigo.....	33
Figura 16 – Fluxos hídricos na raiz do trigo	33
Figura 17 – Esquema do fluxo hídrico na raiz do trigo.	34
Figura 18 – Fluxo hídrico da raiz do trigo pela via simplástica-transcelular.....	34
Figura 19 – Gráfico do fluxo hídrico da raiz do trigo pela via apoplástica.	35
Figura 20 – Circuito hídrico do módulo da raiz do milho.	38
Figura 21 – Fluxos hídricos na raiz do milho.	39
Figura 22 – Fluxo hídrico da raiz do milho pela via simplástica-transcelular.....	40
Figura 23 – Fluxo hídrico da raiz do milho pela via apoplástica.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Grandezas Análogas entre o fluxo elétrico e o fluxo hídrico.....	16
Tabela 02 – Diâmetros médios das células por camadas das raízes de trigo e milho.	22
Tabela 03 – Áreas e Volumes das camadas do trigo.....	30
Tabela 04 – Condutividade Transcelular para o trigo.....	31
Tabela 05 – Condutividade Simplástica para o trigo.....	31
Tabela 06 – Condutividade Apoplástica para o trigo.....	31
Tabela 07 – Constantes do circuito do fluxo hídrico pelas vias da raiz do trigo.	32
Tabela 08 – Defasagens do fluxo hídrico na raiz do trigo.....	35
Tabela 09 – Áreas e Volumes das camadas do milho.....	36
Tabela 10 – Condutividade Transcelular para o milho.....	37
Tabela 11 – Condutividade Simplástica para o milho.....	37
Tabela 12 – Condutividade Apoplástica para o milho.....	37
Tabela 13 – Constantes do circuito do fluxo hídrico pelas vias da raiz do milho.....	38
Tabela 14 – Defasagens do fluxo hídrico na raiz do milho.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

δ^- - Carga líquida negativa

δ^+ - Carga líquida positiva

$\Delta F_{\text{máx}}$ - Diferença entre o valor do fluxo máximo na camada e o valor do fluxo da camada mais interna.

Δt - Intervalo de tempo entre o instante que ocorre o máximo da camada e o instante que acontece o máximo na camada mais interna.

C – Capacitância

c_1 – Tecido do córtex

C_a Capacitância da via apoplástica

C_s - Capacitância das vias simplástica e transcelular acopladas

end – Tecido da endoderme

epi – Tecido da epiderme

fac_1 - Fluxo hídrico pela via apoplástica no tecido do córtex 1

$faen$ - Fluxo hídrico pela via apoplástica no tecido da endoderme

$faep$ - Fluxo hídrico pela via apoplástica no tecido da epiderme

$F_{\text{máx}}$ - Fluxo máximo no Ponto de Pico

fsc_1 - Fluxo hídrico pela via simplástica no tecido do córtex 1

$fsen$ - Fluxo hídrico pela via simplástica no tecido da endoderme

$fsep$ - Fluxo hídrico pela via simplástica no tecido da epiderme

G - Energia livre de Gibbs

I_{apo} – Índice Apoplástico

L_p – Condutividade hídrica

L_{pA} – Condutância hídrica

QUCS - Simulador de Circuitos Universal

R - Resistência ao fluxo hídrico

Ra - Resistência do capacitor na via apoplástica

Rapo - Resistência ao fluxo da via apoplástica

Rcortex - Resistência ao fluxo hídrico no córtex

Rsim - Resistência ao fluxo hídrico na via simplástica

Rsimpástica - Resistência simplástica.

Rsitr - Resistência ao fluxo das vias simplástica e transcelular acopladas

Rt - Resistência do capacitor nas vias simplástica e transcelular acopladas

Rtrans - Resistência hídrica entre a via simplástica-transcelular e a via apoplástica

Rtranscelular - Resistência transcelular

sp³ - Hibridização do oxigênio da molécula de água

SPA - Contínuo Solo-Planta-Atmosfera

SPICE - Programa de simulação com ênfase em circuitos integrado

Tmáx - Tempo máximo no Ponto de Pico

Va - Potencial hídrico inicial do capacitor da via apoplástica

Vapo – Volume da via apoplástica

Vs - Potencial hídrico inicial do capacitor das vias simplástica e transcelular acoplados

Vsim - Volume da via simplástica

Ψ - Potencial hídrico (MPa)

ψπ - Potencial de solutos

Ψg - Potencial gravitacional

Ψm - Potencial mátrico

ψp - Potencial de pressão hidrostática

Ψw - Potencial hídrico

RESUMO

SIQUEIRA, W. L. C. **Modelagem das vias de transporte hídrico da raiz em plantas vasculares - análogo elétrico**. Cuiabá. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

As funções básicas da raiz são sustentar a planta e absorver água e nutrientes do solo. O consumo de água pelas plantas se faz necessário para os processos bioquímicos e por consequente para atividades metabólicas celulares. Uma maneira de compreender a dinâmica hídrica das raízes é modelar o sistema por meio de um análogo ao circuito elétrico, que consista basicamente de resistores e capacitores associados. Foi construído um circuito elétrico equivalente, no programa computacional QUCS, que permite modelar e simular o fluxo hídrico na raiz, aplicando leis análogas de Kirchhoff. Dados experimentais para duas espécies de plantas vasculares foram utilizados (trigo e milho) de modo a se estabelecer as fases de simulação, calibração e validação da modelagem. A metodologia utilizada permite aprofundar no detalhamento da raiz de plantas vasculares, ao caracterizar os componentes e as vias de fluxo, e distribuir as funções em componentes na perspectiva de ver emergirem as propriedades fisiológicas dessa estrutura. Foram feitas duas simulações para as raízes do trigo e do milho: uma para o regime estacionário e outra para o regime oscilatório. No sistema estacionário, observa-se uma inversão da supremacia do fluxo apoplástico com relação ao fluxo simplástico-transcelular em um ponto intermediário do córtex, devido à interrupção do fluxo apoplástico pelas estrias de Caspary. No regime oscilatório, observa-se uma defasagem do máximo do sinal em direção à endoderme, isto é, a defasagem aumenta com a distância da fonte senoidal. A modelagem explicita um comportamento esperado devido à resistência ao fluxo e aos tempos característicos de carga e descarga dos capacitores, porém, não descritos na literatura.

Palavras-chave: Análogo elétrico, dinâmica hídrica, raiz.

ABSTRAT

SIQUEIRA, W.L.C. **Modeling the pathways of water transport in the vascular plants root - electric analogous.** Cuiabá. . 2014. 64f. Dissertation (MSc in Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The basic functions of the root are to sustain the plant and absorb water and nutrients from the soil. The water consumption of the plant is necessary for biochemical processes and consequent to cellular metabolic activities. One way to understand the fluid dynamics of roots is to model the system by means of an analogue to the electric circuit, consisting primarily of resistors and capacitors associated. An equivalent electrical circuit was built in QUCS computer program, which allows modeling and simulating the fluid flow in the root, applying analogous Kirchhoff laws. Experimental data for two species of vascular plants (wheat and corn) were used in order to establish the stages of simulation, calibration and validation of modeling. The methodology allows further in detailing the root of vascular plants, to characterize the components and flow paths, and distribute the functions of components in the prospect of emerging physiological properties of this structure. One for the steady state and other for the oscillatory regime: two simulations for the roots of wheat and corn were made. In the stationary system, there is a reversal of the supremacy of apoplastic flow with respect to symplastic-transmembrane flow at an intermediate point of the cortex due to the interruption of the flow through the apoplastic streaks of Caspary. In the oscillatory regime, there is a lag of the maximum signal toward the endoderm, ie, the gap increases with the distance from the sinusoidal source. The explicit modeling an expected due to the flow resistance and the characteristic times of charging and discharging of the capacitors behavior, however, is not described in the literature.

Keyword: analogous electric, hydric dynamics, root.

1. INTRODUÇÃO

A água mesmo que apresenta estruturas simples é de grande importância para os seres vivos inclusive para as plantas, pois contribui com o transporte de gases, minerais e solutos nos vegetais. Ela é considerada essencial para reações bioquímicas e por consequente para atividades metabólicas celulares. A água, além de ser considerada uma dos principais constituintes das plantas, é reguladora da temperatura dos tecidos, e responsável pela manutenção da turgescia.

A água, devido ao seu elevado calor específico (4190 J/Kg), ajuda no processo de estabilização térmica, minimizando as flutuações de temperatura dos tecidos que são ricos em água (na maioria das vezes, de 80 a mais de 90% de água). Além disso, devido ao fato de a água apresentar também elevado calor latente de vaporização (aproximadamente 540 Kcal/Kg), a dissipação energética é um importante efeito associado ao processo de transpiração das folhas. Assim, a água passa do estado líquido para o de vapor no interior das folhas consumindo energia de seu entorno e, quando se difunde para a atmosfera exterior através dos estômatos, contribui com a manutenção de um balanço energético favorável para o tecido vegetal.

A água do solo ao ser absorvida pelas raízes das plantas principalmente por pelos radiculares que são pequenas células epidérmicas de extensão da raiz, podem fluir, até o xilema, por três vias: a apoplástica, na qual o transporte de água ocorre pela parede celular sem atravessar as membranas; a transcelular, em que o transporte da água ocorre em série com a entrada e saída nas células e, na simplástica, o transporte da água ocorre de uma célula a outra por meio dos plasmodesmas. O movimento da água, através das rotas apoplástica, transcelular e simplástica, pode ser comparado a um circuito elétrico com dispositivos associados em série e em paralelo, constituído de capacitores, que modelam sua capacidade de armazenamento de água e resistores, que simulam as resistências ao fluxo hídrico encontradas pelas raízes. Apesar dos estudos sobre modelagem de sistemas ecofisiológicos terem crescido, ainda existe mecanismo como o da dinâmica hídrica da raiz que pode ser desenvolvido. Como por exemplo, temos o trabalho desenvolvido por Gaio (2011), que a partir de subcircuitos para o solo, para diversos componentes da planta (raiz,

caule, folha, estômato) e para a atmosfera, simulou o funcionamento do SPA (contínuo Solo-Planta-Atmosfera). No entanto, há ainda necessidade de maior detalhamento de vários desses componentes como a raiz. A compreensão no comportamento físico do fluxo hídrico da raiz contribui para estudos das Ciências Ambientais que busca aclarar sobre os fenômenos naturais.

Este trabalho tem importância teórica e busca desenvolver estudo sobre a raiz de plantas vasculares em uma metodologia que cria circuitos elétricos análogos aos hídricos, os quais consistem basicamente de resistores e capacitores associados. Os componentes serão especificados com base em dados obtidos na literatura de raiz de milho e trigo.

Ao se desenvolver um modelo, análogo à eletricidade, das vias de transporte hídrico em raízes de plantas vasculares pode-se, a partir de simulações ao fluxo, propor instrumentos, pensar em novas relações fisiológicas, prever determinados valores, dentre outros resultados. Este trabalho tem, como objetivo geral, desenvolver um circuito elétrico análogo às vias de transporte hídrico em raízes de plantas vasculares.

Os objetivos específicos são:

- a. Estabelecer valores representativos para as vias de fluxo e para a capacidade de armazenamento de água das raízes de milho e trigo e
- b. Construir um circuito elétrico equivalente, no QUCS, que permita modelar e simular o fluxo hídrico na raiz.
- c. Descrever o fluxo hídrico na raiz simulado pelo circuito elétrico construído no item b.
- d. Propor para trabalhos futuros a agregação do circuito radicular ao do circuito elétrico desenvolvido por Gaio (2011).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA

A água é um composto de grande importância para a vida no planeta Terra, apesar de possuir uma estrutura simples, a molécula é encontrada em grandes proporções na superfície terrestre. Essa importância é atribuída por apresentar propriedades físicas e químicas exclusivas quando comparada com outras moléculas de tamanhos similares. Tais propriedades são decorrentes da estrutura polar da molécula de água, lhe permitindo atuar como solvente, realizando transporte de substâncias importantes ao longo do corpo da planta (TAIZ & ZEIGER, 2009, p.60).

Formada por dois átomos de hidrogênio (H) e um átomo de oxigênio (O), a água é uma substância polar. Segundo Heneine (2006, p.101), a água é formada pelo híbrido sp^3 do oxigênio, o que determina uma microestrutura assimétrica (Figura 01). A molécula de água possui uma forma tetraédrica e, se fosse considerada esférica, teria raio médio de 0,3 nm. A diferença de eletronegativa entre os átomos determina um caráter misto às ligações químicas: 60% covalente e 40% iônica, que fazem entre si um ângulo de 105° .

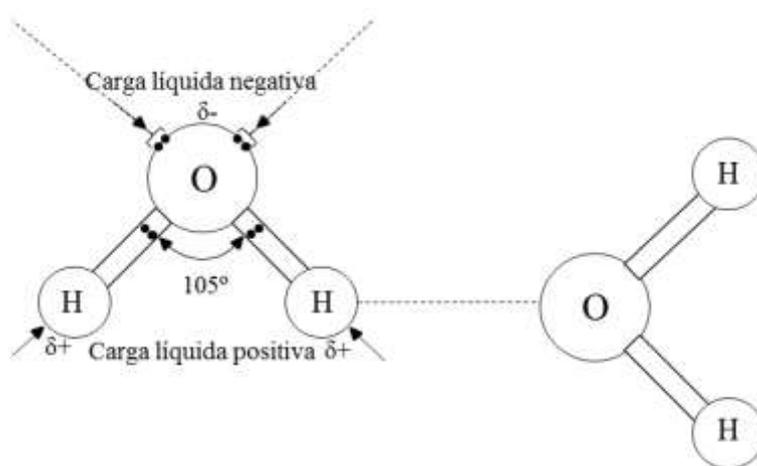


Figura 01 – Representação esquemática da molécula de água.

À esquerda, detalhes da microestrutura assimétrica com as duas ligações intramoleculares dos hidrogênios com o oxigênio formando um ângulo de 105° . A atração de elétrons de ligação ao oxigênio cria locais negativos e positivos de cargas parciais (δ^- e δ^+). A linha pontilhada entre o hidrogênio e o oxigênio da molécula à esquerda é uma ligação intermoleculares chamada ponte de hidrogênio.

O átomo de oxigênio da molécula água com carga parcial negativa (região eletronegativa) atrai os íons positivos ou a extremidade positiva de outro dipolo. Os átomos de Hidrogênios da molécula de água de cargas parciais positivas (região eletropositiva) atraem íons negativos ou a extremidade negativa de outro dipolo.

As forças de coesão entre as moléculas de água ocorrem devido à polaridade, que liga uma molécula a outra por meio de pontes de hidrogênio. Segundo Oztas & Bozkurt (2010), a coesão é a “colagem” das moléculas de uma substância para a outra, onde a parte negativa de uma molécula de água vai atrair a parte positiva de outras moléculas vizinhas, isso explica o porquê que a água cai do céu como gotas de chuva, e não como moléculas individuais.

A água ocorre na natureza nos três estados da matéria: sólido, líquido e gasoso. As pontes de hidrogênio mantêm as moléculas de água mais afastadas no estado sólido permitindo menor densidade se comparadas ao estado líquido, quando há uma ligação de hidrogênio a menos por molécula. Na água líquida, as pontes de hidrogênio são desfeitas e renovadas de maneira constante, com algumas moléculas sendo retiradas e outras se juntando ao grupo, diferentemente do que ocorre no gelo. Além desse comportamento anômalo com relação à dilação térmica, a água possui altos pontos de fusão e ebulição à pressão atmosférica (0°C e 100°C, respectivamente) devido às pontes de hidrogênio, que exigem grande quantidade de energia para serem rompidas.

Na vaporização, as moléculas de água se desagregam devido à contínua excitação térmica. De acordo com Voet et Al. (2008, p.24), a ligação de hidrogênio de modo isolado é de $\sim 20 \text{ KJ. Mol}^{-1}$. Para comparação a uma ligação covalente O-H é de 460 KJ. Mol^{-1} . Para as ligações intermoleculares se romperem é necessário um aumento na temperatura das moléculas.

2.2. POTENCIAL HÍDRICO

Para que ocorra o fluxo hídrico, entre dois pontos quaisquer, é necessário que haja, entre esses pontos, uma diferença de potencial hídrico (representado pela letra grega, psi, Ψ), que reflete o estado termodinâmico da água, ou seja, para que as moléculas de água realizarem trabalho devem possuir energia livre.

A energia livre pode ser descrita em função da energia livre de Gibbs (G), que “representa a capacidade de um sistema de realizar um trabalho ou movimento. Determinada pela contribuição aditiva de cada espécie que compõe o sistema” (VIEIRA et al. 2010, p.18). Em processos espontâneos, nos quais a temperatura e a pressão são variáveis de melhor acesso experimental, o potencial hídrico pode ser calculado a partir da energia livre de Gibbs. Para um sistema com um único componente, a energia livre de Gibbs por partícula, $g=G/N$ é o potencial químico em função da temperatura e da pressão. (SALINAS, 2005).

Segundo Larcher (2000), o potencial hídrico é o trabalho necessário para elevar a água ligada ao nível potencial da água pura. Evidentemente, nessa definição, uma altura de referência deve ser definida para que o potencial gravitacional possa ser considerado. Segundo Taiz & Zeiger (2009), os fisiologistas vegetais definiram potencial hídrico como a divisão do potencial químico da água pelo volume molal parcial da água: $18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$, ou seja, é uma medida da energia livre da água por unidade de volume (J m^{-3}), equivalente a unidade de pressão. Ainda conforme os autores, os principais componentes do potencial hídrico (Ψ_w) em plantas são o de concentração ou de solutos (Ψ_π), a pressão (Ψ_p) e o potencial gravitacional (Ψ_g); geralmente o Ψ_w é escrito pela seguinte somatória: $\Psi_w = \Psi_\pi + \Psi_p + \Psi_g$.

De acordo com Kerbauy (2012), a equação completa incluindo todos os componentes que podem influenciar em termos de quantidade de energia livre da água é: $\Psi_w = \Psi_\pi + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g$. O termo chamado de potencial de soluto ou potencial osmótico representa o efeito de solutos dissolvidos na água, o que ocasiona uma diminuição na energia livre do sistema. O termo Ψ_p é a pressão hidrostática da solução, que pode ser positiva quando aumentam o potencial hídrico e negativo quando a reduzem; dentro da célula a pressão hidrostática positiva se refere à pressão de turgidez, e pode ser negativa tal como ocorre no xilema e entre as paredes celulares, importante para o movimento à longa distância da água na planta.

O potencial mátrico (Ψ_m) representa uma diminuição no Ψ_w devido à atração da molécula de água (na água pura ou em solução aquosa) em contato com sólidos ou substâncias insolúveis. O potencial gravitacional está relacionado à altura, considerada insignificante dentro das raízes ou folhas, mas torna significativo para movimento de água em árvores de grande porte.

2.3. PROCESSOS DE MOVIMENTAÇÃO DA ÁGUA

A água está em constante movimento nas plantas: de célula para célula e entre as células. Ela é transportada da ponta da raiz, passando pelo caule em direção às folhas até ser dispersa na atmosfera. Na raiz, ocorrem dois processos importantes: fluxo de massa e difusão e osmose.

2.3.1 Fluxo de Massa e Difusão

Os processos de fluxo de massa e difusão estão associados ao gradiente de potencial hídrico total, que, segundo Ruiz et al. (1999), regula o movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera, fazendo com que ocorra o transporte de solução do solo para as raízes das plantas.

Conforme Kerbauy (2012), o movimento das moléculas por fluxo de massa ocorre devido forças externas aplicadas sobre elas, como pressão, seja ela produzida por compressão mecânica ou por gravidade, fazendo com que as moléculas se movam na mesma direção. De acordo com Silva et al.(1998), o fluxo de massa está associado ao gradiente de potencial hídrico devido a absorção de água pelas plantas, sendo que tal mecanismo de transporte é determinado de acordo com a concentração do íon na solução do solo e a taxa de transpiração.

A difusão é diferenciada devido ao movimento de íons pelo movimento cinético de moléculas de forma aleatória, que, caso exista gradiente de concentração, o movimento de líquidos ocorre a partir de locais de alta concentração para o de baixa concentração (BARBER, 1995). Conforme a 1ª Lei de Fick (Equação 01), para um processo de difusão molecular unidimensional, é necessário que o fluxo de massa de um soluto seja proporcional ao gradiente de sua concentração, representada pela seguinte expressão matemática (BARBOSA JÚNIOR et al., 2005):

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (01)$$

em que:

j = fluxo ou taxa de transporte de massa por unidade de área transversal

[em $\text{kg.m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

c = concentração [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

D = coeficiente de difusão molecular [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$].

x = direção em que se desenvolve o processo [m].

De acordo com TAIZ & ZEIGER (2009, p. 65), “o fluxo de massa da água movido por pressão é responsável pelo transporte de longa distância da água no xilema”. Os autores também observam que o fluxo de massa de água pode ocorrer no solo e nas paredes das células de tecidos vegetais governado pela pressão que não depende do gradiente de concentração de soluto, desde que seja desprezível a mudança na viscosidade. A partir desses conceitos é possível compreender como o processo de fluxo de massa - em virtude do gradiente de pressão e do processo de difusão causado pelo gradiente de concentração gerado, principalmente na superfície radicular - contribui para o fluxo de água do solo para as plantas.

2.4. ÁGUA NO SOLO

O solo serve de reservatório natural hídrico para as plantas terrestres, e estas dependem desses recursos para sua sobrevivência. As plantas absorvem a água do solo pelas raízes, e a água pode ser fornecida diretamente pelo processo de capilaridade que concebe uma fonte hídrica retida entre pequenos espaços. O movimento da água e a quantidade disponível no solo dependem em grande parte da estrutura e propriedades do solo. Segundo Silva et al. (2007), a retenção e o movimento de elementos solúveis dependem da textura, porosidade do solo e da característica de cada superfície coloidal.

O solo constitui-se de materiais sólidos, líquidos e gasosos. As porções sólidas são, sobretudo, minerais, os quais são classificados pelo tamanho médio dos grãos em areia, silte e argila, o que determina a textura do solo. O arranjo das diversas partículas, com os efeitos cimentantes de materiais orgânicos e inorgânicos, determina sua estrutura (REICHARDT, 1990). A parte líquida do solo é constituída principalmente por água, que ocupa parte ou grandes partes dos espaços vazios (poros) nos solos e pode ser absorvida pelas raízes das plantas, evaporada ou pode ser drenada para camadas mais profundas do solo. A parte gasosa do solo ocupa os espaços que não foram preenchidos pela água (FAGUNDES et al. 2011).

Ao receber grandes quantidades de água, os poros do solo se saturam, diminuindo parcial ou totalmente os espaços aéreos. O excedente de água é drenado por gravidade nas condições livres e o remanescente permanecerá retido na superfície do solo. Essa interação água-solo revela-se em importantes propriedades, como o limite superior de água que o solo apresenta, denominado capacidade de campo (CC), importante nos processos de disponibilidade e armazenagem de água para as plantas (ANDRADE & STONE, 2011). Solos argilosos apresentam uma porosidade total maior que os arenosos, ou seja, um número elevado de pequenos poros que contribuem para retenção de água (CC) e baixa permeabilidade. Em solos arenosos ocorre o inverso (GROHMANN, 1960).

2.5. ESTRUTURA ANATÔMICA DA RAIZ DE PLANTAS VASCULARES

As raízes apesar de serem consideradas estruturas complexas devido às suas diversas formas, são o principal órgão de sustentação das plantas e desempenham importantes funções tais como fixação, absorção, condução e armazenamento. Segundo Gregory (2006), as raízes possuem diferenças estruturais consideráveis, tanto internamente e externamente como entre espécies de vegetais, entre os habitats e ao longo do comprimento de raízes individuais. Ainda, conforme o autor, alguns dos exemplos comuns de diferenças na estrutura das raízes são: morte da epiderme e, em algumas espécies, de todo o córtex (desenvolvimento de aerênquimas, produção de uma periderme).

A raiz é a primeira estrutura a surgir da semente em germinação denominada raiz primária, permitindo a fixação da plântula no solo e absorção de água. O sistema radicular das plantas com sementes, com exceção das monocotiledôneas, é denominado de pivotante por apresentar uma raiz primária extremamente desenvolvida e ramificações ou raízes laterais. Em geral a raiz primária nas monocotiledôneas tem vida curta, de tal modo que formam a partir do caule raízes adventícias de modo que nenhuma raiz se torna mais proeminente que outras e o sistema radicular é denominado fasciculado (RAVEN et al. 2010).

As raízes na sua fase primária apresentam, de forma clara, a separação entre os três tipos de sistemas de tecidos: a epiderme (sistema de tecido dérmico), o córtex (sistema de tecido fundamental) e o sistema vascular (Figuras 02 e 03). O tecido vascular possui um formato cilíndrico sólido ou oco (na presença da medula). Cada sistema possui características estruturais típicas de raízes. Os ápices radiculares apresentam uma estrutura protetora do meristema apical denominada coifa, formada por células vivas que frequentemente contêm amido, e contribuem com a penetração da raiz no solo (ESAU,1974).

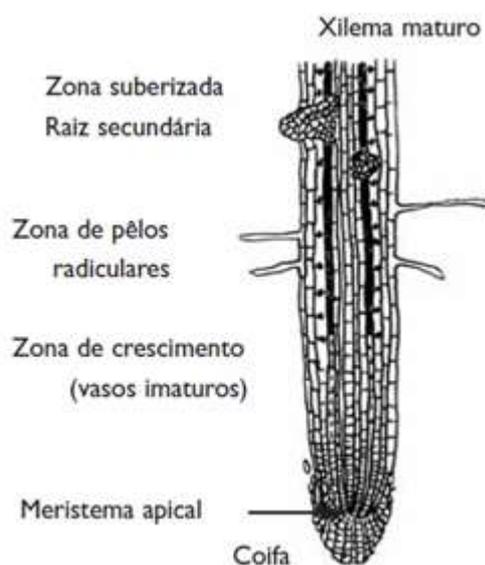


Figura 02 – Esquema do corte longitudinal com as principais zonas da raiz.
Fonte: Pimentel (2004, p. 71).

A região epidérmica segundo Vieira et al. (2010, p. 27), “promove o revestimento e tem função de absorção, em geral contém pelos radiculares que são alongamentos celulares da própria epiderme [...]”. De acordo com Nobel (2009), os pelos radiculares permitem um grande aumento na superfície de contato através da qual a água e os nutrientes podem adentrar na planta. Esses pelos são originados como protuberâncias das células epidérmicas (rizoderme) ou células especializadas (tricoblastos) em determinadas espécies, podendo crescer uma camada compacta de células atrás da epiderme a partir da hipoderme (ANGELOCCI, 2002).

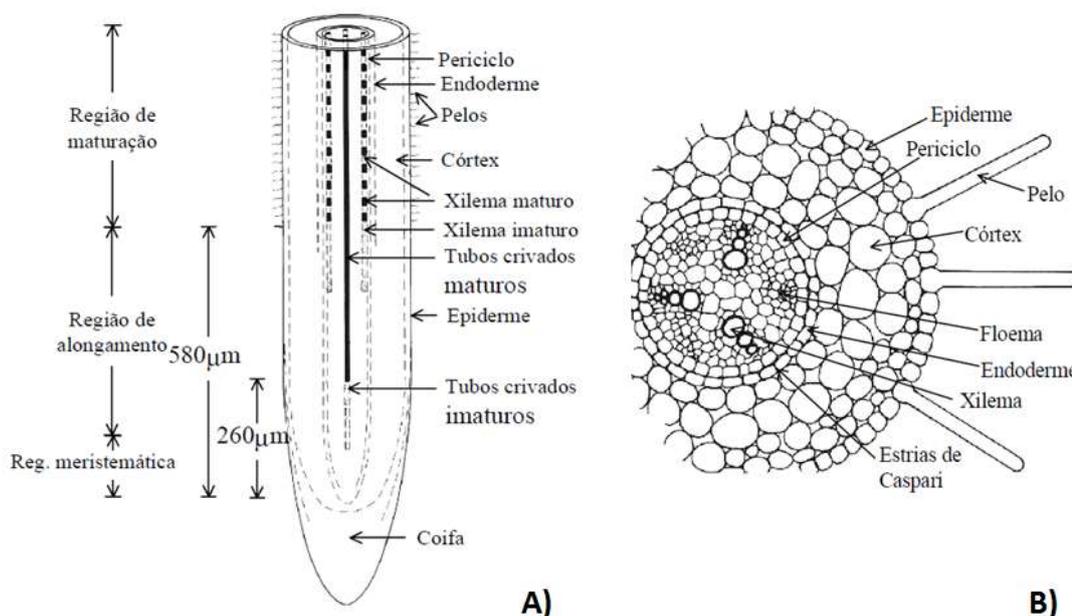


Figura 03 – Esquema de estrutura longitudinal da raiz primária. (A) corte longitudinal da raiz; (B) corte transversal na região de absorção. **Fonte:** Kramer (1983, apud ANGELOCCI, 2002).

De acordo com Hose et al. (2001), a exoderme (hipoderme com bandas de Caspary) de raízes das plantas representa uma barreira de resistência variável para o fluxo radial de água e de solutos. A exoderme se forma abaixo da epiderme podendo apresentar faixas de Caspary somente em raízes mais velhas devido à suberização, no entanto não ocorre em raízes jovens, pois as paredes das células curtas não contêm suberina (ESAU, 1974). Segundo Sattelmacher (2001), embora a exoderme seja formada na maioria das espécies de plantas, não parece representar uma barreira de difusão absoluta de nutrientes, com isso o significado de espaço livre aparente para a absorção de nutrientes é questionável.

O córtex é a região radicular entre a epiderme e a periciclo, incluindo a camada mais interna, a endoderme (RUDALL, 2007). Segundo Vieira et al. (2010), o córtex é formado por células parenquimatosas com amplos espaços intercelulares o que contribui para o armazenamento de reservas nutritivas e para o transporte de água e sais minerais. Nobel (2009) afirma a existência desses espaços e complementa que a existência de grandes espaços intercelulares de ar no córtex, facilita a difusão de O_2 e CO_2 no interior desse tecido, já nos tecidos vasculares geralmente faltam tais espaços.

A endoderme é formada por uma camada celular mais interna da raiz. Em relação à parede primária da endoderme ocorre uma contínua deposição de suberina através da lamela média, formando uma fita denominada estria ou faixa de Caspary que se estende ao redor da célula, nas paredes radiais e transversais. Com isso o protoplasto prende-se a estria de Caspary e impede que os materiais absorvidos (que seguem em sentido radial), atravessem a parede da endoderme ou movimentem-se entre a parede e o citoplasma. Por isso só torna viável o caminho através do citoplasma (ESAU, 1974).

Segundo Angelocci (2002, p. 14), “As estrias fazem com que a endoderme não fique excessivamente reforçada, o que dificultaria o crescimento secundário”. Ainda segundo o autor, na parte interna da endoderme ocorre o periciclo (tecido meristemático que produz raízes laterais) e finalmente na região interna do periciclo ocorre a formação de tecidos vasculares (xilema e floema) pelo câmbio vascular, cujas células dividem-se e se distinguem em novos tecidos de xilema e floema.

Por sua vez, Esau (1974) inclui o periciclo entre os tecidos vasculares pois se originar na mesma região do meristema apical dos tecidos vasculares e, além disso, corrobora para sua tese o conceito histórico de estelo, que define o periciclo como sendo a camada limite do estelo. O periciclo pode apresentar várias camadas de células como esclerênquima, elemento do protoxilema. De acordo com Gregory (2006), o estelo também conhecido como cilindro vascular, é formado por tecidos vasculares (xilema e floema) e uma ou mais camadas de tecidos não-vascular (o periciclo).

2.6. ABSORÇÃO E MOVIMENTO DE ÁGUA NAS RAÍZES.

Apesar das células serem consideradas uma estrutura básica formadora dos tecidos vegetais ela apresenta complexos sistemas, tais como a absorção e o armazenamento de água. Desta maneira, para estudos do fluxo hídrico na raiz é necessário compreender como ocorre o movimento da água entre células e tecidos (Figura 04). Segundo Raven (et al. 2010), as células vegetais consistem em uma parede celular e um protoplasto (citoplasma e um núcleo) o qual é envolvido por uma membrana (a plasmalema). Ademais, segundo o autor, para que haja uma comunicação de células para células é preciso que elas estejam interligadas pelo

plasmodesmos, que são estreitos filamentos de citoplasma. A interligação dos protoplastos via plasmodesmos constitui um contínuo denominado simplasto e o contínuo das paredes celulares é chamado de apoplásto, o qual circunda o simplasto.

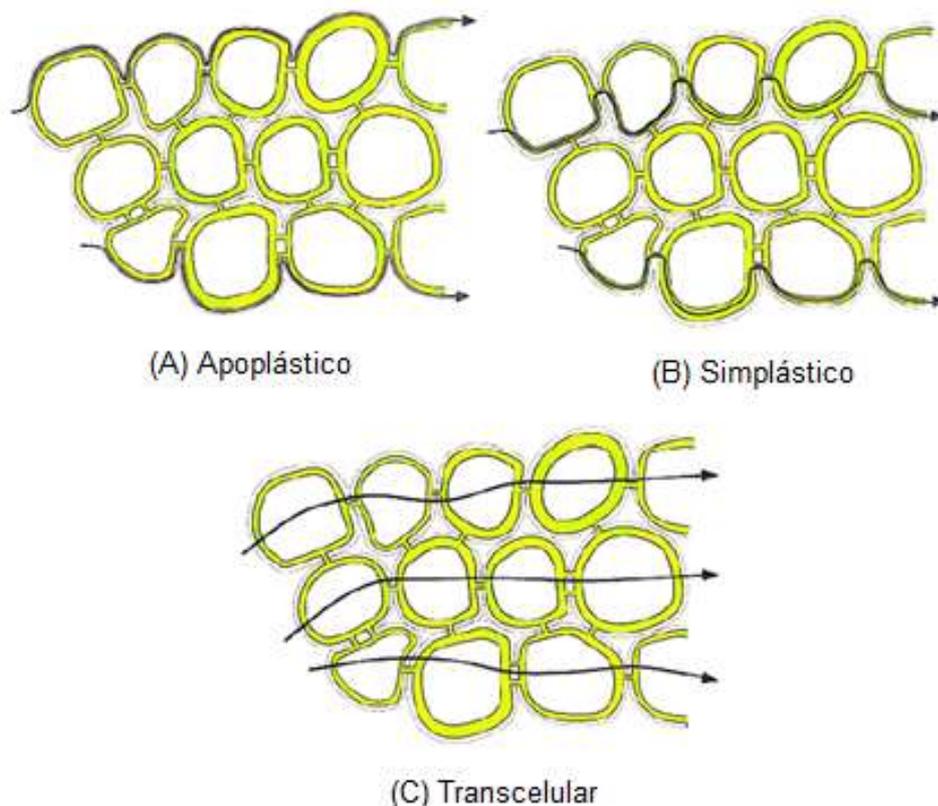


Figura 04 – Esquema das rotas de fluxo de água no tecido vegetal.

Fonte: Steudle & Peterson, 1998.

Existem dois tipos de poros na parede celular que permite a água atravessar a membrana, o plasmodesmo via simplasto, e outros poros menores e mais numerosos aos quais se incluem as aquaporinas (formada por proteínas), que permitem a passagem de água de célula para célula denominada transporte transcelular (STEUDLE & PETERSON, 1998; JAVOT & MURIEL, 2002). A maior parte da água intracelular é osmoticamente inativa, devido às moléculas superiores presas dentro da matriz celular obstruindo o movimento de água livre, que pode somente viajar através da célula (NOZAKI et al. 2007). Segundo Öpik & Rolfe (2005), o percurso da água via simplasto ocorre no citoplasma e plasmodesmata, já na rota transcelular ocorre em duas variações, no sentido mais estrito que atravessa cada

membrana plasmática e tonoplasto, mas também pode combinar a passagem através das membranas com passagem por plasmodesmos.

Conforme Steudle e Peterson (1998), atualmente, não é possível separar o caminho simplástico do caminho intracelular, assim, os caminhos via simplástico e intracelular são considerados como um caminho-de-célula. Logo, existem duas vias paralelas para a água do tecido: o percurso apoplástico e o de célula para célula. Em relação à água, através da via apoplástica, ela pode se mover sem muitos obstáculos até certo ponto da raiz, pois pode encontrar, mais adiante, barreiras, como faixa de Caspary e lamelas suberina nos tecidos da endoderme e exoderme (STEUDLE E PETERSON, 1998, HOSE et al., 2001). Segundo Hose et al. (2001), quando o acesso do fluxo hídrico fica restringido pela via apoplástica, ocorre uma maior proporção no fluxo total que pode ser absorvida na periferia da raiz e passar de uma célula para outra através da simplástica. Segundo Steudle (2000), a resistência hidráulica total de raízes ou é mais uniformemente distribuída entre o cilindro de raiz (raízes jovens átonas), ou está concentrada em determinadas camadas (exoderme ou endoderme em raízes mais velhas).

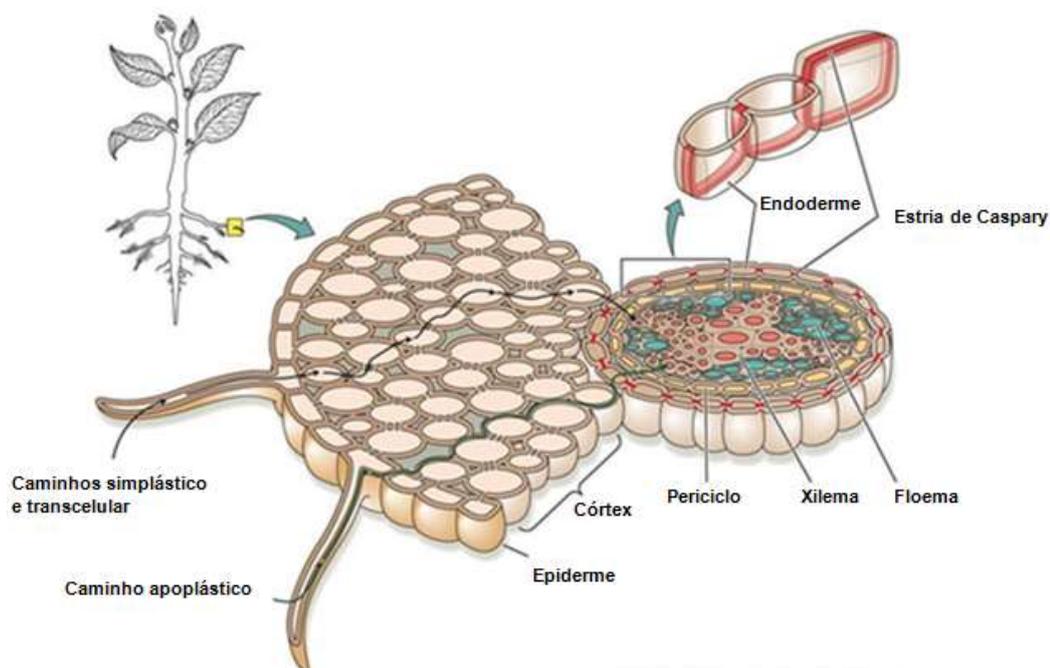


Figura 05 – Vias de absorção de água pela raiz

Fonte: Taiz & Zeiger (2009, p.79).

A alíquota de movimento hídrico em direção às raízes de acordo com Angelocci (2002, p. 234), “é dependente do gradiente de potencial da água entre o solo e a superfície radicular, bem como da condutividade hidráulica desse caminho,” e o conhecimento das vias do fluxo hídrico no interior da planta pode explicar “como cada órgão funciona em termos de resistência ao transporte hídrico global no SPA e como isso influencia o balanço hídrico da planta” (ANGELOCCI, 2002, p. 121). Em relação ao transporte hídrico do solo para o interior da raiz, dá-se devido ao baixo (mais negativo) potencial de água da raiz referente ao do solo. O potencial de água do solo é função da pressão osmótica da água do solo e da pressão hidráulica negativa (VIEIRA et al. 2010).

Já de acordo com Frensch & Steudle (1989), a absorção da água pelas raízes acontece devido à diminuição gradual do gradiente de potencial hídrico entre o meio em que as raízes se encontram e o xilema destas, e a captação de água do solo e seu transporte para a parte aérea é uma função essencial do sistema radicular. Ainda segundo o autor, o movimento da água através da raiz é impulsionado pelas diferenças de potencial de água e limitada pela resistência hidráulica. Segundo Kerbauy (2012), a zona de maior absorção de água é a dos pelos absorventes, pois aumentam muito a área superficial de contato com a água que circunda as partículas de solo. Ademais, as principais forças envolvidas na absorção de água pelas raízes podem ser descrita pela Equação 02.

$$absorção = \frac{(\psi_p + \psi_\pi)_{solo} - (\psi_p + \psi_\pi)_{raiz}}{r_{solo} + r_{raiz}} \quad (02)$$

Sendo ψ_p , o potencial de pressão, ψ_π , o potencial osmótico e r a resistência ao fluxo (segundos cm^{-1}). Segundo Gaio (2011, p. 31), “a resistência do córtex da raiz, R_{cortex} , deve ser modelada por uma associação em paralelo, devido à dupla via de entrada da água (apoplástica, R_{apo} , e simplástica/transcelular, R_{sim}):

$$R_{cortex} = 1 / (1/R_{sim} + 1/R_{apo})$$

De acordo com Steudle & Peterson (1998), a complexidade anatômica da raiz determina se o fluxo de água através dela será também complexa. Em complemento Steudle (2001) detalha que, as propriedades hidráulicas das raízes estão relacionadas com a sua estrutura e anatomia, dados críticos ao interpretar transporte na raiz.

Dependendo das espécies, das condições de crescimento, e do estado de desenvolvimento, existem grandes diferenças nas raízes.

2.7. O ANÁLOGO ELÉTRICO BÁSICO

Os circuitos hídricos através das raízes de plantas vasculares podem ser estudados de maneira análoga aos circuitos elétricos, pois a diferença de potencial entre sistemas encontrados nessas raízes corresponde a uma voltagem em um circuito elétrico e provoca o movimento de água na direção do sistema com o potencial mais negativo. De acordo com Castellán (1986, p. 236), “assim como a corrente elétrica escoar espontaneamente de uma região de potencial elétrico alto para uma de potencial elétrico mais baixo” a matéria também escoar espontaneamente de uma região de potencial químico alto para o de baixo potencial químico.

De acordo com Steudle & Peterson (1998), em 1948, van den Honert introduziu a ideia de que o movimento da água nas plantas é análogo ao fluxo de eletricidade, e visa ao fluxo de água como um processo onde cada elemento de catenária representa uma resistência hidráulica. Ademais, segundo van den Honert, em acordo com as leis básicas de eletricidade (de Ohm e as leis de Kirchhoff), quando os componentes de um circuito estão dispostos em série, as suas resistências são aditivos, e quando os componentes estão dispostos de forma paralela, as suas condutâncias (o inverso das suas resistências) são aditivos.

Conforme Meidner & Sheriff (1976), a capacitância e resistência combinada dão origem ao que é geralmente descrito como o atraso de absorção. Se a taxa de transpiração de uma planta aumenta bruscamente, a taxa de absorção de água não começará a aumentar simultaneamente, mas vai levar algum tempo antes que ela seja igual à taxa de perda de água. A diferença é feita a partir de água fornecida pela "capacidade" dos tecidos das plantas.

Segundo Sutcliffe (1980, p.98), “O movimento de água desde o solo, na corrente transpiratória através de uma planta, até o ar circundante, pode ser comparado com um circuito elétrico que consiste em resistências e capacitores”. Para construir um circuito elétrico análogo às vias de transporte hídrico em raízes de plantas vasculares, necessita-se apresentar todo o sistema elétrico que permite

interpretar com clareza e rapidez o funcionamento ou sequência funcional do circuito.

2.8. LEIS ANÁLOGAS DE KIRCHHOFF

Gustav Kirchhoff (1849) mostrou que a força motriz gera corrente em qualquer ponto do condutor devido uma diferença de potencial electrostático entre dois pontos adjacentes ao longo do seu comprimento. Este potencial é gerado pela energia livre (carga líquida) ao longo da superfície do condutor, mantido num estado estacionário pela célula fotovoltaica (GRANEAU & ASSIS, 1994). As pesquisas de Kirchhoff chegaram a Leis importantes para análise de circuitos.

A dinâmica hídrica das plantas vasculares segundo Gaio (2011), pode ser estudada de maneira análoga ao fluxo convencional da corrente elétrica obedecendo a Leis Análogas de Kirchhoff: Lei das Malhas - o potencial hídrico, assim como o potencial eletrostático, é uma variável de estado. A diferença de potencial hídrico entre dois pontos quaisquer do fluxo hídrico independe do caminho seguido pela água e, em um circuito fechado, a diferença de potencial hídrico é nula; Lei dos Nos: Em qualquer ponto do circuito hídrico, o fluxo de entrada é igual ao fluxo de saída de água. A Tabela 01 apresenta a analogia das unidades correspondentes.

Tabela 01 – Grandezas Análogas entre o fluxo elétrico e o fluxo hídrico.

Fluxo Elétrico			Fluxo hídrico		
Grandeza	Símbolo	Relação	Grandeza	Símbolo	Relação
Carga (Q)	coulomb (C)		Volume (W)		m^3
Potencial (V)	volt (V)	$J.C^{-1}$	Potencial (ψ)	Pascal (Pa)	$J.m^{-3}$
Corrente (i)	ampere (A)	$C.s^{-1}$	Fluxo (f)		$m^3.s^{-1}$
Resistência (R)	ohm (Ω)	$V.A^{-1}$	Resistência (R)		$Pa.s.m^{-3}$
Capacitância (C)	farad (F)	$C.V^{-1}$	Capacitância (C)		$m^3.Pa^{-1}$

A partir das analogias: carga elétrica e volume de água (linha 1) e potencial elétrico e potencial hídrico (linha 2), as analogias com as outras grandezas se estabelecem automaticamente.

Fonte: Gaio (2011, p. 31).

2.9. O SIMULADOR DE CIRCUITO

O QUCS (Quite Universal Circuit Simulator) é um moderno programa de computador de simulação que busca reunir uma gama de tecnologias estabelecidas e emergentes de simulação de circuitos para formar um "simulador de circuitos completamente universal". Muitos dos componentes do circuito de base e os domínios de simulação encontrados em SPICE são também disponíveis em Qucs. Ao longo das últimas três décadas, o SPICE - simulação linguagem netlist (listagem de componentes do circuito e de como estes componentes estão interconectados) - tornou-se um padrão para descrever, intercâmbiar e publicar modelos de dispositivos semicondutores e dados de circuitos (SCORDILIS, 2007).

O QUCS é um programa repleto de funcionalidades que possibilita a configuração de um circuito com uma interfase gráfica do usuário e simula grandes e pequenos sinais e comportamento de ruído do circuito. Depois que os dados forem armazenados no circuito, pode-se gerar o script de simulações e verificar os resultados da simulação em uma página de apresentação ou janela (SCORDILIS, 2007). No programa QUCS é possível criar símbolos representativos, e esquemas apresentando os resultados da simulação em vários tipos de diagramas. Ele também fornece vários componente tais como capacitor, resistor, indutor, fonte de tensão, ponteira de tensão dentre outros.

A interfase gráfica contida no programa QUCS é denominada de esquemático. Gaio (2011), em seu trabalho inédito, modelou, e simulou QUCS, o circuito hídrico completo de plantas vasculares. Para tanto, construiu diversos componentes do contínuo solo-planta-atmosfera (SPA), abrindo caminho para modelagens de simulações hídricas específicas de tais componentes, como por exemplo, o trabalho de Pereira (2013), que se utilizou da mesma ferramenta para simular a pressão de turgescência dos estômatos da espécie *Vicia faba*.

2.10. ESPÉCIES MODELADAS

Jones et al.(1988) calcularam a condutividade hídrica da raiz do trigo (*Triticum aestivum* L. cv. Atou) e do milho (*Zea mays* L. cv. Passat) a partir da condutividade hídricas das células (Figura 06). Para tanto, usaram uma sonda de pressão com a finalidade de se conhecer a condutividade de cada via de fluxo: transcelular, simplástica e apoplástica. Dada essa disponibilidade dos dados, serão construídos modelos para essas duas espécies vegetais de uso agrônômico.

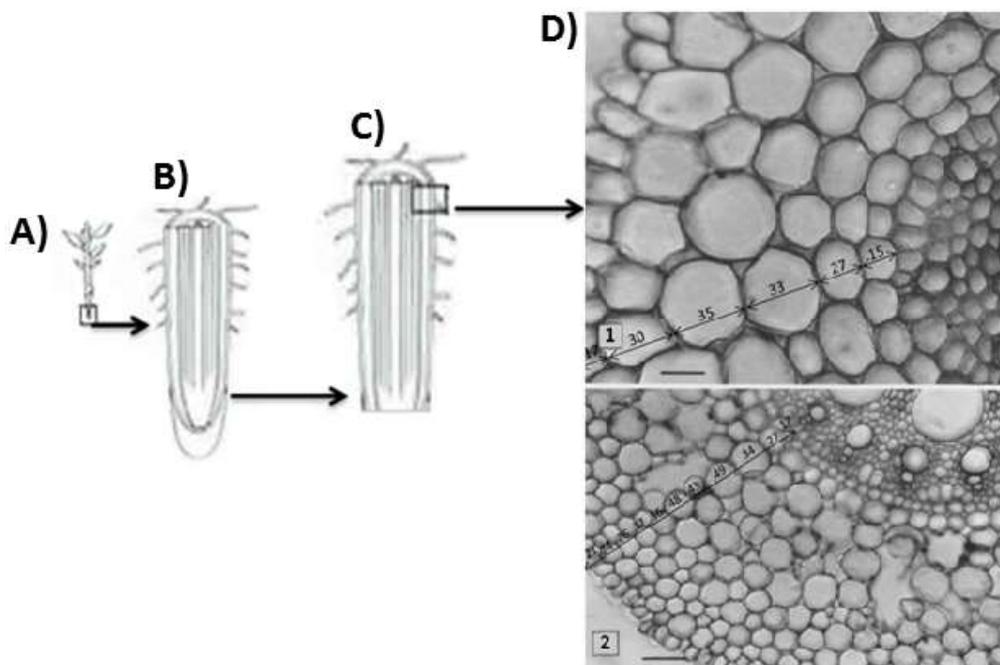


Figura 06 – Ilustração representativa do corte longitudinal e transversal da raiz.

A) Muda de cereal. B) Sistema de raiz única e inteira com a parte aérea removida. C) Sistema de raiz num formato cilíndrico concêntrico de membranas, sem a presença da coifa. D) Seções dos cortes transversais do trigo (1) e milho (2), com o diâmetro de cada célula por camada.

Fonte: Figuras A, B e C foram adaptadas de <http://felix.ib.usp.br/bib131/texto4/movimento.html>. Figura D adaptada do artigo de Jones et al. (1988).

As plantas de milho e trigo são espécies de gramíneas anuais, que estão entre os cereais mais cultivados do mundo. O milho é encontrado nos mais diversos ambientes, que segundo Castro & Kluge (1999, p. 41), é encontrado “desde latitude 40° S até 58° N e altitudes que variam entre 3.000 m, nos Andes peruanos, até abaixo do nível do mar, em regiões do mar Cáspio, o que levou a uma grande especialização

e adaptação da planta”. Por sua vez, o trigo é um cereal adaptado a solos bem drenados, a solos argilosos-siltosos e a zonas de temperaturas áridas ou semi-áridas, e tem sido cultivado do Equador até 60° de latitude, desde o nível do mar até a 3.000 m de altitude (CASTRO & KLUGE, 1999).

2.10.1. Milho

Segundo Paterniani et al. (2000), o milho (espécie *Zea mays* L) pertence à família *Poaceae*. Existem muitos tipos e raças de milho dentro dessa espécie. Entre todas as plantas cultivadas, o milho conta com maior variabilidade genética. Atualmente, foram identificadas cerca de 300 raças de milho com milhares de variedades por raça, sendo cultivado em praticamente todos os continentes, em todas as condições, porém, para cada região, existem milhos distintos com adaptação específica (PATERNIANI et al. 2000). A planta do milho é uma gramínea monocotiledônea anual com raízes rasas (Figura 07), fibrosas que crescem a uma profundidade máxima de apenas 50 centímetros.

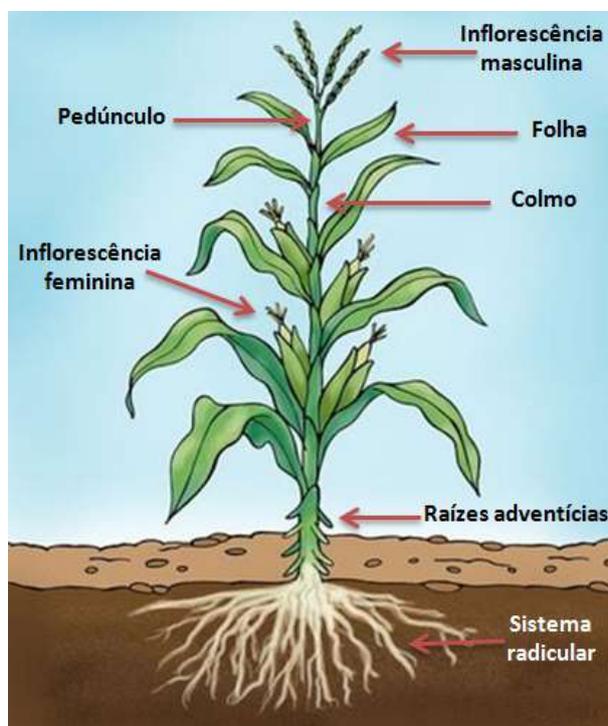


Figura 07 – Partes estruturais da planta do milho.

Figura adaptada de Petra Elster (2007).

Na parte aérea da planta, nos nós que estão na base da haste, também formam-se raízes adventícias. O caule possui entre 1,5 e 3,5 metros de comprimento, com um grande diâmetro entre cinco e seis centímetros. Com nós e entrenós no caule que podem ser comumente espaçados com cerca de 20 centímetros. Na altura de cada nó, há uma folha, alternando em cada lado do caule que pode chegar até 10 centímetros de largura e 1 metro de comprimento (ESCALANTE & MAÏGA, 2012). As folhas e as ramificações que podem permanecer no estado rudimentar ou desenvolver-se para formar as inflorescências femininas (espigas) correspondem em estrutura a um colmo com internódios mais curtos, e os colmos compactos terminam numa inflorescência masculina encontrada na extremidade superior do caule (FORNASIERI FILHO, 2007).

2.10.2. Trigo

A planta do trigo é uma espécie de gramínea monocotiledônea anual do gênero *Triticum*, autógama e uma das culturas de maior expansão mundial, possuindo milhares de cultivares disponíveis em todo mundo (BRAMMER et al. 2001). Acredita-se que por cerca de 6.700 a.C, ocorreram os primeiros cultivos do trigo entre os rios Tigre e Eufrates, na antiga Mesopotâmia. Registros arqueológicos revelam que desde os primórdios da agricultura no sudoeste da Ásia, há cerca de 10000 anos, em uma região montanhosa, árida, as histórias do trigo e da civilização humana estão interligadas (CASTRO & KLUGE, 1999).

A planta do trigo é uma gramínea monocotiledônea anual que varia numa altura de 0,3 m, em algumas variedades anãs, a 1,5 m. O alongamento do caule ocorre somente após a iniciação floral, sendo que a extensão de cada entrenó só inicia após a folha inserida no nó acima finalizar sua extensão. O pedúnculo que se encontra entrenó do topo da planta pode continuar sua extensão até após a antese coincidindo com o crescimento rápido das espiguetas, e o início do crescimento dos grãos pode ocorrer simultâneo ao seu crescimento (pedúnculo). O crescimento do caule ocorre concorrentemente com o de folhas, raízes e espiga. No período de florescimento da planta do trigo ocorre transferência do pólen até o estigma auxiliado

por vários agentes, obtendo a fertilização (autógama), com isso ocorre o crescimento inicial, que é predominantemente no exterior do pericarpo maternal e, o restante, na cobertura do grão (CASTRO & KLUGE, 1999).

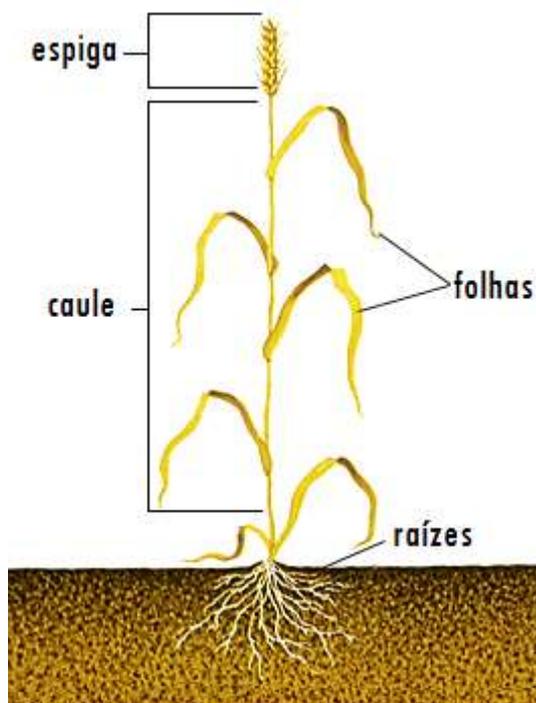


Figura 08 – Partes estruturais da planta do trigo.

Fonte: <http://science.howstuffworks.com/life/botany/wheat-info.htm>

O sistema radicular da planta do trigo, segundo Evans et al. (1980), é formado por dois sistemas de raízes: as raízes seminais, ou seja, que saem diretamente da semente; e por raízes nodais, que surgem dos nós do caule acima da semente. Dependendo das condições do solo as raízes verticais podem alcançar uma profundidade entre 1 a 2 metros (BARLEY, 1970). Os estudos de raízes relacionados ao complexo sistema de absorção de água e nutrientes tem tomado corpo na busca de soluções aos problemas de produção agrícolas, como por exemplo, o trabalho científico de Jones et al.(1988) relacionado à condutividade hidráulica de raízes de cereais.

3. METODOLOGIA

O modelo proposto busca estimar o fluxo hídrico nas raízes de plantas vasculares seguindo a metodologia de modelagem da dinâmica hídrica realizada por Gaio (2011).

Os dados experimentais de Jones et al. (1988) serviram de base para a construção dos módulos da raiz do trigo e milho. Esses dados compreendem: (i) o diâmetro total do cilindro da raiz (trigo: 450 μm , milho: 900 μm) e a altura de 10 cm desse cilindro; (ii) o número de camadas de cada tecido da raiz e os respectivos diâmetros médios das células (Tabela 02); (iii) a condutividade hídrica de cada camada expressa na coluna rotulada por LP nas Tabelas 04 a 06 e 10 a 12 e (iv) as imagens do corte da raiz. Todos os outros parâmetros de entrada foram calculados a partir de considerações expressas nessa metodologia.

Tabela 02- Diâmetros médios das células por camadas das raízes de trigo e milho.

Tecido	Raiz do trigo		Raiz do milho	
	Nº de camadas	Diâmetros médios das células	Nº de camadas	Diametros médios das células
Epiderme	1	17 μm	1	21 μm
Córtex	4	30, 35, 33 e 27 μm	9	24, 26, 37, 36, 48, 43, 49, 34, 27 μm
Endoderme	1	15 μm	1	17 μm

Fonte: Jones et al (1988)

3.1. A DISTRIBUIÇÃO DAS FUNÇÕES EM COMPONENTES

O presente estudo consiste de uma associação em série de camadas cilíndricas concêntricas dos tecidos da raiz (epiderme, córtex e endoderme). A construção do módulo inicia-se na caracterização de cada célula, replicação de suas propriedades para formar um anel e da subsequente replicação das propriedades de cada anel para formar cada camada, a qual é modelada na forma de uma superfície cilíndrica.

Para cálculo do número de células por anel utilizou-se a Equação 03:

$$N = \frac{2\pi R_n}{L} \quad (03)$$

Sendo L o diâmetro da célula da n ésima camada e R_n , o raio da n ésima camada. Inicia-se o cálculo com o raio da epiderme igual ao raio total da raiz. Para se encontrar o raio da camada $(n-1)$ é subtraído de R_n , o diâmetro da camada n . Por exemplo, para saber qual é o raio da primeira camada do córtex, subtrai-se o diâmetro da epiderme do raio total da raiz; para encontrar o raio da segunda camada do córtex subtrai-se o diâmetro da primeira camada do córtex, e assim sucessivamente.

Para cálculo da quantidade de anéis por camada, foi dividida a altura do cilindro (10 cm) da raiz pela espessura do anel respectivo, o que corresponde ao diâmetro da célula da camada apresentada na Figura 09.

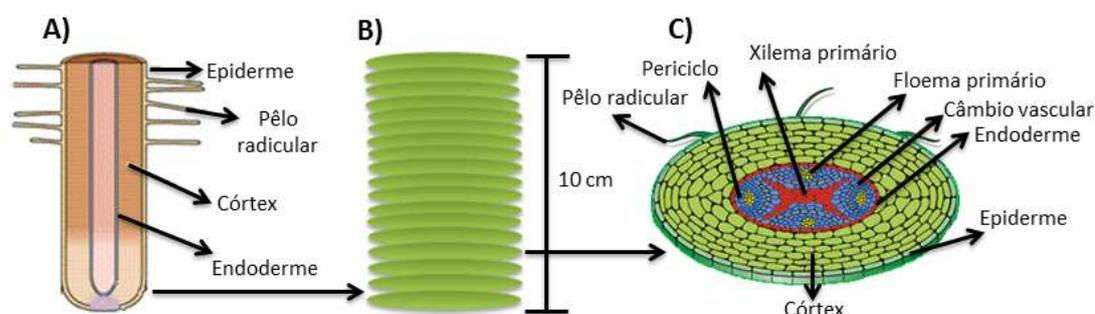


Figura 09 – Ilustração representativa da raiz numa estrutura primária.

A) Corte longitudinal da raiz sem a presença da coifa. **B)** Raiz com 10 cm de comprimento, formado pelo empilhamento de anéis. **C)** Composição do anel numa estrutura primária.

Fonte: Figuras A e C foram adaptadas de <http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/exercicios-html/Raiz.htm>.

O fluxo de água de camada a camada pode seguir três caminhos: apoplástico, simplástico e transcelular. A resistência ao fluxo no caminho apoplástico será considerada praticamente nula até a endoderme, onde a resistência cresce devido às estrias de Caspary. No entanto, não é uma afirmação consensual que a condutividade na endoderme seja nula (Öpik & Rolfe, 2005).

3.2. AS VIAS DE FLUXO

As vias apoplástica, simplástica e transcelular das raízes foram modeladas a partir do circuito básico de capacitores e resistores (RC), apresentado na Figura 10. As resistências são designadas pelas seguintes notações: ***R_{sitr}*** - Resistência ao fluxo das vias simplástica e transcelular acopladas; ***R_t*** - resistência do capacitor nas vias simplástica e transcelular acopladas; ***R_{apo}*** - resistência ao fluxo da via apoplástica; ***R_a*** - resistência do capacitor na via apoplástica; ***R_{trans}*** - resistência hídrica entre a via simplástica-transcelular e a via apoplástica; ***C_s*** - Capacitância das vias simplástica e transcelular acopladas; ***C_a*** - Capacitância da via apoplástica; ***V_s*** - Potencial hídrico inicial do capacitor das vias simplástica e transcelular acopladas; ***V_a*** - Potencial hídrico inicial do capacitor da via apoplástica.

Para que o circuito hídrico seja modelado análogo ao elétrico, foi considerado, conforme Gaio (2011), um fluxo principal que atravessa o resistor (***R_{potencial}***) e o diodo (***D_{sentido}***). O diodo é adotado por permitir que o fluxo hídrico o atravessa em um sentido com maior facilidade do que em outro. Foi imposto o valor zero para resistência interna do diodo.

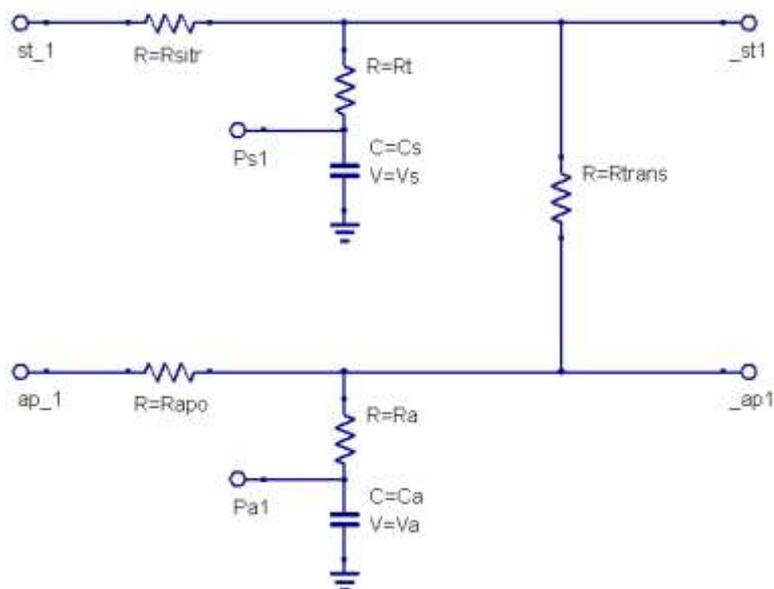


Figura 10 – Circuito hídrico básico das camadas da raiz.

Como o fluxo hídrico obedece a Lei das Malhas, para cada camada, a condutividade total é a soma das condutividades nas vias simplástica e transcelular.

Isso é equivalente a somar as resistências a partir da Equação (04):

$$R_{sitr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{transcelular}}\right) + \left(\frac{1}{R_{simplástica}}\right)} \quad (04)$$

$R_{transcelular}$ é a resistência transcelular e $R_{simplástica}$ a resistência simplástica. Considerou-se a resistência para armazenar ou desarmazenar cada camada é equivalente à resistência para atravessar as camadas ($R_t=R_{sitr}$). Foi considerado metade do valor de $R_{transcelular}$ para a via R_{trans} (resistência hídrica entre a via simplástica-transcelular e a via apoplástica) no tecido da epiderme, pois há apenas uma membrana entre as duas vias.

Para modelagem do circuito hídrico, foi calculada a resistência (R) ao fluxo hídrico com base na condutividade hidráulica (L_p) nas vias por camada dos tecidos, a partir da relação:

$$R = \frac{1}{L_p A} \quad (05)$$

Devido à grande condutividade hídrica das vias apoplásticas na epiderme e no córtex com relação à endoderme, foi adotado o valor de $1.0 \times 10^7 \text{ m.s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ para as camadas de ambos os tecidos (epiderme e córtex).

As camadas dos tecidos da raiz foram seccionadas longitudinalmente e planificadas para o cálculo da área (A) e do volume (V) (Figura 11).

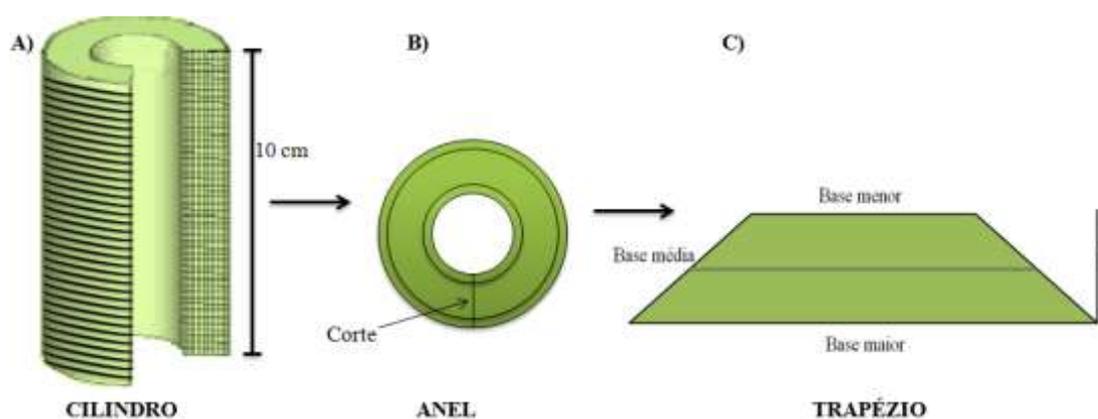


Figura 11 – Figura ilustrativa do corte longitudinal do cilindro da raiz.

A) Cilindro concêntrico seccionado na longitudinal. **B)** Anel retirado do cilindro da raiz, com corte longitudinal do centro até a parte externa. **C)** Trapézio formado com a transformação do anel em um plano.

Fonte: Figura (a) adaptada de Padilha et al. (2005, p.02).

A área da base de cada camada pode ser calculada pela expressão da área de um trapézio, cujos lados paralelos são dados pelos perímetros interno e externo dos anéis que compõe cada camada. As equações 06, 07 e 08 nos dão respectivamente o perímetro (P), a área da base (A) e o volume (V) de cada camada.

$$P = 2\pi r \quad (06)$$

$$A = P h \quad (07)$$

$$V = D h \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right) \quad (08)$$

Com base na asserção de que as células possuem simetria radial (aproximadamente esférica ou cúbica), um índice apoplástico (Equação 09) foi definido em função da razão entre as áreas apoplástica e total de um corte transversal ao eixo da raiz:

$$I_{apo} = \left(\frac{A_{apo}}{A_{total}} \right)^{3/2} \quad (09)$$

De tal modo que o volumes da via simplástica (V_{sim}) e apoplástica (V_{apo}) podem ser estimados por meio das equações 10.

$$V_{apo} = V I_{apo} \quad e \quad (10a)$$

$$V_{sim} = V (1 - I_{apo}) \quad (10b)$$

A área apoplástica (A_{apo}) foi determinada com o software de análise de imagem SIGMA SCAN PRO 5 (KARCHER & RICHARDSON, 2005; STOVER et al., 2007) a partir da micrografia do corte de seção transversal da raiz (JONES et al., 1988). O programa calcula a área a partir da contagem de pixels. A micrografia foi preparada de modo a selecionar corretamente a região entre as células (apoplástica) das raízes por camada.

O potencial hídrico (ψ) da raiz conforme Taiz & Zeiger (2009) corresponde a 0.1 MPa. Neste trabalho considerou-se 0.09 MPa para a endoderme, devido ocorrer maior resistência ao fluxo em relação aos demais tecidos, para os quais considerou-se a queda linear do potencial hídrico. As capacitâncias (C) de armazenamento hídrico nas vias intra e intercelular foram calculadas pela equação 11.

$$C = \frac{V}{\psi} \quad (11)$$

3.3. COMPONENTES DO MÓDULO DA RAIZ

Para o circuito hídrico da raiz, foram criados, conforme as estruturas radiculares dos cereais adotados, três diferentes componentes (camadas): epiderme, córtex e endoderme. Os símbolos dos componentes estão representados na Figura 12, para as camadas de epiderme, córtex e endoderme. A utilização de símbolos permite encapsular o circuito de cada camada do tecido. Os símbolos procuram retratar a função de cada camada. Na epiderme encontram-se os pelos radiculares, enquanto que na endoderme linhas tracejadas em vermelho visam representar as estrias de Caspary. As portas marcadas por círculos (sem os traços) são sondas sobre os capacitores que permitem conhecer a quantidade de água em cada capacitor.

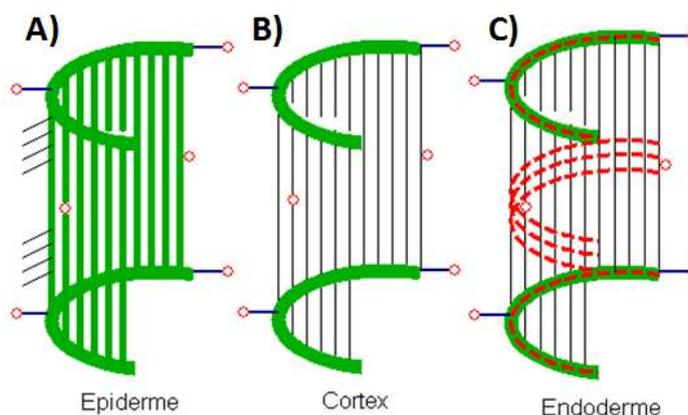


Figura 12 – Símbolos dos componentes do módulo da raiz.

Os componentes se conectam a partir das portas identificadas por um segmento de reta ligado a um pequeno círculo.

Foram criados quatro módulos para o córtex da raiz do trigo e nove para o córtex da raiz do milho (uma para cada camada), as quais foram ligadas em série com os módulos da epiderme e da endoderme (Figura 13 e 14). Foram montados seguindo as diretrizes de Steudle & Peterson (1998).

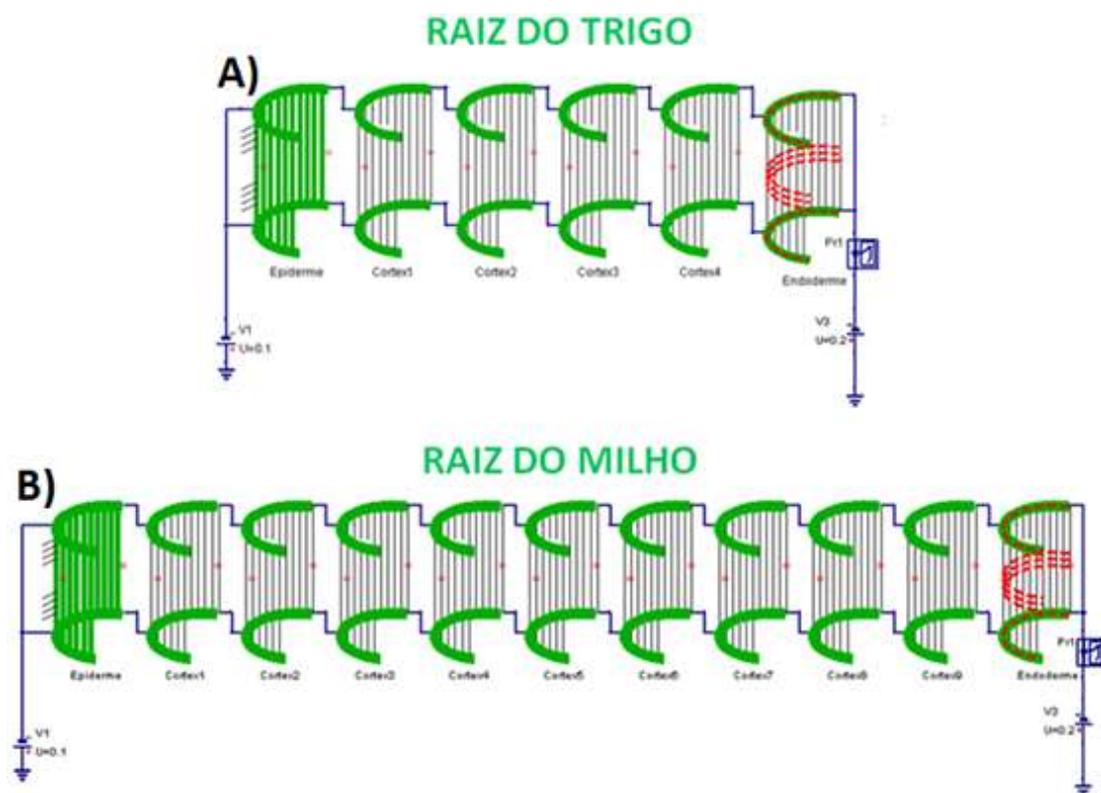


Figura 13 – Símbolo do módulo da raiz em regime estacionário (A) para o trigo e (B) para o milho.

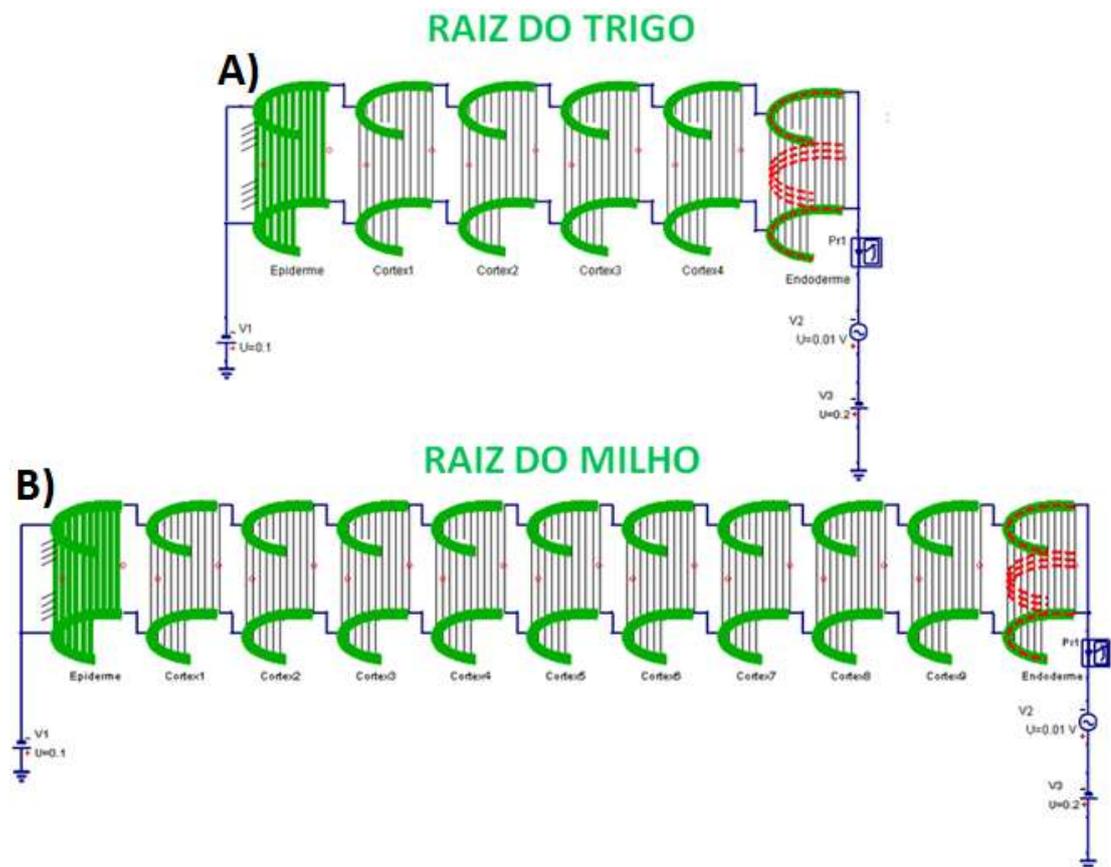


Figura 14 – Símbolo do módulo da raiz em regime oscilatório (A) para o trigo e (B) para o milho.

O Circuito da Figura 14, semelhantemente ao da Figura 13, possui uma diferença de potencial hídrico média de 0,1 MPa entre a endoderme (V3) epiderme (V1). Neste circuito, no entanto, há uma oscilação devida à presença de uma fonte senoidal (V2) com amplitude de 0,01 MPa e período de 24 horas.

4. RESULTADOS

4.1. FLUXO HÍDRICO NAS VIAS DA RAIZ DO TRIGO

O fluxo hídrico na raiz pode ser estudado a partir de um arranjo de dispositivos hídricos que armazenam e controlam o fluxo – capacitores e resistores. Para tanto, com base nos valores experimentais de Jones et al (1988) para condutividade média (L_p) das vias de fluxo e da medida da área do corte transversal da raiz, conforme estabelecido na metodologia, foram calculadas as resistências e capacitâncias do circuito.

Inicialmente foram estabelecidos os elementos da geometria da raiz, quais sejam: diâmetro da célula (D), raio do anel (raio), perímetro do anel (Per), área da seção reta (A) e volume (V) de cada camada. O índice apoplástico (I_{apo}) foi obtido a partir da equação 09 e os volumes simplástico (V_{sim}) e apoplástico (V_{apo}) com base na equação 10.

Tabela 03 – Áreas e Volumes das camadas do trigo

Camadas	D E-5 m	raio E-4 m	Per E-3 m	A E-5 m ²	V E-10 m ³	I_{apo} E-02	V_{sim} E-10 m ³	V_{apo} E-11 m ³
epi	1,70	2,25	1,41	1,41	2,31	8,17	2,12	1,89
c1	3,00	2,08	1,31	1,31	3,64	5,02	3,46	1,83
c2	3,50	1,78	1,12	1,12	3,53	5,02	3,35	1,77
c3	3,30	1,43	0,90	0,90	2,62	5,02	2,49	1,32
c4	2,70	1,10	0,69	0,69	1,64	5,02	1,55	0,82
endo	1,50	0,83	0,52	0,52	0,71	4,19	0,68	0,30
Interna		0,68	0,43					

Camadas da epiderme (epi), do córtex (c1, c2, c3 e c4), e da endoderme (endo).

O produto da área da seção reta da camada pela condutividade resultou na condutância e a resistência transcelular (R_t), Tabela 04, simplástica (R_a), Tabela 05, e apoplástica (R_a), Tabela 06, foram determinadas invertendo-se a condutância hídrica respectiva ($L_p A$).

Tabela 04 – Condutividade Transcelular para o trigo

Camada	A (m ²)	Lp (m.s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	Lp A (m ³ .s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	R _t =1/Lp A (Mpa. s ⁻¹ .m ³)
epi	1,41E-05	1,20E-07	1,70E-12	5,89E+11
c1	1,31E-05	1,20E-07	1,57E-12	6,38E+11
c2	1,12E-05	1,20E-07	1,34E-12	7,45E+11
c3	8,98E-06	1,20E-07	1,08E-12	9,27E+11
c4	6,91E-06	1,20E-07	8,29E-13	1,21E+12
endo	5,22E-06	1,20E-07	6,26E-13	1,60E+12

Dados da condutividade transcelular do trigo. Camadas da epiderme (epi), do córtex (c1, c2, c3 e c4), e da endoderme (endo). A coluna A refere-se à área da seção reta da camada; Lp é a condutividade hídrica e Lp A é a condutância hídrica. R_t é a resistência transcelular.

Tabela 05 – Condutividade Simplástica para o trigo

Camada	A (m ²)	Lp (m.s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	Lp A (m ³ .s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	R _s =1/Lp A (Mpa. s ⁻¹ .m ³)
epi	1,41E-05	2,40E-07	3,39E-12	2,95E+11
c1	1,31E-05	1,00E+07	1,31E+02	7,65E-03
c2	1,12E-05	1,00E+07	1,12E+02	8,94E-03
c3	8,98E-06	1,00E+07	8,98E+01	1,11E-02
c4	6,91E-06	1,00E+07	6,91E+01	1,45E-02
endo	5,22E-06	2,40E-07	1,25E-12	7,99E+11

Dados da condutividade simplástica do trigo. Camadas da epiderme (epi), do córtex (c1, c2, c3 e c4), e da endoderme (endo). A coluna A refere-se à área da seção reta da camada; Lp é a condutividade hídrica e Lp A é a condutância hídrica. R_s é a resistência simplástica.

Tabela 06 – Condutividade Apoplástica para o trigo

Camada	A (m ²)	Lp (m.s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	Lp A (m ³ .s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	R _a =1/Lp A (Mpa. s ⁻¹ .m ³)
epi	1,41E-05	1,00E+07	1,41E+02	7,07E-03
c1	1,31E-05	1,00E+07	1,31E+02	7,65E-03
c2	1,12E-05	1,00E+07	1,12E+02	8,94E-03
c3	8,98E-06	1,00E+07	8,98E+01	1,11E-02
c4	6,91E-06	1,00E+07	6,91E+01	1,45E-02
endo	5,22E-06	2,40E-07	1,25E-12	7,99E+11

Dados da condutividade apoplástica do trigo. Camadas da epiderme (epi), do córtex (c1, c2, c3 e c4), e da endoderme (endo). A coluna A refere-se à área da seção reta da camada; Lp é a condutividade hídrica e Lp A é a condutância hídrica. R_a é a resistência apoplástica.

Com base nas Tabelas 04 a 06 e da equação 04, foram calculadas as resistências equivalentes (Tabela 07) das vias simplástica e transcelular (R_{sitr}) e a resistência ao descarregamento hídrico dessa via (R_t). As resistências correlatas para

o caminho apoplástico (Rapo e Ra) foram obtidas diretamente das tabelas. A resistência ao fluxo da água para entrar na raiz na via transcelular-simplástica (Rtrans para a epiderme) é a resistência de uma única membrana, portanto dividiu-se por dois o valor tabelado segundo Jones et al (idem). Nas demais camadas, para a água atravessar de uma célula para outra, na via transcelular, deve atravessar duas membranas, portanto mantiveram-se os valores das tabelas 04 a 06.

Da Tabela 07, finalmente, gerou-se o circuito hídrico da Figura 14, para rodar no programa QUCS. Foram feitas duas simulações: sem o potencial senoidal (V2), a qual permite conhecer o comportamento do fluxo para um sistema estacionário; e com o potencial senoidal (sistema oscilatório), que permite conhecer a defasagem causada pelos capacitores hídricos.

Tabela 07 – Constantes do circuito do fluxo hídrico pelas vias da raiz do trigo.

	Epiderme	Córtex 1	Córtex 2	Córtex 3	Córtex 4	Endoderme
Rsit	1.96E11	7.65E-3	8.94E-3	1.11E-2	1.45E-2	5.33E11
Rt	1.96E11	7.65E-3	8.94E-3	1.11E-2	1.45E-2	5.33E11
Rapo	7.07E-3	7.65E-3	8.94E-3	1.11E-2	1.45E-2	7.99E11
Ra	7.07E-3	7.65E-3	8.94E-3	1.11E-2	1.45E-2	7.99E11
Rtrans	2.95E11	6.38E11	7.45E11	9.27E11	1.21E12	1.60E12
Cs	1.06E-7	1.73E-7	1.68E-7	1.25E-7	7.77E-8	7.58E-10
Ca	9.44E-9	9.13E-9	8.86E-9	6.58E-9	4.11E-9	3.31E-11
Vs	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.2
Va	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.2

Uma ponteira de corrente foi colocada em cada via entre as camadas (Figura 15), onde possibilitou verificar o comportamento do fluxo hídrico. As sondas colocadas sobre os capacitores permitem conhecer o potencial hídrico referente a cada via de cada camada de tecido. Para simular um regime estacionário, isto é, quando não há variação do conteúdo de água no solo (o que experimentalmente pode ser conseguido com rega contínua), manteve-se constantes os potenciais hídricos na entrada do circuito da raiz ($V_1 = -0.1$ MPa) e na saída ($V_2 = -0.2$ MPa). Os fluxos medidos na via simplástica-transcelular iniciam por fs (epiderme: fsep; córtex: fsc1, fsc2, fsc3, fsc4 e endoderme: fsed) e os fluxos na via apoplástica iniciam pelas letras fa (faep, fac1, fac2, fac3, fac4, faen).

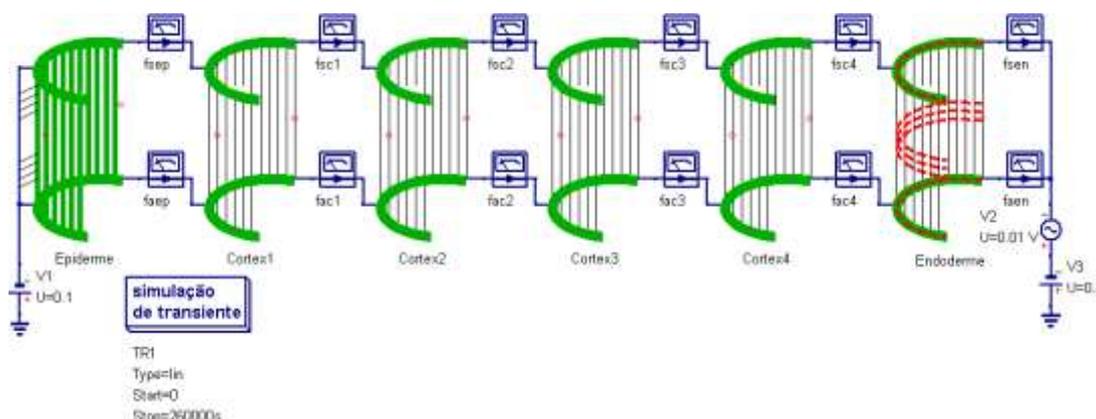


Figura 15 – Símbolo do Circuito hidráulico do módulo da raiz do trigo. As ponteiros de corrente medem o fluxo hídrico nas vias da raiz

Após um período de simulação longo (a esperar que o sistema se estabilize), foram obtidos os valores dos fluxos pelas vias da raiz em regime estacionário, em cada camada, graficados na **Figura 16**.

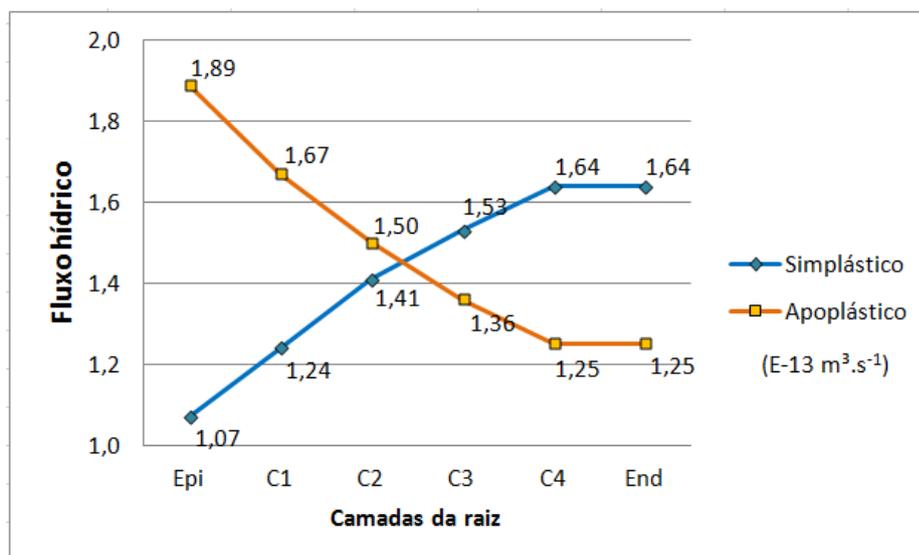


Figura 16 – Fluxos hídricos na raiz do trigo
Gráficos dos fluxos nos caminhos simplástico-transcelular e apoplástico.

Observa-se que o fluxo simplástico-transcelular aumenta a cada camada em direção ao periciclo, enquanto o apoplástico reduz-se. Isso acontece porque, em todo o circuito – da epiderme à endoderme – a água é forçada a entrar para dentro da célula, dada a resistência apoplástica a frente, como esquematizado na Figura 17.

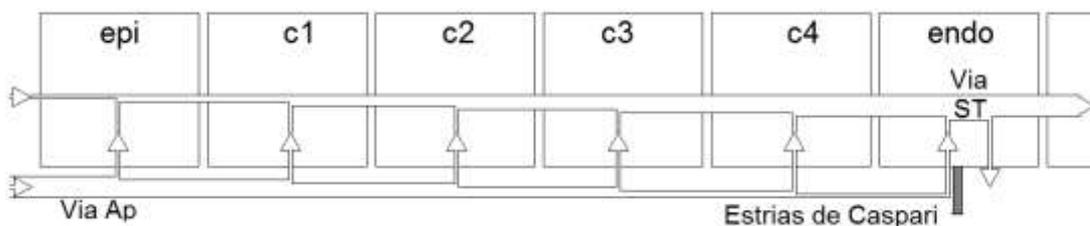


Figura 17 – Esquema do fluxo hídrico na raiz do trigo.

As larguras das barras representam as intensidades dos fluxos nas vias simplástica-transcelular (Via ST) e apoplástica (Via Ap)

A água que flui pela via apoplástica não espera atingir as estrias de Caspari para atravessar a membrana e seguir outra via, ocorre em todo o trajeto apoplástico.

Para se analisar os tempos característicos do circuito hídrico da raiz do trigo no regime oscilatório, colocou-se uma fonte com período de oscilação senoidal de 24 horas. Os deslocamentos dos máximos, devido às cargas e descargas parciais dos capacitores hídricos podem ser observados nas Figuras 18 e 19.

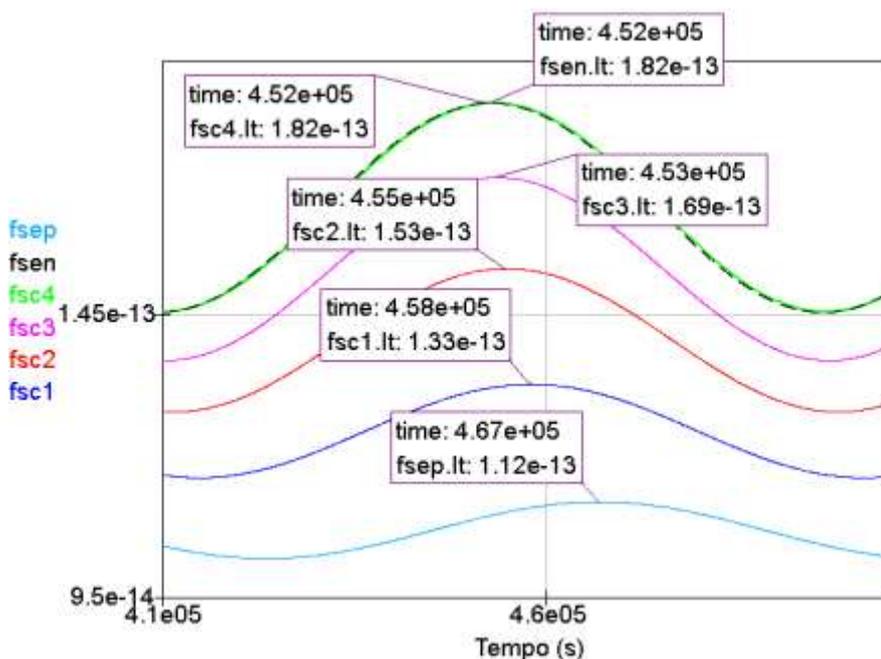


Figura 18 – Fluxo hídrico da raiz do trigo pela via simplástica-transcelular.

A linha sólida representa o fluxo hídrico na epiderme (*fsep*) e no córtex (*fsc1*, *fsc2*, *fsc3*, *fsc4*). A linha tracejada sobrepõe-se ao *fsc4* e representa o fluxo hídrico na endoderme (*fsen*). Valores em unidades de (m³MPa⁻¹).

A forte atenuação do sinal (Figura 18) e defasagem do fluxo hídrico (Tabela 08) aumentam com a distância da fonte senoidal na via simplástica-transcelular da raiz.

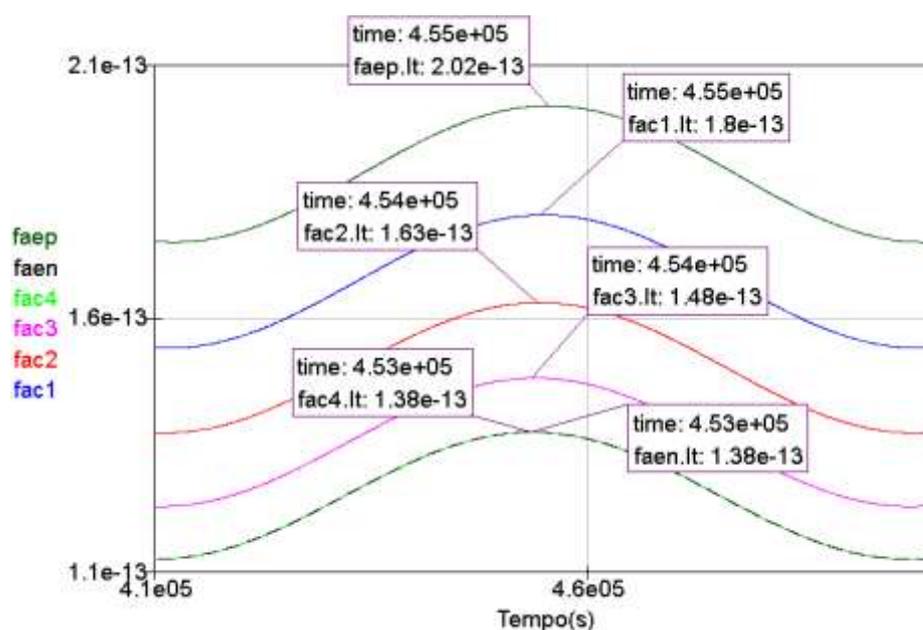


Figura 19 – Gráfico do fluxo hídrico da raiz do trigo pela via apoplástica.

A linha sólida representa o fluxo hídrico na epiderme (*fsep*) e no córtex (*fsc1*, *fsc2*, *fsc3*, *fsc4*). A linha tracejada sobrepõe-se ao *fsc4* e representa o fluxo hídrico na endoderme (*fsen*). Valores em unidades de (m^3s^{-1}).

A defasagem do fluxo (Figura 19) na via apoplástica aumenta com a distância da fonte, porém o sinal amplia-se em direção à epiderme.

Tabela 08 – Defasagens do fluxo hídrico na raiz do trigo

Ponto de medida	Fmáx ($\text{E-13 m}^3\text{s}^{-1}$)	t máx (s)	$\Delta\text{Fmáx}$ ($\text{E-13 m}^3\text{s}^{-1}$)	Δt (s)
fsep	1,11976	466775		
fsc1	1,32752	457987	0,20776	8788
fsc2	1,53228	454737	0,20476	3250
fsc3	1,69339	453541	0,16111	1196
fsc4	1,82449	453073	0,1311	468
fsen	1,82494	452657	0,00045	416
faep	2,02031	455439		
fac1	1,80498	454867	-0,21533	572
fac2	1,63221	454373	-0,17277	494
fac3	1,48332	453931	-0,14889	442
fac4	1,37672	453593	-0,1066	338
faen	1,37672	453567	0	26

Fluxos máximos medidos (Fmáx) em cada camada, tempo na máxima do fluxo hídrico (t máx), variação com relação à camada anterior ($\Delta\text{Fmáx}$) e suas respectivas defasagens (Δt).

4.2. FLUXO HÍDRICO NAS VIAS DA RAIZ DO MILHO

De modo semelhante ao procedimento aplicado ao fluxo hídrico nas vias do trigo, com base nos valores experimentais de Jones et al (1988) para condutividade média (L_p) das vias de fluxo e da medida da área do corte transversal da raiz, conforme estabelecido na metodologia, foram calculadas as resistências e capacitâncias do circuito hídrico do milho. A Tabela 09 traz os elementos de geometria da raiz.

Tabela 09 – Áreas e Volumes das camadas do milho

Camadas	D (E-5)	Raio E-4	Per E-3	A E-4	V E-10	I_{apo} E-02	V_{sim} E-10	V_{apo} E-11
epi	2,10	4,50	2,83	2,83	5,80	0,20	4,64	1,16
c1	2,40	4,29	2,70	2,70	6,29	0,16	5,31	0,98
c2	2,60	4,05	2,54	2,54	6,40	0,16	5,4	1,00
c3	3,70	3,79	2,38	2,38	8,38	0,16	7,07	1,31
c4	3,60	3,42	2,15	2,15	7,33	0,16	6,19	1,14
c5	4,80	3,06	1,92	1,92	8,50	0,16	7,18	1,33
c6	4,30	2,58	1,62	1,62	6,39	0,16	5,39	1,00
c7	4,90	2,15	1,35	1,35	5,87	0,16	4,95	0,91
c8	3,40	1,66	1,04	1,04	3,18	0,16	2,69	0,50
c9	2,70	1,32	0,83	0,83	2,01	0,16	1,70	0,31
endo	1,70E	1,05	0,66	0,66	1,03	0,16	0,86	0,16
Interna		0,88	0,54					

Camadas da epiderme (epi), do córtex (c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8 e c9), e da endoderme (endo).

As tabelas de 10 a 12, além dos valores experimentais (LP), trazem os cálculos das resistências transcelular, simplástica e apoplástica, respectivamente. Todas as grandezas estão expressas no Sistema Internacional de Unidades e todos os símbolos são similares aos adotados para o trigo.

Tabela 10 – Condutividade Transcelular para o milho

Camada	A (E-4 m ²)	Lp (m.s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	Lp A (m ³ .s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	R=1/Lp A (Mpa. s ⁻¹ .m ³)
epi	2,83	1,00E+07	2,83E+03	3,54E-04
c1	2,70	1,00E+07	2,70E+03	3,71E-04
c2	2,54	1,00E+07	2,54E+03	3,93E-04
c3	2,38	1,00E+07	2,38E+03	4,20E-04
c4	2,15	1,00E+07	2,15E+03	4,65E-04
c5	1,92	1,00E+07	1,92E+03	5,20E-04
c6	1,62	1,00E+07	1,62E+03	6,17E-04
c7	1,35	1,00E+07	1,35E+03	7,40E-04
c8	1,04	1,00E+07	1,04E+03	9,59E-04
c9	0,83	1,00E+07	8,29E+02	1,21E-03
endo	0,66	2,40E-07	1,58E-11	6,32E+10

Tabela 11 – Condutividade Simplástica para o milho

Camada	A (E-4 m ²)	Lp (m.s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	Lp A (m ³ .s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	R=1/Lp A (Mpa. s ⁻¹ .m ³)
epi	2,83	2,40E-07	6,79E-07	1,47E+06
c1	2,70	1,00E+07	2,70E+07	3,71E-08
c2	2,54	1,00E+07	2,54E+07	3,93E-08
c3	2,38	1,00E+07	2,38E+07	4,20E-08
c4	2,15	1,00E+07	2,15E+07	4,65E-08
c5	1,92	1,00E+07	1,92E+07	5,20E-08
c6	1,62	1,00E+07	1,62E+07	6,17E-08
c7	1,35	1,00E+07	1,35E+07	7,40E-08
c8	1,04	1,00E+07	1,04E+07	9,59E-08
c9	0,83	1,00E+07	8,29E+06	1,21E-07
endo	0,66	2,40E-07	1,58E-07	6,32E+06

Tabela 12 – Condutividade Apoplástica para o milho

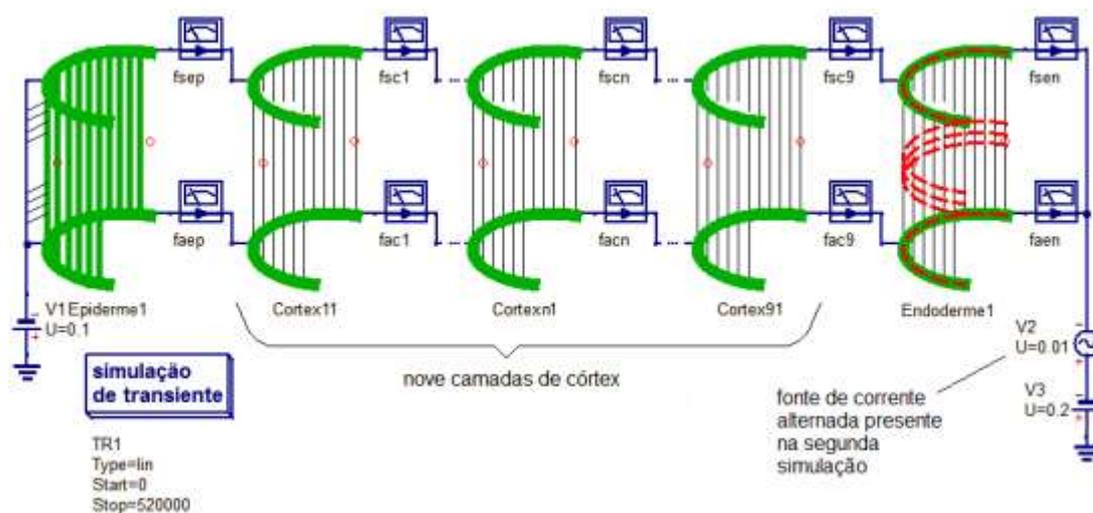
Camada	A (E-4 m ²)	Lp (m.s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	Lp A (m ³ .s ⁻¹ .Mpa ⁻¹)	R=1/Lp A (Mpa. s ⁻¹ .m ³)
epi	2,83	1,00E+07	2,83E+03	3,54E-04
c1	2,70	1,00E+07	2,70E+03	3,71E-04
c2	2,54	1,00E+07	2,54E+03	3,93E-04
c3	2,38	1,00E+07	2,38E+03	4,20E-04
c4	2,15	1,00E+07	2,15E+03	4,65E-04
c5	1,92	1,00E+07	1,92E+03	5,20E-04
c6	1,62	1,00E+07	1,62E+03	6,17E-04
c7	1,35	1,00E+07	1,35E+03	7,40E-04
c8	1,04	1,00E+07	1,04E+03	9,59E-04
c9	0,83	1,00E+07	8,29E+02	1,21E-03
endo	0,66	2,40E-07	1,58E-11	6,32E+10

As tabelas 10, 11 e 12 serviram de base para gerar os valores das resistências equivalentes (Tabela 13) para o circuito hídrico do milho (Figura 20).

Tabela 13 – Constantes do circuito do fluxo hídrico pelas vias da raiz do milho.

	Epiderme	Córtex 1	Córtex 2	Córtex 3	Córtex 4	Córtex 5	Córtex 6	Córtex 7	Córtex 8	Córtex 9	Endoderme
Rsitr	9.82E9	3.71E-4	3.93E-4	4.20E-4	4.65E-4	5.20E-4	6.17E-4	7.40E-4	9.59E-4	1.21E-3	4.21E10
Rt	9.82E9	3.71E-4	3.93E-4	4.20E-4	4.65E-4	5.20E-4	6.17E-4	7.40E-4	9.59E-4	1.21E-3	4.21E10
Rapo	3.54E-4	3.71E-4	3.93E-4	4.20E-4	4.65E-4	5.20E-4	6.17E-4	7.40E-4	9.59E-4	1.21E-3	6.32E10
Ra	3.54E-4	3.71E-4	3.93E-4	4.20E-4	4.65E-4	5.20E-4	6.17E-4	7.40E-4	9.59E-4	1.21E-3	6.32E10
Rtrans	1.47E10	3.09E10	3.27E10	3.50E10	3.88E10	4.33E10	5.14E10	6.17E10	7.99E10	1.00E11	1.26E11
Cs	4.64E-7	5.31E-7	5.41E-7	7.07E-7	6.19E-7	7.18E-7	5.39E-7	4.95E-7	2.69E-7	1.7E-7	5.24E-10
Ca	1.16E-7	9.81E-8	9.99E-8	1.31E-7	1.14E-7	1.33E-7	9.96E-8	9.15E-8	4.96E-8	3.13E-8	9.95E-11
Vs	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Va	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2

Para simular um regime estacionário da raiz do milho, isto é, quando não há variação do conteúdo de água no solo, mantiveram-se constantes os potenciais hídricos na entrada do circuito da raiz, de modo que a fonte de corrente alternada da Figura 20 não está presente na primeira simulação.

**Figura 20** – Circuito hídrico do módulo da raiz do milho.

Após um período longo (a esperar que o sistema se estabilize), obtiveram-se os valores dos fluxos após cada camada, graficados na **Figura 21**. Observa-se a redução no fluxo apoplástico a cada camada em direção ao periciclo.

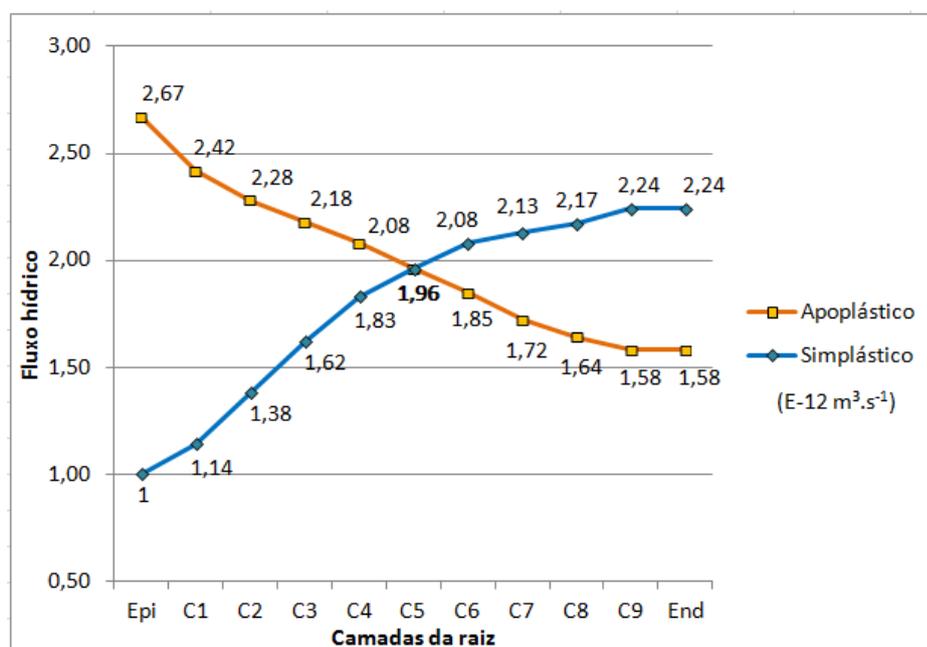


Figura 21 – Fluxos hídricos na raiz do milho.

Gráficos dos fluxos nos caminhos simplástico-transcelular e apoplástico.

A redução no fluxo apoplástico a cada camada em direção ao periciclo, semelhante ao comentado para o tratamento da raiz de trigo, ocorre porque, em todo o circuito, a água é forçada a entrar na célula, dada a resistência apoplástica à frente.

Para a análise dos tempos característicos do circuito hídrico da raiz do milho no sistema oscilatório, colocou-se uma fonte senoidal com período de oscilação de 24 horas. Os deslocamentos dos máximos devido às cargas e descargas parciais dos capacitores hídricos podem ser observados nas Figuras 22 e 23.

Nos gráficos das Figuras 22 e 23, A linha sólida representa o fluxo hídrico na epiderme (fsep) e no córtex (fsc1, fsc2, fsc3, fsc4, fsc5, fsc6, fsc7, fsc8 e fsc9). A linha tracejada sobrepõe-se ao fsc9 e representa o fluxo hídrico na endoderme (fsen). Valores em unidades de (m³MPa⁻¹).

Há, para o milho, forte atenuação do sinal (Figura 22) e a defasagem do fluxo hídrico (Tabela 14) aumenta com a distância à fonte senoidal na via simplástica-transcelular da raiz. Na via apoplástica, o valor máximo do fluxo (Figura 23) e a sua defasagem (Tabela 14) também aumentam com a distância da fonte em direção à epiderme, de modo semelhante ao ocorrido com o trigo.

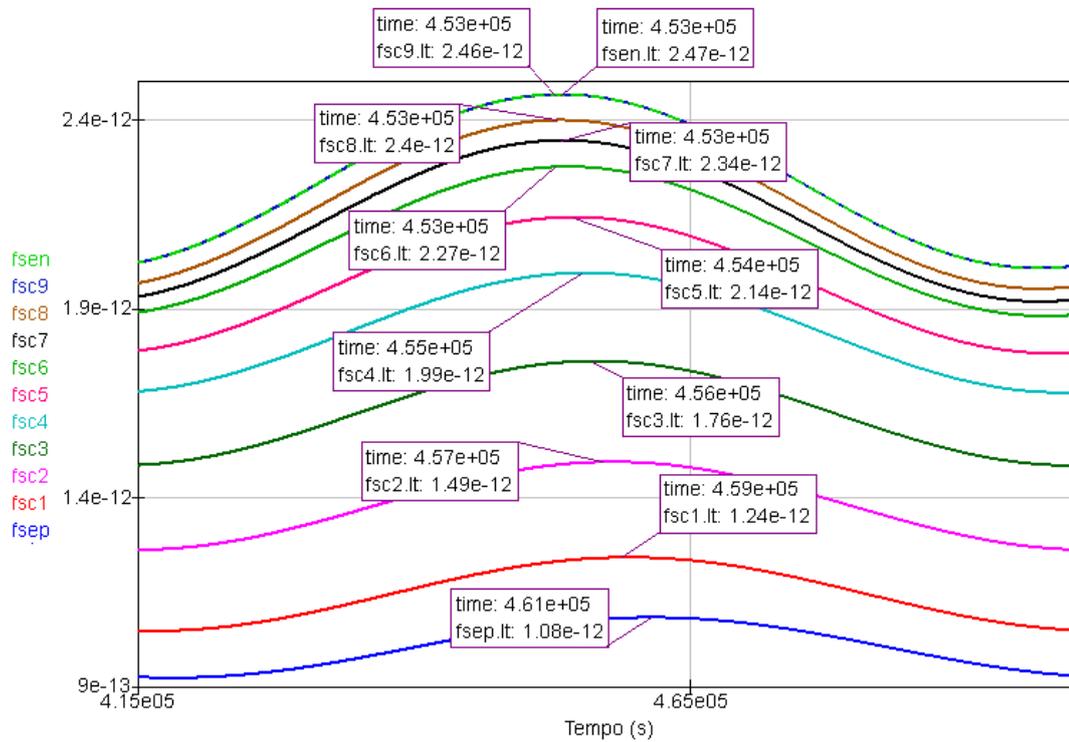


Figura 22 – Fluxo hídrico da raiz do milho pela via simplástica-transcelular.

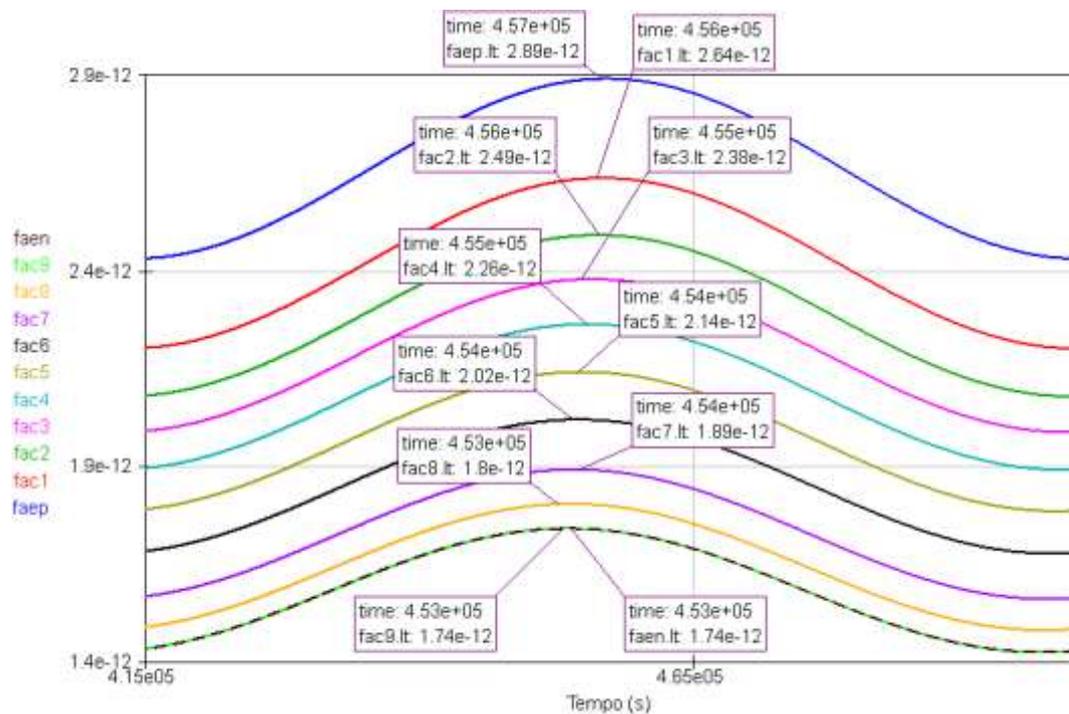


Figura 23 – Fluxo hídrico da raiz do milho pela via apoplástica.

Tabela 14 – Defasagens do fluxo hídrico na raiz do milho

Pontos de medidas	F _{máx} (E-12 m ³ MPa ⁻¹)	t _{máx} (s)	ΔF _{máx} (E-14 m ³ MPa ⁻¹)	Δt (s)
fsep	1,08194	461393		
fsc1	1,24087	459365	0,15893	2028
fsc2	1,49337	457935	0,2525	1430
fsc3	1,75966	456401	0,26629	1534
fsc4	1,99316	455439	0,2335	962
fsc5	2,14058	454425	0,14742	1014
fsc6	2,27408	453879	0,1335	546
fsc7	2,34369	453385	0,06961	494
fsc8	2,39738	453229	0,05369	156
fsc9	2,46509	453177	0,06771	52
fsen	2,4651	453151	1E-05	26
faep	2,8903	457129		
fac1	2,63597	456713	-0,25433	416
fac2	2,4904	456271	-0,14557	442
fac3	2,37769	455829	-0,11271	442
fac4	2,26279	455361	-0,1149	468
fac5	2,14058	454919	-0,12221	442
fac6	2,01874	454503	-0,12184	416
fac7	1,89107	454139	-0,12767	364
fac8	1,80328	453853	-0,08779	286
fac9	1,74051	453593	-0,06277	260
faen	1,74051	453593	0	0

Fluxos máximos medidos (F_{max}) em cada camada, tempo na máxima do fluxo hídrico (t_{máx}), variação com relação à camada anterior (ΔF_{máx}) e suas respectivas defasagens (Δt).

Observa-se na tabela 14, que o fluxo hídrico pela via simplástica-transcelular aumenta ao se aproximar do tecido da endoderme. Para o fluxo na via apoplástica ocorre o inverso.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho refina a modelagem análoga hídrica-elétrica da raiz de plantas vasculares iniciada por Gaio (2011) em seu trabalho inédito de modelar um circuito hídrico completo das plantas vasculares por meio da simulação dos diversos componentes do contínuo solo-planta-atmosfera (SPA) no software QUCS.

Duas são as características fundamentais desse refinamento. Primeiro, o número de dispositivos construídos e suas características funcionais estão de acordo com a anatomia específica das plantas aqui estudadas: trigo e milho. Segundo os valores utilizados foram obtidos para essas plantas (JONES et al, 1988), diferentemente de Gaio (2011) que utilizou valores médios característicos presentes na literatura.

As semelhanças entre as duas espécies era esperada, embora as plantas do trigo sejam predominantes em zonas áridas ou semi-áridas e o milho encontrado nos mais diversos ambientes, ambas apresentam estruturas anatômicas semelhantes com duas vias de fluxo hídrico – simplástico-transcelular e apoplástica – que se iniciam na epiderme, passam pelo córtex e vão até a endoderme.

Foram feitas duas simulações no programa computacional QUCS. A primeira simula um regime estacionário em que não há alteração do conteúdo de água do solo e do potencial hídrico no periciclo, de modo que, após um tempo relativamente longo, o fluxo se estabiliza em um valor constante. A segunda simula um regime oscilatório, com uma fonte senoidal com período de 24 horas conectada à endoderme, permitindo conhecer o comportamento da raiz com a variação diária da demanda de água que está submetida.

Tanto para o milho como para o trigo, nas duas simulações, o fluxo simplástico aumentou em direção à endoderme, porque entrou mais água nas células a cada camada. Consequentemente o fluxo apoplástico diminuiu em direção à endoderme, porque a água que entrou na célula alargando o fluxo simplástico-transcelular, saiu da via apoplástica.

Observa-se nessa modelagem que há um ponto em que ocorre a inversão da predominância do fluxo hídrico. Um ponto em que o fluxo simplástico-transcelular torna-se maior que o fluxo apoplástico. Esse ponto se dá exatamente a meio caminho

entre a epiderme e a endoderme. Esse fato permite interpretar a via apoplástica na raiz como uma estratégia da planta para aumentar a superfície de absorção de água pelas células.

No regime oscilatório, tanto para o milho como para o trigo, há uma defasagem do valor máximo do fluxo com relação às camadas. Essa defasagem do valor máximo do pulso aumenta em direção à epiderme, porque a epiderme está mais distante do sinal (da fonte senoidal). A causa de tal atraso nesse máximo é a inércia do conteúdo hídrico das camadas. Há, tanto aqui como em circuitos elétricos, um tempo característicos de carga e descarga dos capacitores, que faz com que o sinal não atravesse instantaneamente as camadas.

Espera-se também que em trabalhos futuros proceda-se a agregação do circuito radicular ao circuito do contínuo SPA desenvolvido por Gaio (2011). Com esse trabalho abrem-se perspectivas de calcular e medir esses tempos característicos para cada vez mais refinar o modelo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R da S. & STONE, L. F. **Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado**. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.15, n.2, p.111–116, 2011.

ANGELOCCI, Luiz Roberto. **Água na planta e trocas gasosas/ energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico**. – Piracicaba: L.R. Angelocci, 2002. 272 p.

BARBER, Stanley A. **Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach**. - 2ª edição, New York: Editora John Wiley & Sons, 1995, 414 p.

BARLEY, K.P. **The configuration of the root system in relation to nutrient uptake**. Advances in agronomy, v.22, pp. 159-201, 1970.

BARRIEU F, CHAUMONT F, CHRISPEELS MJ. 1998. **High expression of the tonoplast aquaporin *Zm TIP 1* in epidermal and conducting tissues of maize**. Plant Physiology 117, 1153-1163.

BEHRING, J. L; LUCAS, M; MACHADO, C e BARCELLOS, I. O. **Adaptação no método do peso da gota para determinação da tensão superficial: Um método simplificado para a quantificação da cmc de surfactantes no ensino da química**. Vol. 27, No. 3, 492-495, 2004.

BILSKIE, By Jim. **Soil water status: content and potential**. Campbell Scientific, Inc. 2001. Disponível em: <http://s.campbellsci.com/documents/us/technical-papers/soilh20c.pdf>, acessado no dia 01/09/2013.

BRAMMER, S. P.; MARTINELLI, P.; MORAES-FERNANDES, M. I. B. de; PRESTES, A. M.; ANGRA, D. C. **A potencialidade de Agropyron, espécie afim ao trigo cultivado, como fonte de introgressão de genes agronomicamente importantes**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 8 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPT-2010/40626/1/p-do08.pdf>, acessado no dia 07/09/2013.

CAMPBELL, Mary K. **Bioquímica**. Tradução Henrique Bunselmeyer Ferreira...[et al.]. – 3ª edição. – Porto Alegre: Artmed Editora, 2000. 752 p.

CAMPBELL, Mary K. & FARRELL, Shawn O. **Bioquímica**: Volume 1, bioquímica básica. Tradução da 5ª edição norte-americana por All Tasks; revisão técnica Maria Martha Guedes Chaves. – São Paulo: Thomson Learning, 2007. 263p.

CASTELLAN, Gilbert. **Fundamentos de Físico-Química**. Traduzido de “*Physical Chemistry*”. 1986. Tradução por Cristina Maria Pereira dos Santos, Roberto de Barros Faria. Rio de Janeiro, RJ, Brasil; Ed. LTC; Reimpressão: 2003. 527 p.

CASTRO, Paulo R.S. & KLUGE, Ricardo A. **Ecofisiologia de cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca**. São Paulo: Nobel, 1999. 126 p.

COSTA, A. R. **As Relações Hídricas das Plantas Vasculares**. 2001. Disponível em <http://www.angelfire.com/ar3/alexcosta0/RelHid/RhwIndice.htm>. Acessado em 27/10/2012.

DIAS, L. B. **Água nas Plantas**. 2008. 53 p. Monografia apresentada ao Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais-CEAP. 2008.

ESAU, Katherine. **Anatomia das plantas com sementes**. Tradução: Berta Lange de Morretes. – São Paulo: Editora Blucher, 1974. Reimpressão: 2009. 293 p.

ESCALANTE – TEN HOOPEN, Maybelline & MAÏGA, Abdou. **Maize production and processing**. Technical publication. Pro-Agro Collection. Cameroun, 2012. 32 p.

EVANS, L.T.; WARDLAW, I.F.; FISHER, R.A. Wheat. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology**. Londres: Cambridge University. Press. pp. 101- 149, 1980.

FAGUNDES, M. C. MORAES, M. O. SCHAFFER, D. & QUEIROZ, T. M. **Calibração de sensores para determinação do teor de água do solo**. Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta, v.9, n.1, p.53-58, 2011.

FORNASIERI Filho, Domingos. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 2007. 576 P.

FREITAS, T. A. S. et al. **Dinâmica De Raízes De Espécies Arbóreas: Visão Da Literatura.** *Revista Ciência Florestal*, Santa Maria, RJ, v.18, No. 1, p. 121-131, jan/març. 2008.

FRENSCH, Jürgen & STEUDLE, Ernst. **Axial and Radial Hydraulic Resistance to Roots of Maize (*Zea mays L.*).** *Plant Physiol.* Vol. 91, 1989: 719-726.

GAIO, D. C. **Análogo elétrico da dinâmica hídrica em plantas vasculares.** 2011. 86 f, Tese (Doutorado em Física Ambiental) Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

GONELI, André Luís Duarte. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis L.*) durante a secagem e o armazenamento.** 2008. 186 p. Tese (Doutorado - Área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GRANEAU, P. & ASSIS, A.K.T. **Kirchhoff on the Motion of Electricity in Conductors.** *Apeiron*, vol. 19, pp. 19-25 (1994).

GREGORY, PETER. **Plant Roots: Growth, activity and interaction with soils.** First published: 2006 . Blackwell Publishing Ltd. 330 p.

GROHMANN, F. **Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do Estado de São Paulo.** *Bragantia: Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do estado de São Paulo, Campinas*, vol. 19, nº 21, p. 319-328, 1960.

HENEINE, Ibrahim Felipe. **Biofísica básica.** Colaboradores José Pereira Daniel, Maria Conceição Santos Nascimento, Luiz Guilherme Dias Heneine. São Paulo: Editora Atheneu, 2006. 391p.

HERNÁNDEZ, José Antonio Serratos. **The origin and diversity of maize in the American continent.** Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Greenpeace México. 2009. 33 p.

HIGUCHI T, SUGA S, TSUCHIYA T, HISADA H, MORISHIMA S, OKADA Y, MAESHIMA M. 1998. **Molecular cloning, water channel activity and tissue**

specific expression of two isoforms of radish vacuolar aquaporin. *Plant and Cell Physiology* 39, 905-903.

HOSE, E., Clarkson, D. T.; Steudle, E.; Schreiber, L. & Hartung, W. 2001. **The exodermis: a variable apoplastic barrier.** *J. Exp. Bot.*, 52: 2245-2264.

JAVOT, H. & MAUREL, C. 2002. **The role of aquaporins in root water uptake.** *Annals of Botany*, 90: 301- 313.

JONES, Heddwyn; LEIGH, Roger A.; JONES, R. Gareth Wyn; e TOMOS, A. Deri. **The integration of whole-root and cellular hydraulic conductivities in cereal roots.** *Plant*, Springer- Verlag (1988) 174: 1-7.

JÚNIOR, Antenor Rodrigues Barbosa; SILVA, Gilberto Queiroz da; NEVES, Betânia Vilas Boas e DEVENS, Julimara Alves. **Métodos diretos de determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em cursos d'água naturais: Parte 1 - Fundamentos teóricos.** REM: R. Escola de Minas, Ouro Preto, 58(1): 27-32, jan. mar. 2005.

KARCHER, Douglas E. & RICHARDSON, Michael D. **Batch Analysis of Digital Images to Evaluate Turfgrass Characteristics.** *Univ. of Arkansas. Crop Science*, Vol. 45: 1536-1539 (2005).

KATO, Yamakake TA. 2005. **Cómo y dónde se originó el maíz.** *Investigación y Ciência*. Agosto 2005: 68- 72.

KERBAUY, Gilberto Barbante. **Fisiologia vegetal.** -2^aed. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012. 431 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal.** São Carlos, São Paulo: RiMa Editora, 1929 - 2009. 531 p. 2004.

MATSUOKA Y. VIGOUROUX, Y. GOODMAN, M.M. SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, J. BUCKLER, E. DOEBLEY, J. 2001. **A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping.** *PNAS*, Volume 99, Number 9; Pages 6080-6084.

MEIDNER, Hans & SHERIFF, David W. **Water and Plants**. Tertiary Level Biology. Halsted Press, a Division of John Wiley and Sons Inc. New York, 1976, 148 p.

NOBEL, Park S. **Physicochemical and Environmental: Plant Physiology**. Department of Ecology and Evolutionary Biology: University of California, Los Angeles. Fourth Edition. Academic Press. Los Angeles, Califórnia. 2009, 582 p.

NOZAKI, Kenma; ISHII, Daishi; & ISHIBASHI, Kenichi. **Intracellular aquaporins: clues for intracellular water transport?** *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, issue 12 (October 2007), DOI: 10.1007/s00424-007-0373-5. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg. p. 1-7.

ÖPIK, Helgi & ROLFE, Stephen A. **The Physiology of Flowering Plants**. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. 2005. 392 p.

OZTAS, Fulya & BOZKURT, Ersin. **Biology teacher candidates' misconceptions about surface tension, adhesion and cohesion**. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 2 (2010) 5700–5705.

PADILHA, Elie Luis Martínez; OLIVEIRA, José Eduardo Santos; & SILVEIRA-NETO, Aristeu. **Simulação numérica da convecção natural entre dois cilindros concêntricos verticais**. 15° POSMEC. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2005, p. 1-9. Disponível em <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/15/pdf/POSMEC008.pdf>. Acessado em 24/09/2013.

PATERNIANI, E.; NASS, E.; SANTOS, M. X. **O valor dos recursos genéticos de milho para o Brasil – uma abordagem histórica da utilização do germoplasma**. In: UDRY, C. V.; DUARTE, W. (Org.) *Uma história brasileira do milho – o valor dos recursos genéticos*. Brasília: Paralelo 15, 2000, p. 11- 42.

PEREIRA, Vinícius Marcio Rodrigues. **Análogo Elétrico da Pressão de Turgescência em células guarda de Vicia faba: Modelo Científico e Conceitual**. 2013. 49 f, Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

PIMENTEL, Carlos. **A relação da planta com a água**. Seropédica, RJ: Edur, 2004. 191 p.

PINTO, P. **Nutrição nas plantas**. ESPAMOL: Técnicas Laboratoriais de Biologia. Nº 20. 10ªA. 2003. 10 p. Disponível em: http://pedropinto.com/files/secondary/tlb/tlbII_trabalho1.pdf, no dia 28/10/2012.

RAVEN, Peter H., EVERT, Ray F. e EICHHORN, Susan E. 1936. **Biologia Vegetal**. Coordenação da tradução Jane Elizabeth Kraus; revisão técnica Jane Elizabeth Kraus, Neuza Maria de Castro; tradução Ana Cláudia de Macêdo Vieira...et al. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 830 p.

REICHARDT, Klaus. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole LTDA, 1990. 188 p.

RUDALL, Paula. **Anatomy of Flowering Plants: Na Introduction to Structure and Development**. Third Edition. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. 2007, 145 p.

RUIZ, H. A., MIRANDA, J., CONCEIÇÃO, J. C. S.. **Contribuição dos Mecanismos de Fluxo de Massa e de Difusão para o Suprimento de K, Ca e Mg a Plantas de Arroz**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 23, núm. 4, pág. 1015-1018. Viçosa, Brasil. 1999. Disponível em: <http://sbcs.solos.ufv.br/solos/revistas/v23n4a29.pdf>, Acessado em 04/04/2013.

SALINAS, Sílvio. R. A. **Introdução à Física Estatística**. 2ª. Edição. 1ª Reimpressão. -São Paulo: EdUSP, 2005. 472 p.

SATTELMACHER, B., 2001. **The apoplast and its significance for plant mineral nutrition**. New Phytologist, 149: 167-192.

SCODILIS, T. et al. **Qucs Work Book**. 2007. Disponível em: <http://qucs.sourceforge.net/docs/spicetoqucs.pdf>, Acessado em 29/10/2012.

SEUVRE, A.M. & MATHOUTHY, M. **Solutions properties and solute-solvent interactions in ternary sugar-salt-water solutions**. A.M. Seuvre, M. Mathlouthi. Journal Elsevier. *Food Chemistry, Volume 122, Issue 2, 15 September 2010, Pages 455-461*.

SILVA, D.J.; ALVAREZ, V.H. & RUIZ, H.A. **Fluxo de massa e difusão de enxofre para raízes de milho em solos ácidos de Minas Gerais**. XXI Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Viçosa/MG. R. Bras. Ci. Solo, 22:109-114, 1998.

SILVA, J.P.P., VERAS, M.M., LEITE, J.Y.P. “**Determinação de ângulos de contato usando aparato didático**”. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa – PB - 2007. Disponível em: <http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20080220_105742_MINE-006.pdf>, acesso em 25 de março de 2013.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático**. Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.1, p.108-114, 2007.

STEUDLE, Ernst. **Water uptake by roots: effects of water deficit**. Journal of Experimental Botany, Vol. 51, Nº 350. WD Special Issue, pp. 1531-1542, September 2000.

STEUDLE, E., 2001. **The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots**. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 52: 847-875.

STEUDLE E, & PETERSON C.A. 1998. **How does water get through roots?** Journal of Experimental Botany 49, 775-788.

STOVER, Daniel B.; DAY, Frank P.; BUTNOR, John R. and DRAKE, Bert G. **Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida Scrub detected by ground-penetrating radar**. Ecology, Vol. 88, nº 5. 2007, pp. 1328–1334.

SUTCLIFFE, J. F. **As plantas e a água**. Tradução de Héstia Ettedo Tenfuss Maciel. São Paulo: EPU: Ed. da Universidade de São Paulo, Volume 23, 1980. 126p.

TAIZ, Lincoln. & ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia Vegetal**. Trad. Eliane Romanato Santarém... [et al.]. – 4ª ED. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

VIEIRA, Elvis Lima; SOUZA, Girlene Santos de; SANTOS, Anacleto Ranulfo dos; SANTOS SILVA, Jain dos. **Manual de Fisiologia Vegetal**. São Luís: EDUFMA, 2010. 230p.

VILLA NOVA, N.A; BACCHI, O.O.S & REICHARDT, K. **POTENCIAL DA ÁGUA NO SISTEMA SOLO - PLANTA ESTIMADO ATRAVÉS DA FASE DE VAPOR.** *Sci. agric.* [online]. 1996, vol.53, n.1, pp. 194-194. ISSN 0103-9016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161996000100029>. Acessado no dia 12/03/2012.

VOET, Donald. VOET, Judith G. PRATT, Charlotte W. **Fundamentos de Bioquímica: a vida em nível molecular.** Tradução Jaqueline Josi Samá Rodrigues...[et al.]. 2ª ed. –Porto alegre: Artmed, 2008. 1264p.

YAMADA S, KATSUHARA M, KELLY WB, MICHALOWSKI CB, BOHNERT HJ. 1995. **A family of transcripts encoding water channel proteins: tissue-specific expression in the common ice plant.** *The Plant Cell* 7, 1129-1142.