

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com
propriedades hidráulicas distintas**

Marlon Gomes da Rocha

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola**

**Piracicaba
2009**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Marlon Gomes da Rocha
Engenheiro Agrônomo

Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com propriedades hidráulicas distintas

Orientador:
Prof. Dr. **QUIRIJN DE JONG VAN LIER**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola**

**Piracicaba
2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Rocha, Marlon Gomes da
Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com propriedades
hidráulicas distintas / Marlon Gomes da Rocha - - Piracicaba, 2009.
55 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.
Bibliografia.

1. Água do solo - Extração - Modelagem 2. Condutividade hidráulica do solo 3. Sistema
radicular I. Título

CDD 631. 432
R672p

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais,
Manoel Gomes Neto e Abelita Virgínia Gomes "*in memoriam*"

Aos meus irmãos,
Iolanda, Moaci, Arlete, Maria das Graças e Marinaldo

Pelo amor, carinho, confiança, amizade, apoio e por acreditarem em mim.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me conceder vida e saúde para conquistar meus objetivos.

Meus sinceros agradecimentos às pessoas e a instituição que tornaram possível a realização deste trabalho:

Aos meus pais, responsáveis pela minha educação, que por muito tempo dedicaram à minha formação, e aos meus irmãos pelo incentivo e por me apoiarem sempre nessa caminhada. Exemplo de dedicação e ética, valores que levarei por toda vida.

Aos cunhados e sobrinhos pelo apoio, amizade e confiança.

À Tatiana minha namorada, companheira e amiga, por seu carinho, amor e incentivo.

Ao Prof. Dr. Quirijn de Jong Van Lier, pela orientação, confiança, apoio e incentivo.

Profissional ético e exemplar, e acima de tudo pela amizade construída.

À Prof^ª. Dra. Luciana Gomes Castro e ao Prof. Dr. Quelmo Novaes que tanto me apoiaram desde a graduação, pelo incentivo, amizade e pelo estímulo à vida acadêmica.

Aos Professores do departamento PPG em Física do Ambiente Agrícola: Prof. Dr. Luiz R. Angelocci, Prof. Dr. Jarbas H. de Miranda, Prof. Dr. Paulo L. Libardi, Prof. Dr. Sérgio O. Moraes, por seus ensinamentos e ao Prof. Dr. Iran J. O. da Silva por emprestar a estufa para conduzir o experimento.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, pela oportunidade de aperfeiçoar e adquirir novos conhecimentos.

À FAPESP pelo suporte através da concessão da bolsa de estudo.

Aos amigos de república, Anthony, Carlindo, Diego e especialmente Leandro que desde o início batalhamos juntos superando as dificuldades, conduzindo experimento e que sem dúvida, contribuiu muito para realização desse trabalho. Valeu galera pela amizade, apoio e boa convivência.

Aos companheiros da PPG em Física do Ambiente Agrícola: Greice, Alexandre, Deise, Anderson, Indriati, Andréia, Fábio e Jones. Da mesma forma, agradeço também ao Jaédson, Alexsandro Brito e João Batista.

Ao Derblai e Angélica pela colaboração na realização das análises e auxílio na elaboração do experimento.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas pela colaboração para realização deste trabalho, especialmente Ângela, Fernando, Chiquinho, Robson e Solange.

Aos funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Rural, Sr. Hélio, Sr. Antônio e Gilmar, que prestaram sua ajuda na montagem do experimento e nas análises de laboratório.

Ao Elenilson pelo companheirismo, amizade e por estar sempre disposto a ajudar, auxiliando na realização desse trabalho. Ao Alessandro pela amizade e companheirismo. Ao Lucas Vellame que nos deu uma grande força, clareando as idéias e a nossa casa refazendo a instalação.

A duas pessoas que nos acolheram aqui em Piracicaba, Dona Eliana e o Sr. Neto, pela amizade e confiança.

E a todos outros amigos que me incentivaram de alguma forma nesta etapa de minha vida.

Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO.....	12
2.1 Revisão bibliográfica.....	12
2.1.1 Transpiração e fotossíntese.....	12
2.1.2 O processo de extração de água do solo.....	13
2.1.3 Extração de água em solo estratificado.....	16
2.1.4 Espécie vegetal utilizada.....	16
2.2 Material e Métodos.....	19
2.2.1 Local e instalação.....	19
2.2.2 O lisímetro.....	20
2.2.3 Condução do experimento.....	21
2.2.3.1 Condições meteorológicas durante o experimento.....	24
2.2.3.2 Coleta de dados.....	26
2.2.3.3 TDR (Refletômetro de domínio de tempo).....	26
2.2.3.4 Tensiômetros.....	26
2.2.3.5 Calibração do TDR.....	28
2.2.4 Caracterização hidráulica dos solos.....	28
2.2.4.1 Curva de retenção da água no solo.....	28
2.2.4.2 Condutividade hidráulica.....	29
2.2.4.3 Potencial de fluxo matricial.....	30
2.2.5 Planta.....	31
2.2.5.1 Densidade radicular.....	31
2.2.5.2 Extração radicular entre compartimentos.....	32
2.2.6 Análise estatística.....	33
2.3 Resultados e Discussão.....	34

2.3.1 Sistema radicular.....	34
2.3.2 Calibração do TDR.....	34
2.3.3 Curva de retenção	35
2.3.4 Condutividade hidráulica.....	37
2.3.5 Observações experimentais nos lisímetros.....	39
2.3.6 Avaliação do modelo.....	45
3 CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS	51

RESUMO

Partição da extração da água do solo por plantas entre camadas com propriedades hidráulicas distintas

A facilidade com que uma raiz pode extrair água do solo é determinada pela condutividade hidráulica do solo e gradiente do potencial energético da água, ambos função do teor de água no solo. Nessa dissertação descreve-se o teste experimental de um modelo de extração e de partição da água do solo pelo sistema radicular de uma planta cujo sistema radicular se divide entre camadas de solo com propriedades hidráulicas contrastantes. O estudo foi conduzido em ambiente protegido com plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivadas em lisímetros com dois compartimentos separados fisicamente (“split-pot”). Quatro desses lisímetros foram construídos, preenchidos com material de dois tipos de solo de diferentes classes texturais (um solo de textura média - AR e outro de textura argilosa - AG). Durante um mês e meio foi aplicado um regime hídrico alternando a irrigação entre os compartimentos. O teor de água nos compartimentos dos lisímetros foi monitorado com TDR e tensiômetros. O material dos dois solos foi analisado conforme metodologia padrão quanto às suas propriedades de retenção e condução da água. A densidade radicular foi determinada por pesagem no fim do experimento, tendo ficado em torno de duas vezes maior no solo AR do que no AG. Foi possível observar que a extração de água ocorreu preferencialmente do compartimento do lisímetro com maior potencial de fluxo matricial. Em certas ocasiões houve transferência de água do lado de maior ao lado de menor potencial de fluxo matricial, com a liberação da água ao solo pelo sistema radicular (“hydraulic lift”). Em relação ao modelo, para compensar pelo efeito da heterogeneidade da distribuição radicular, da atividade radicular e do contato solo-raiz, incluiu-se um fator empírico f de correção no modelo. O valor de f foi determinado por ajuste numérico procurando-se uma correlação máxima entre modelo e observação nos quatro lisímetros. Para os solos AR e AG, os valores de f assim determinados foram 0,01506 e 0,003713, respectivamente. O modelo testado descreveu razoavelmente bem as observações com a utilização desses valores de f .

Palavras-chave: Modelagem; Deficiência hídrica; Densidade radicular; Solo estratificado; Potencial de fluxo matricial

ABSTRACT

Partition of root water extraction between soil layers with distinct hydraulic properties

Root water extraction is determined by soil hydraulic conductivity and water potential gradients, both dependent on soil water content. In this dissertation the experimental test of a root water extraction and partition model is described for a plant whose root system is divided over soil layers with distinct hydraulic properties. An experiment was conducted in a greenhouse with Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) plants growing in split-pot lysimeters containing two physically divided compartments. Four of these lysimeters were built, filled with material from two soils with different texture (a médium textured soil - AR and a clayey soil - AG). During a month and a half a water regime was applied alternating the irrigation among the compartments. The soil water content in the compartments was measured with TDR and tensiometer equipment. Soil hydraulic properties – retention and conductivity – were analyzed by standard methods. Root density was determined by weighing at the end of the experiment, resulting in values twice as high in soil AR compared to soil AG. It could be observed that water extraction occurred preferentially from the lysimeter compartments with the highest matric flux potential. At certain occasions, water transfer from the compartment with higher matric flux potential to the lower one was observed, transferring water from root to soil (“hydraulic lift”). Referring to the model, in order to compensate for root distribution heterogeneity, root activity and soil-root contact, an empirical factor f was added to the model. Its value was determined by a numerical fitting procedure aiming the highest correlation between model and observation in the four lysimeters. For soils AR and AG, the values of f determined were 0.01506 and 0.003713, respectively. The tested model described the observations reasonably well using these values of f .

Keywords: Modelling; Water deficit; Root density; Layered soil; Matric flux potential

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água afeta a produção agrícola mundial devido à intensidade e irregularidade pluviométrica. O planejamento das práticas de uso e manejo do solo e da água é de grande importância para otimizar a utilização de recursos hídricos aliado a uma produtividade alta das culturas.

As condições hídricas do solo são determinantes para o rendimento das culturas. A frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores mais importantes à limitação da produção agrícola mundial e, juntamente com a temperatura, a disponibilidade hídrica é um fator responsável pela distribuição das espécies na Terra.

A necessidade de absorção da água do solo pelas raízes de plantas é imposta pela transpiração da parte aérea. Há um fluxo contínuo de água do solo à atmosfera ao longo de um gradiente de potencial hídrico determinada pela diferença de potencial entre a água no solo e a água na atmosfera em forma de vapor. A defasagem que pode ocorrer entre a transpiração e a absorção é causada pelas resistências hidráulicas ao longo do caminho entre o solo e a atmosfera, sendo as principais aquelas que ocorrem na interface solo-raiz e folha-atmosfera. Devido à necessidade de selecionar as substâncias que penetram na planta, as raízes oferecem resistência muito maior à passagem de água do que a apresentada pelas folhas na evaporação.

A facilidade com que uma raiz pode extrair água do solo é determinada pela condutividade hidráulica do solo e gradiente do potencial energético da água, ambos função do teor de água no solo. A abertura e fechamento dos estômatos é o principal mecanismo para regulação de transpiração pela planta, aumentando ou diminuindo a resistência hidráulica folha-atmosfera. Quando o fluxo de água às raízes torna-se incapaz de suprir as taxas potenciais de transpiração, ocorre o início do fechamento dos estômatos. Quando as plantas entram em desequilíbrio hídrico, ou seja, perdem mais água que absorvem, a abertura estomática decresce aumentando a resistência à difusão de água da folha, até chegar à resistência estomática máxima.

O fechamento estomático devido ao baixo teor de água no solo também promove a redução na assimilação de CO₂ e inibição do processo fotossintético, tanto no que se refere ao transporte de elétrons como nos eventos bioquímicos e na atividade enzimática, influenciando o desenvolvimento e a produção final.

Pela sua atuação na produtividade agrícola, uma atenção considerável é dada ao estudo do estresse hídrico vegetal, na busca por sistemas de manejo agrícola que otimizam a

utilização de recursos hídricos, como o manejo adequado do sistema radicular e da estrutura do solo apoiado ou não por sistemas de irrigação. Vários modelos já foram desenvolvidos com a finalidade de descrever o mecanismo de extração da água do solo pelas raízes das plantas. Entre eles distinguem-se os modelos microscópicos que simulam a extração por uma raiz singular e os modelos macroscópicos que consideram o sistema radicular como um todo, sendo uma unidade estratificada extratora de água.

Conhecer a distribuição espacial de extração de água do solo pelo sistema radicular torna-se necessário para a estimativa mais correta do balanço hídrico. É de se supor que a planta compensa a falta de água em camadas mais secas pela absorção mais intensa em camadas de solo com maior teor de água, suprimindo a demanda da planta.

O objetivo do presente trabalho foi testar um modelo de extração radicular para as condições de uma planta cujo sistema radicular se divide entre camadas de solo com propriedades hidráulicas contrastantes e em condições diversas de teor de água.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Transpiração e fotossíntese

O sistema radicular das culturas é o elo de ligação entre solo e planta. O conhecimento da sua distribuição no solo permite o uso mais adequado de práticas de cultivo, tais como manejo e fertilização do solo, além de se constituir em requisito para elaboração de projetos e execução do manejo de irrigação (COELHO et al., 2001).

O estado da água nos diversos órgãos das plantas é uma propriedade dinâmica afetada pelo balanço entre a perda do vapor d'água pelas folhas para a atmosfera e a absorção de água pelas raízes. As taxas de transpiração, de fotossíntese e de crescimento são afetadas pelas alterações no estado hídrico das plantas. Um dos meios para caracterizar o estado hídrico nas plantas é a avaliação do potencial da água no solo e na planta (ANGELOCCI, 2002). À medida que o solo seca sob demanda evaporativa da atmosfera aumenta a dificuldade da planta acessar a água ainda presente. Quando a transpiração não pode mais ser atendida pelo suprimento de água das raízes, ou seja, a taxa de transpiração não é compensada pela absorção durante certo período de tempo, ocorre o estresse hídrico: a planta diminui a troca gasosa com a atmosfera pelo fechamento de estômatos ou outros mecanismos, como o de enrolar suas folhas. Gomide et al. (2005) caracterizaram o estresse hídrico em duas linhagens de milho através da variação do fluxo de seiva e da redução da área foliar total. Uma redução de área foliar das plantas, além de causar diminuição do fluxo de seiva, acarreta redução na taxa de assimilação de CO₂ ou fotossíntese.

Existem grandes diferenças entre espécies com relação ao potencial da água na folha para o qual ocorre fechamento estomático. Valores do potencial da água em torno de - 1,0 a -2,0 MPa são citados como limitantes à respiração, a translocação de produtos de assimilação metabólica e a assimilação de CO₂ (SALISBURY; ROSS, 1994; NOGUEIRA et al., 1998). Para o limite inferior de disponibilidade hídrica utiliza-se frequentemente o potencial matricial de - 1,5 MPa.

Oliveira et al. (2002) estudaram o efeito da deficiência hídrica sobre a condutância estomática e taxas de transpiração em pupunheira. Mostraram que a deficiência hídrica é acompanhada pela queda do potencial da água na folha. A transpiração e a condutância estomática foram reduzidas antes de decréscimos acentuados das taxas de assimilação. Evidencia-se, dessa forma, uma estratégia de economia de água durante o período crítico, com

o fechamento gradual dos estômatos e a manutenção de menores taxas de transpiração, em detrimento da absorção de CO₂

O déficit de água nos tecidos, causado pela excessiva demanda evaporativa ou pelo limitado suprimento de água no solo, afeta todos os aspectos do crescimento e desenvolvimento dos vegetais (KRIEG, 1993). Muitas espécies vegetais encontradas em ambientes mais áridas são caracterizadas pela tolerância ao estresse hídrico que usualmente envolve o desenvolvimento de baixos potenciais osmóticos (SOUZA, 2000). Para Vieira Junior et al. (2007), quando o ambiente apresentar déficit hídrico, as plantas podem utilizar mecanismos de tolerância como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados. Os estômatos permitem a regulação da resistência ao fluxo de gases, podendo reduzir o fluxo de água para a atmosfera sob condições de deficiência hídrica, e durante esse período a condutividade estomatal é ajustada para manter em equilíbrio o balanço de água na planta.

Além de reduzir a entrada de CO₂, o fechamento estomatal tem outros efeitos adversos: reduz o fluxo de água com nutrientes através da planta, e aumenta a temperatura do dossel. A temperatura foliar tem relação direta com a transpiração e o potencial hídrico da planta, sendo esses influenciados pela quantidade de água no solo. De acordo com Vieira Junior et al. (2007), as plantas de milho e sorgo têm comportamentos semelhantes quanto ao potencial hídrico nas folhas quando submetidas a estresse hídrico para relacionar o potencial hídrico das folhas com as temperaturas foliar e ambiente. O aumento da temperatura de um dossel vegetativo é causado pela redução da transpiração. Na cultura do feijão, Nóbrega et al. (2004) verificaram maiores temperaturas do dossel em plantas com restrições de água, o que indica estresse hídrico, e à medida que aumentou o grau de estresse houve um decréscimo na produtividade da cultura.

2.1.2 O processo de extração de água do solo

Diversos fatores ligados ao solo, à planta e ao próprio clima atuam modificando os hábitos radiculares. Porto (1993) procurou unir a maioria desses conhecimentos demonstrando que a quantidade de água do solo utilizada pelas plantas depende de quatro fatores: (i) da demanda evaporativa da atmosfera; (ii) da habilidade da planta em regular o fluxo de água através do sistema radicular até a parte aérea; (iii) da exploração das reservas de água do subsolo pelo sistema radicular e (iv) da condutividade hidráulica do solo. O conceito de água disponível à planta é também relatado por Gardner (1960), segundo o qual diz respeito à

interação entre três fatores principais: (i) o tipo de planta, incluindo as condições físicas da planta, estágio de maturidade, distribuição das raízes, entre outras características; (ii) o gradiente do potencial hidráulico existente na interface raiz-água no solo; e também (iii) a condutividade hidráulica no solo.

A taxa de movimento de água em direção as raízes é dependente do gradiente de potencial da água entre o solo e a superfície radicular, bem como da condutividade hidráulica nesse caminho, visto que durante o transporte de água há uma interação entre o solo, a planta e a atmosfera que atuam como um sistema contínuo. A absorção é função não somente das condições físico-hídricas do solo, mas também de fatores ligados ao sistema radicular, à parte aérea da planta e à própria demanda atmosférica (ANGELOCCI, 2002).

A modelagem de extração da água do solo pelas raízes é uma ferramenta importante na estimativa da transpiração. A utilização dos avanços na modelagem microscópica no desenvolvimento dos modelos macroscópicos é muito pequena, devido à dificuldade de se juntar a descrição microscópica com informações sobre a geometria do sistema radicular, considerando este como uma unidade estratificada extratora de água. Atualmente um dos assuntos de especial interesse é a transformação do conhecimento na escala da raiz singular à escala do sistema radicular (DARRAH et al., 2006).

Para simular a extração de água por uma raiz singular, soluções analíticas sob condições específicas foram apresentadas por Gardner (1960) e Cowan (1965). Uma alternativa menos restrita são os modelos numéricos, onde um problema de fluxo é descrito por um sistema de equações. Um modelo desse tipo foi desenvolvido por Jong van Lier, Metselaar e Van Dam, (2006) para simular a extração da água por uma raiz singular.

Um modelo quantitativo do movimento da água na proximidade de uma raiz foi desenvolvido por Jong van Lier e Libardi (1997) baseado na equação de Darcy-Buckingham para calcular o potencial matricial da água do solo em função de parâmetros relacionados à cultura, o solo e condições atmosféricas. O modelo parte do pressuposto de que a quantidade de água transpirada por uma planta em um determinado período de tempo é substituída por um volume igual a entrar no sistema radicular durante o mesmo tempo.

O formato da curva que descreve a transpiração relativa em função do teor de água do solo durante a fase de taxa decrescente, a chamada função de redução, foi objeto de vários estudos. A medição experimental da transpiração é complicada, no entanto funções empíricas lineares com a média espacial do potencial matricial h (FEDDES et al., 1988) ou do teor de água θ (DOORENBOS; KASSAM, 1986) foram propostas, bem como soluções analíticas (METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007).

A maior parte dos modelos se utiliza de alto nível de simplificação quanto às condições hídricas do solo. Geralmente, considera-se a extração radicular igual às taxas de transpiração potencial, a não ser que o solo esteja mais seco que algum valor crítico de teor de água (θ_{crit}) ou de potencial matricial (h_{crit}). Abaixo desse valor a extração da água se torna reduzida e a planta fecha seus estômatos. O teor de água crítico é geralmente estimado empiricamente em função da sensibilidade à deficiência hídrica da cultura e da demanda atmosférica (DOORENBOS; KASSAM, 1986; KROES; VAN DAM, 2003).

Assim, o potencial matricial crítico (h_{crit}) representa o valor limítrofe em que o fluxo de água do solo à raiz ainda é igual ao fluxo potencial, mas imediatamente abaixo desse ponto os estômatos passam a apresentar resistência aumentada ao fluxo de vapor de água no sistema planta-atmosfera. Quando o potencial matricial corresponder ao ponto de murcha permanente (h_{pmp}) representará o valor limítrofe das condições hídricas em que o fluxo de água às raízes é incapaz de suprir até mesmo as taxas muito pequenas de transpiração, ocorrendo o total fechamento dos estômatos (CASAROLI, 2008).

De acordo com Ludlow e Muchow (1990) a redução no conteúdo de água no solo causa significativa variação na distribuição e desenvolvimento radicular, podendo mudar o período de disponibilidade e a quantidade de água disponível para as plantas. Desta forma, a extração de água é influenciada pela distribuição geométrica das raízes viáveis e da disponibilidade de água no solo, e nem toda a água que o solo armazena é disponível às plantas (CARLESSO, 1995).

Santos, Coelho e Azevedo (2005) trabalhando com absorção de água por raízes do limoeiro concluíram que quanto maior a distância do microaspesor, menor a atividade do sistema radicular, e essa redução se deve à diminuição de água disponível no perfil do solo, pois a planta extrai mais água do solo quando não há restrição de disponibilidade hídrica. Da mesma forma Silva et al. (2006) demonstraram que houve posições de extração características, que coincidiram com as regiões de maior teor de água dentro do volume molhado. Informações dessa natureza são úteis ao manejo das culturas e da irrigação juntamente com o conhecimento da distribuição de extração radicular.

A relação entre a água disponível e a água extraível do solo é analisada a partir de dados da taxa de transpiração e a fração de água extraível, a profundidade efetiva de extração do sistema radicular, e a extração de água por unidade de profundidade (CARLESSO, 1995). De acordo com o mesmo autor, se a densidade radicular em uma parte do perfil suprir à necessidade de água da cultura, quando essa for baixa, a taxa de extração é somente uma

pequena parcela da demanda e o dossel pode compensar a baixa extração através da redução da área foliar ou da condutividade estomatal.

Nas áreas de maior atividade radicular estão as mais altas oscilações no potencial matricial, pois essas posições registram as maiores variações de teor de água do perfil, em função do tempo, de onde a água é extraída para suprir a evapotranspiração da cultura (SANTOS; COELHO; AZEVEDO, 2005).

2.1.3 Extração de água em solo estratificado

Modelos macroscópicos podem descrever a absorção de água por raízes, a distribuição do potencial de transpiração pela zona radicular e a tensão da água no perfil do solo. Alguns desses modelos como o de Li, De Jong e Boisvert, (2001) e Li et al., (2006) incorporam um mecanismo empírico para descrever a compensação de extração, isto é, as raízes extraem mais água das camadas úmidas na coexistência de camadas secas.

Baseando-se num modelo microscópico desenvolvido, Jong van Lier et al. (2008) propuseram um protocolo de cálculo incorporado no modelo hidrológico SWAP (KROES; VAN DAM, 2003), para modelar a extração radicular em função da profundidade e sua compensação, levando em consideração as características hidráulicas das camadas, sua densidade radicular e seu teor de água. O modelo mostrou-se promissor quanto à sua capacidade de estimar o balanço hídrico eliminando a necessidade de alguns parâmetros empíricos aos normalmente empregados.

Para testar a partição de extração de água por uma planta deve-se empregar uma forma experimental impondo condições contrastantes. Isso pode ser feito por experimentos em lisímetro dividido (em inglês: “split-pot”), onde uma planta cresce num recipiente especial com seu sistema radicular dividido em duas ou mais partes, separadas fisicamente e monitoradas como empregado, por exemplo, em Kosola e Eissenstat (1994), Hussain et al. (1999) e Espeleta; Eissenstat e Graham (2004).

2.1.4 Espécie vegetal utilizada

Para condução no experimento foi utilizado o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) do cultivar Catissorgo LS 6-8. Além de sua importância econômica, o sorgo possui um sistema radicular eficiente e que facilita o manejo no transplante para os lisímetros. A cultura do sorgo apresenta grande potencial de produção em regiões com precipitação irregular devido sua capacidade de adaptação, tolerância a temperaturas elevadas e também por possuir

características de xerofilia (REIS, 1992). Além disso, o sorgo forrageiro apresenta expectativa de crescimento em que poderá constituir alternativa, por exemplo, para o semi-árido nordestino, devido a sua característica xerófila e por recuperar-se após estresse, assegurando a produção sob condições adversas (SCAPIM et al., 1998).

A ocorrência de déficit hídrico em plantas cultivadas afeta o crescimento e o desenvolvimento das culturas em todo o mundo. O sorgo caracteriza-se por responder relativamente bem a pequenas quantidades de água, aplicadas nas épocas críticas, influenciando diretamente a produção de grãos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 1989).

A sensibilidade de adaptação das plantas ao déficit hídrico depende do estágio de desenvolvimento da planta. Segundo Kramer (1995) o efeito do déficit hídrico sobre a maioria das culturas varia de acordo com sua duração, intensidade e período de ocorrência no ciclo da cultura. O sorgo requer menos água para se desenvolver, quando comparado com outros cereais, sendo que o período mais crítico à falta de água é o reprodutivo, especialmente a fase de florescimento correspondente ao estágio EC3, que engloba a polinização, fertilização, desenvolvimento e maturação do grão (MAGALHÃES; DURÃES, 2003). No entanto, dentro de uma mesma espécie, diferentes materiais podem apresentar tolerância e período diferenciados ao estresse causado pela deficiência hídrica. Ferreira, Albuquerque e Cruz (1992) verificaram que o déficit hídrico aplicado após a antese não induziram variações significativas na área foliar, na massa seca total da parte aérea, no comprimento médio de panículas e na massa de grãos. Amaral et al. (2003) observaram altas taxas de sobrevivência em linhagens de sorgo, demonstrando resistência ao estresse hídrico na fase inicial de crescimento, no entanto até a fase final do experimento houve linhagens mais resistentes ao estresse que outras.

A grande resistência do sorgo às condições de estresse hídrico é em parte devido ao controle mais efetivo da transpiração em relação a outras plantas cultivadas. Um dos sintomas de deficiência mais característico apresentado pelas plantas é a murcha, que, dependendo da severidade do estresse, pode ser reversível ou não (AMARAL et al., 2003). Mas, de acordo com Masojidek et al. (1991) o sorgo possui características fisiológicas que permitem paralisar o crescimento ou diminuir as atividades metabólicas durante o estresse hídrico e reiniciar o crescimento quando a água se torna disponível.

O desenvolvimento das plantas sob tensão de água envolve mecanismos complexos de resistência à seca que podem ser de três tipos: "evitar", "tolerar" e "escapar" (LEVITT, 1972). O primeiro ocorre quando a planta mantém um potencial de água relativamente elevado

mesmo em presença de ambientes secos, através de mecanismos diversos como o fechamento dos estômatos; o segundo acontece quando as funções das plantas são mantidas em equilíbrio durante um déficit hídrico interno elevado, com baixos potenciais de água; e o terceiro ocorre quando a planta completa seu ciclo antes do advento da seca. O sorgo parece apresentar duas características relacionadas à seca: escape e tolerância. O escape através de um sistema radicular profundo e ramificado o qual é eficiente na extração de água do solo; já a tolerância está relacionada ao nível bioquímico, onde a planta diminui o metabolismo, murcha reduzindo a área efetiva da folha e a transpiração, tendo um poder extraordinário de recuperação quando o estresse é interrompido (EMBRAPA, 2008).

Nas gramíneas, o enrolamento das folhas está incluído como uma das mais importantes respostas da planta à redução da água no solo, pois indica a ocorrência de déficit hídrico (CARLESSO, 1993). Segundo Jordan (1983) o enrolamento causa redução na área foliar efetiva da folha e, conseqüentemente, na área foliar fotossinteticamente ativa da planta, redução da desidratação e do consumo de água em períodos de elevada demanda evaporativa.

Estudos têm demonstrado que a taxa de expansão da área foliar do dossel vegetativo é reduzida em muitas culturas por déficits hídricos quando a fração de água disponível (FAD) for de aproximadamente 0,50 na profundidade do perfil do solo explorado pelo sistema radicular das plantas (RITCHIE, 1981; ROSENTHAL; ARKIN; SHOUSE, 1987). De acordo com Carlesso (1993) e Rosenthal, Arkin e Shouse (1987), valores de aproximadamente 0,30 da FAD são considerados como limite crítico onde a expansão das folhas é mínima e a senescência é acelerada, com aumento na resistência estomática, redução no processo transpiratório e na atividade fotossintética, além de redução na acumulação de matéria seca e na produção de grãos.

Para comparar o efeito do esforço desigual do estresse na zona radicular em relação à água da planta em sorgo e girassol com as raízes divididas entre dois potenciômetros contendo solução nutriente e glicol de polietileno respectivamente, Zhang e Kirkham (1995) concluíram que o girassol teve um potencial mais baixo da água da folha e produziu mais etileno do que o sorgo. Aparentemente porque os estômatos do sorgo eram mais fechados no teste de esforço parcial do que aqueles do girassol, o sorgo conservou a água e teve um potencial mais elevado da água da folha, que pudesse ter permitido o crescimento com esforço.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Local e instalação

Um experimento de lisímetro dividido com plantas de sorgo foi instalado em uma casa de vegetação localizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/ USP) em Piracicaba – SP, coordenadas geográficas 22° 42’ de latitude sul, 47° 37’ de longitude oeste a uma altitude de 546 m acima do nível do mar. O período de experimentação foi de março a junho de 2008. Dois tipos de solo de diferentes classes texturais foram utilizados no experimento, sendo o material coletado de ambos os solos previamente seco e peneirado. Um solo foi um Argissolo vermelho–amarelo distrófico típico de textura média (indicado nessa dissertação como AR), o outro um Nitossolo vermelho eutroférico típico de textura argilosa (indicado nessa dissertação como AG) conforme a classificação da EMBRAPA (1999), ambos coletados no campus “Luiz de Queiroz” da USP em Piracicaba. As características granulométricas e químicas referentes aos solos estão nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Granulometria dos solos utilizados no experimento (teores em kg kg⁻¹)

	SOLO	
	AR	AG
AREIA		
Grossa	0,02	-
Média	0,22	-
Fina	0,40	-
Muito Fina	0,12	-
Total	0,76	0,39
SILTE	0,04	0,08
ARGILA	0,20	0,53

Tabela 2 – Resultado da análise química dos solos utilizados no experimento

	SOLO	
	AR	AG
Matéria orgânica (g dm ⁻³)	22	28
pH (SMP)	5,0	5,2
Saturação por bases (V%)	53	65
Alumínio (mmol _c dm ⁻³)	0	0
Macronutrientes		
Fósforo (mg dm ⁻³)	5	30
Enxofre (mg dm ⁻³)	9	11
Potássio (mmol _c dm ⁻³)	0,9	8,9
Cálcio (mmol _c dm ⁻³)	16	35
Magnésio (mmol _c dm ⁻³)	8	13
Micronutrientes		
Cobre (mg dm ⁻³)	0,7	4,1
Zinco (mg dm ⁻³)	2,2	3,7
Manganês (mg dm ⁻³)	13,5	66,7
Boro (mg dm ⁻³)	0,7	0,25
Ferro (mg dm ⁻³)	30,0	17,0

2.2.2 O lisímetro

Quatro lisímetros de metal com dimensões internas de 0,5 x 0,3 x 0,4 m foram confeccionados. Os lisímetros possuíam livre drenagem, e foram divididos longitudinalmente em dois compartimentos (Figura 1). Cada compartimento foi equipado com instrumentos de medição (tensiômetro e TDR), conforme descrito mais adiante.

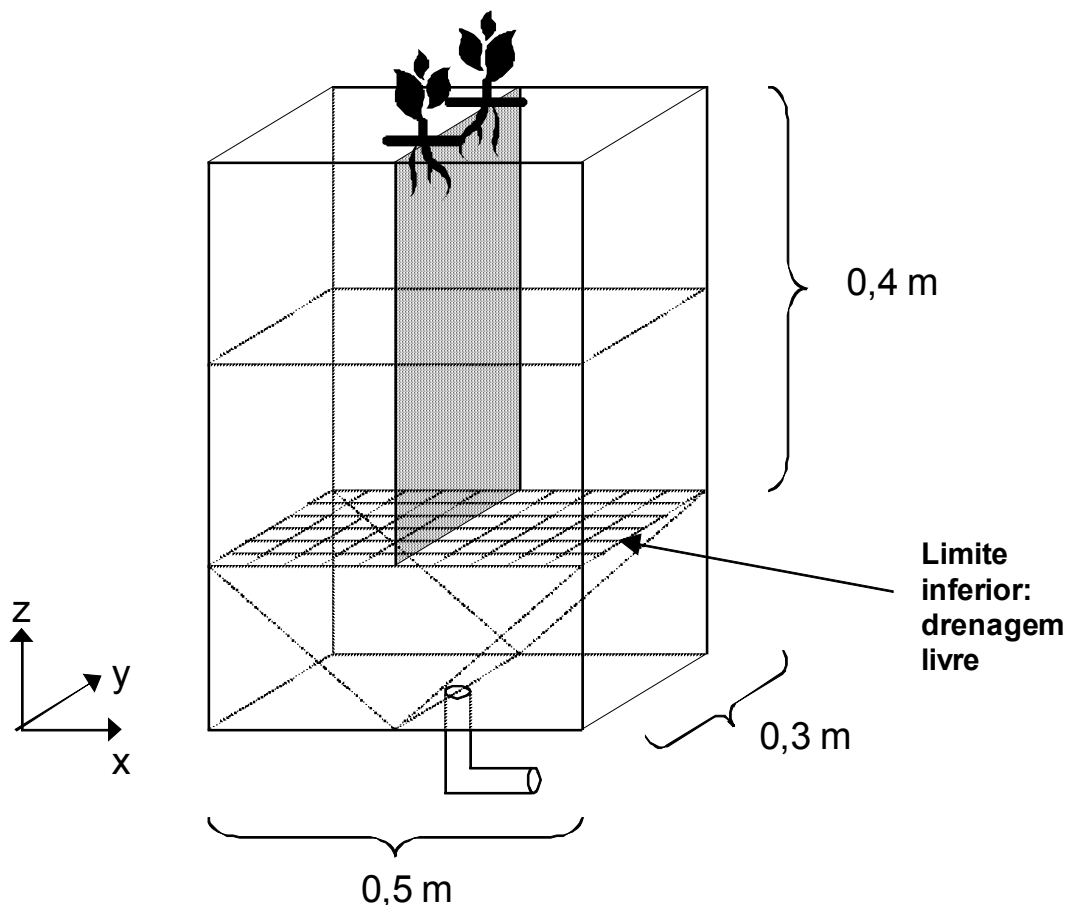


Figura 1 – Desenho esquemático do lisímetro utilizado no experimento, mostrando dimensões e divisão interna

O lisímetro dividido permite experimentar com o sistema radicular e o balanço hídrico em cada compartimento como se fossem diferentes camadas, sem a possibilidade de fluxo entre os compartimentos. A ocorrência de fluxo dificultaria a análise dos dados.

O preenchimento dos lisímetros com terra foi feito de forma mais homogênea possível objetivando-se estabelecer as densidades de 1400 kg m^{-3} e 1200 kg m^{-3} para os solos AR e AG, respectivamente. A mesma densidade foi utilizada posteriormente na determinação das propriedades hidráulicas dos solos. TDR e tensiômetros foram inseridos em ambas os compartimentos dos lisímetros nas profundidades de 5-10 cm, 15-20 cm e de 25-30 cm abaixo da superfície do solo no lisímetro, o qual foi umedecido e deixado por uma semana para assentamento do material.

2.2.3 Condução do experimento

Sementes de sorgo provenientes do laboratório de Sementes do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP foram semeadas em vasos. Vinte dias após a germinação,

duas das plantas foram transplantadas para cada lisímetro, com o caule em cima da divisão interna, e o sistema radicular dividido entre ambos os compartimentos como mostra Figura 2.



Figura 2 – Posição da planta e divisão do sistema radicular nos compartimentos do lisímetro (esquerda) no momento do transplante e (direita) algumas semanas depois

Os solos dos lisímetros foram adubados seguindo as normas de interpretação do Boletim Técnico 100 (RAIJ et al., 1997), para cultura do sorgo baseado nos dados da análise química (Tabela 2). As quantidades aplicadas estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Adubação aplicada aos solos AG e AR

Solo	Uréia (46% de N)	Super Simples	KCl	Calcário
	g m^{-3}			
AG	0,77	7,77	3,88	-
AR	0,77	11,80	2,45	1,3

A superfície do solo foi coberta com uma folha de plástico, minimizando assim a perda de água por evaporação. Acima do plástico foi colocada uma camada de areia grossa de aproximadamente dois centímetros de espessura para evitar a incidência direta da radiação solar e aumento excessivo da temperatura na superfície do solo no lisímetro.

As plantas foram irrigadas manualmente, mantendo o teor de água ideal para seu desenvolvimento com um potencial matricial em torno de -2 m , até atingirem o período reprodutivo. A partir desse momento, em 8 de maio de 2008, o fornecimento de água foi interrompido em um dos compartimentos dos lisímetros para aplicar o tratamento de deficiência hídrica e monitorar a extração radicular. Primeiramente interrompeu-se a irrigação

no compartimento com solo AG, enquanto o outro lado que continha o solo AR continuou recebendo água normalmente sempre quando a coluna de mercúrio alcançava 31 cm, correspondente a um potencial matricial de -2 m. Quando o compartimento com solo AG atingiu um teor de água muito baixo (em 26 de maio de 2008), interrompeu-se o fornecimento de água também do compartimento com solo AR até que o estresse hídrico nas plantas pôde ser verificado por murchamento. Quando os sintomas de estresse se tornaram severos (em 6 de junho de 2008), regou-se o compartimento contendo o solo AG, com uma aplicação maior no dia 06/06 e outra menor no dia 07/06. A partir dessa data, água foi aplicada seguindo o mesmo critério do tensiômetro descrito acima, até 12/06. A seguir, os compartimentos foram mantidos sem a aplicação de água até completar a maturação fisiológica dos grãos, em 23 de junho de 2008.

As épocas de irrigação correspondente a cada tipo de solo nos compartimentos e as respectivas lâminas de água aplicadas nos quatro lisímetros estão representadas na Figura 3. Reconhecem-se as seguintes fases no período experimental:

1. (12-23/05) Irrigação apenas do solo AR.
2. (23/05-06/06) Sem irrigação.
3. (06/06-13/06) Irrigação apenas do solo AG.
4. (13/06-22/06) Sem irrigação.

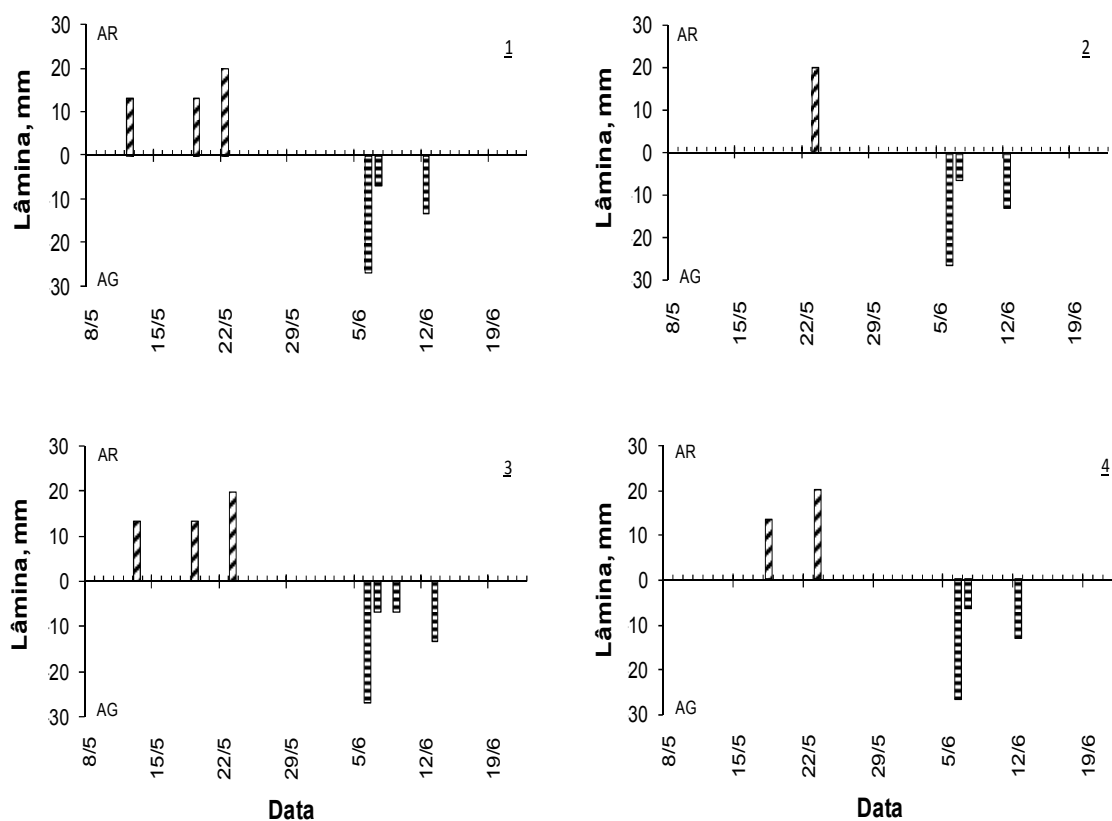


Figura 3 – Lâminas de água aplicadas para cada compartimento dos lisímetros 1, 2, 3 e 4 ao longo do período experimental

2.2.3.1 Condições meteorológicas durante o experimento

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (UR, %) e insolação (h/d) respectivamente, obtidos no posto meteorológico da ESALQ/USP ao longo do experimento, que durou de 8 de maio a 23 de junho de 2008. A variação da temperatura diária do ar é mostrada na Figura 4, atingindo um máximo de $29,1^{\circ}\text{C}$ no dia 28 de maio, enquanto seu valor mínimo ($4,7^{\circ}\text{C}$) ocorreu no dia 17 de junho. Variações estas que podem influenciar na abertura estomática, nas taxas de transpiração potencial das plantas e consequentemente na absorção de água.

É importante observar que as condições no interior da casa-de-vegetação devem ter sido divergentes das observadas no posto meteorológico, com temperaturas e umidade relativas mais altas.

Observa-se uma anormalidade principalmente em torno do dia 30/05 (T_{Max} mais baixa, UR mais alta, insolação muito menor), associada a um período chuvoso.

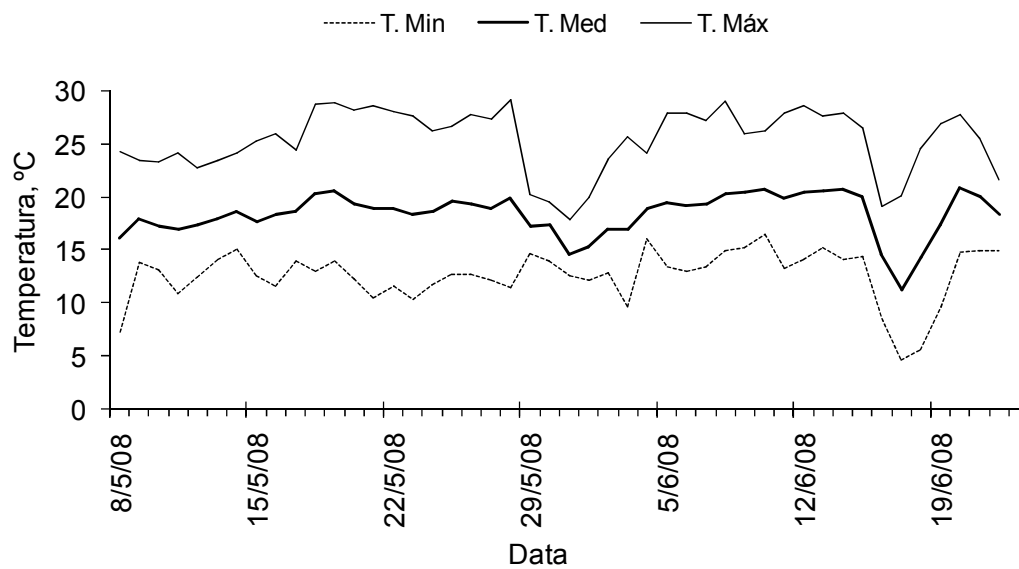


Figura 4 – Temperaturas mínima (T. Min.), média (T. Med.) e máxima (T. Máx.) diárias durante o período experimental (Estação Meteorológica, ESALQ/USP, Piracicaba – SP.)

A umidade relativa diária ao longo desse período variou entre 31% e 100%, ocorrendo precipitação entre os dias 29 e 31 de maio e dias 3 e 15 de junho, podendo ter provocado diminuição na extração de água do solo devido à baixa demanda atmosférica.

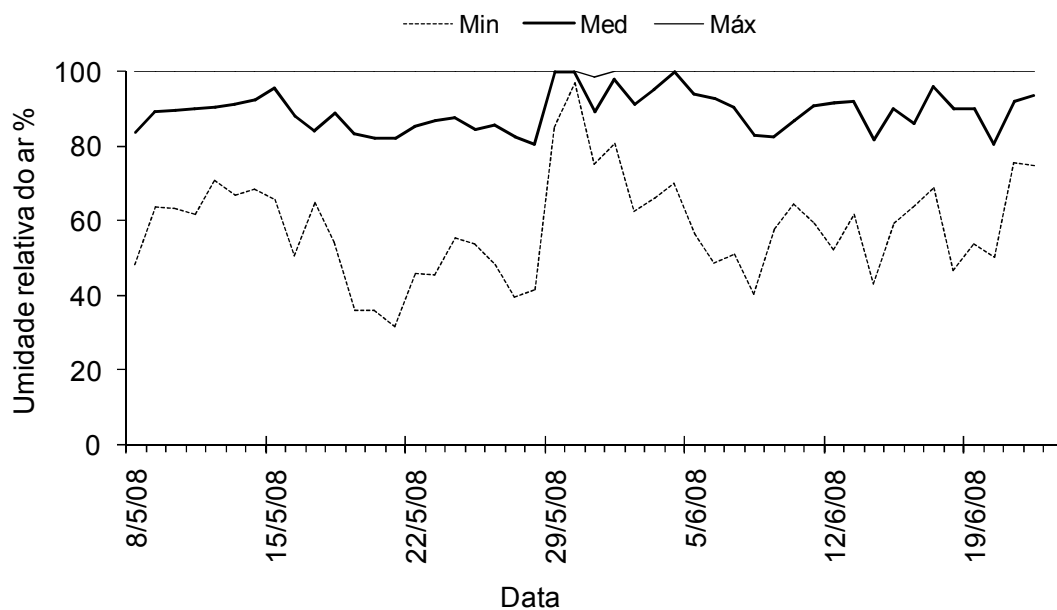


Figura 5 – Umidade relativa do ar mínima (Min.), média (Med.) e máxima (Máx.) diárias durante o período experimental (Estação Meteorológica, ESALQ/USP, Piracicaba – SP.)

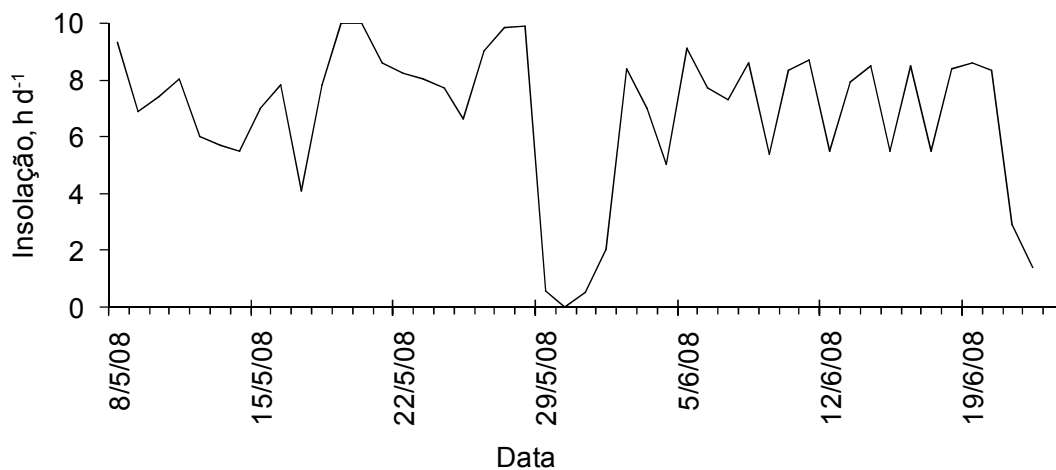


Figura 6 – Insolação diária durante o período experimental (Estação Meteorológica, ESALQ/USP, Piracicaba - SP)

2.2.3.2 Coleta de dados

No período experimental foram coletados dois conjuntos de dados caracterizando o estado hídrico do solo: leituras de TDR para a determinação do teor de água, armazenagem e a sua variação e leituras de tensiômetro para servir de base na tomada de decisão sobre as irrigações. As leituras foram tomadas simultaneamente de forma a representarem a condição do solo no mesmo instante em cada compartimento. As leituras foram feitas numa frequência de três vezes ao dia, às 8, 13 e 18 horas aproximadamente.

2.2.3.3 TDR (Refletômetro de domínio de tempo)

O equipamento de TDR permite determinar a constante dielétrica (ϵ) do solo, que apresenta correlação com o teor de água. As determinações de ϵ foram monitoradas com as guias de onda de TDR pré-instaladas nos lisímetros e acopladas diretamente ao equipamento TDR (Trase 2100 da SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION) que estava conectado a um computador de onde se comandava manualmente o envio do sinal eletromagnético, realizando as leituras sequencialmente de um ponto por vez.

2.2.3.4 Tensiômetros

Os tensiômetros utilizados foram de fabricação própria. Foram construídos em tubos de PVC com cápsula de cerâmica porosa, uma tampa rosqueável e manômetros de mercúrio

(tubos de náilon com diâmetro interno de ~ 1 mm). O comprimento total foi de 0,4 m de tubo com cápsula e 2 m de tubos de náilon.

Após a construção dos tensiômetros, as cápsulas ficaram submersas em água para saturação por um período de 24 horas e logo após foram submetidos à pressão de 100 kPa utilizando um compressor de ar para verificar a possível existência de vazamento nas cápsulas e conexões. Nesses casos, o equipamento foi descartado.

Os tensiômetros foram instalados através de orifícios nas laterais dos lisímetros, por onde se introduziu o trado para abertura do furo-guia no solo e introdução dos tensiômetros ficando o mais justo possível, possibilitando um melhor contato entre a cápsula e o solo (Figura 7).



Figura 7 – Posicionamento dos tensiômetros e guias de ondas do TDR nos lisímetros

Foram instalados suportes de madeira ao lado dos lisímetros para montagem dos manômetros e das cubetas de mercúrio numa posição em que houvesse a menor interferência possível de aquecimento pelo sol, principalmente durante os horários de leituras. A leitura de altura de mercúrio nos manômetros foi feita com auxílio de uma régua.

As leituras dos tensiômetros foram transformadas em potencial matricial (h , m) pela equação do tensiômetro:

$$h = - 12,6H + h_c + z$$

sendo H a ascensão de mercúrio em m;

h_c a distância do nível de mercúrio na cuba à superfície do solo em m;

z a profundidade de instalação (distância entre a superfície do solo e a cápsula porosa) em m.

2.2.3.5 Calibração do TDR

Uma amostra de solo deformada foi destorroada e seca ao ar, sendo, em seguida, acondicionada em uma caixa de isopor com 0,5 m de comprimento e 0,3 m de largura formando uma camada de solo com altura de 0,06 m, totalizando um volume de 0,009 m³, onde foram previamente inseridas duas guias de onda. O solo foi acondicionado na caixa de forma a resultar numa densidade média de 1200 kg m⁻³ para o solo AG e de 1400 kg m⁻³ para o solo AR, a mesma dos lisímetros.

Dados de teor de água obtidos por gravimetria e dados simultâneos da constante dielétrica (ϵ) foram tomados durante o umedecimento do solo com umidades inicial próximas do limite inferior de disponibilidade de água até a saturação por meio de leituras com as guias de onda conectadas diretamente ao equipamento TDR e pesagem em balança eletrônica.

As leituras da constante dielétrica foram feitas numa frequência diária, seguidas de pesagens da caixa. A constante dielétrica aparente foi convertida em teor de água volumétrico baseada num modelo de regressão linear simples através da equação de calibração encontrada.

$$\theta = a\epsilon + b \quad (1)$$

Foram utilizados os valores do teor de água a base de volume (θ , m³ m⁻³) e a constante dielétrica lida pelo TDR para estimar os parâmetros da equação.

2.2.4 Caracterização hidráulica dos solos

2.2.4.1 Curva de retenção da água no solo

Amostras de solo foram coletadas de uma caixa de isopor preenchido com cada tipo de solo usando a mesma densidade aplicada nos compartimentos dos lisímetros. Foram coletadas seis amostras indeformadas para cada tipo de solo com anéis volumétricos com 4,6 cm de diâmetro interno e 3,0 cm de altura. No que se refere ao acondicionamento dessas amostras, foram numeradas e embaladas em sacos plásticos para posteriormente serem guardadas em refrigerador até o momento de seu processamento, mantendo assim o mínimo possível de alteração estrutural.

No laboratório foram preparadas retirando-se o excesso de solo de ambos os lados com auxílio de uma faca pedológica e colocado um tecido poroso na parte inferior de cada amostra para evitar uma possível perda de solo no processo de saturação e também para propiciar um melhor contato entre a amostra e a superfície de contato.

Para determinação da curva de retenção de água no solo, foram utilizadas mesas de tensão e câmaras de pressão de Richards.

As amostras foram saturadas por um período de 24 horas em uma bandeja e, em seguida para a obtenção dos pontos de baixa tensão colocou-as em uma mesa de tensão sendo submetidas a uma sucção correspondente a 10, 20 e 40 cm de coluna d'água, até atingirem o equilíbrio. Para obtenção dos pontos de alta tensão (1, 3, 5, 10, 50 e 150 m) foi utilizada uma câmara de pressão de Richards.

Após cada equilíbrio, as amostras foram pesadas, determinando-se seu teor de água (θ). Aos pares de dados (θ, h) foi ajustada a eq. de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m} \quad \text{ou} \quad \Theta = \left[1 + |\alpha h|^n\right]^{-m} \quad (2)$$

onde $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, θ_s e θ_r são os teores de água residual e de saturação, respectivamente, e α (m^{-1}), m e n são parâmetros empíricos.

2.2.4.2 Condutividade hidráulica

A determinação da condutividade hidráulica em função do potencial matricial $K(h)$ em laboratório foi realizada no laboratório de física do solo de ESG/WUR – Holanda, seguindo a metodologia de Wind (1968) sob condições de evaporação. Cilindros de 103 mm de diâmetro e 80 mm de altura com 4 furos laterais de 4 mm de diâmetro para a inserção de microtensiômetros a 10, 30, 50 e 70 mm da base, foram preenchidos com solo e colocados em água para saturar por capilaridade durante 24 horas. O dispositivo de medida do potencial de água destinado ao funcionamento do método Wind foi constituído de um conjunto de quatro microtensiômetros conectados aos cilindros e ligados a um sensor de pressão por meio de um tubo de náilon (Figura 8). O cilindro de solo foi colocado sobre uma placa de plástico rígido e vedado com fita de vedação para evitar qualquer vazamento por drenagem, sendo em seguida disposto sobre uma caixa de sensores e o conjunto foi colocado sobre uma balança de precisão. Os sensores de pressão foram conectados a um multiplexador, associado a um microcomputador. Os sinais dos sensores e da balança foram registrados a cada 60 minutos. Após a parte experimental de laboratório, os dados foram processados por modelagem inversa (Wind, 1968), obtendo-se pares de dados $K-h$.

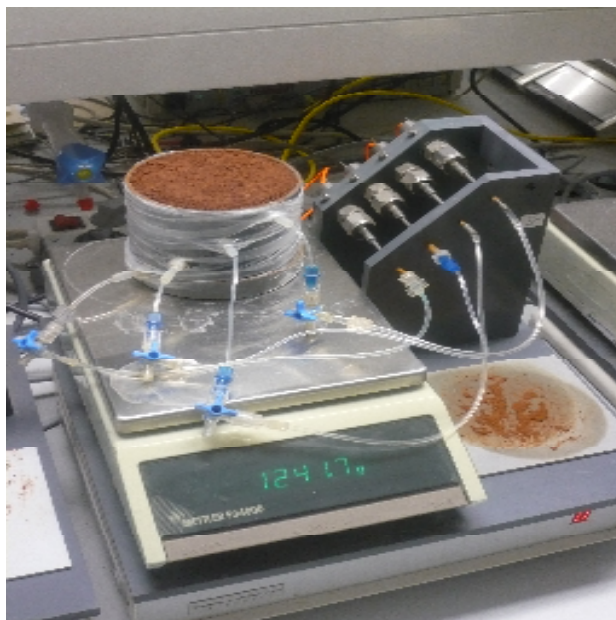


Figura 8 – Determinação da condutividade hidráulica em laboratório pelo método de Wind (1968)

Aos valores obtidos foi ajustada a equação:

$$K = K_s; \text{ para } |h| < |h_b| \quad (3a)$$

ou

$$K = K_s \left(\frac{|h_b|}{|h|} \right)^b; \text{ para } |h| \geq |h_b| \quad (3b)$$

onde K é a condutividade hidráulica, K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado, h_b é o valor de entrada de ar e b um parâmetro de ajuste.

2.2.4.3 Potencial de fluxo matricial

O potencial de fluxo matricial (M , $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$) é definido como a condutividade hidráulica ($K(h)$, m d^{-1}) integrada dentro de um intervalo de potencial matricial, e considerando o ponto de murcha permanente em termos de potencial matricial (h_{pmp} , m) como limite inferior da integração eq. (4).

$$M = \int_{h_w}^h K(h)dh \quad (4)$$

M é um parâmetro altamente ligado ao movimento da água no solo pelo potencial matricial, correspondendo ao teor médio de água na camada.

Substituindo a eq. 3 na eq. 4 e resolvendo a integral obtém-se a seguinte expressão para M :

$$M = \frac{K_s |h_b|^b}{b-1} \left[|h|^{1-b} - |h_w|^{1-b} \right]; \text{ para } |h| \geq |h_b| \quad (5a)$$

ou

$$M = \frac{K_s |h_b|^b}{b-1} \left[|h_b|^{1-b} - |h_w|^{1-b} \right] + \left[|h_b| - |h| \right] K_s; \text{ para } |h| < |h_b| \quad (5b)$$

2.2.5 Planta

No experimento foram utilizadas plantas de sorgo por esta ser uma gramínea com sistema radicular fasciculado ou cabeleira, proporcionando facilidade na divisão para ocupar os dois compartimentos do lisímetro. Estas plantas foram cultivadas sob ótimas condições nutricionais e de umidade até alcançarem o período reprodutivo, especialmente o florescimento correspondente ao estágio EC3, que é a fase mais crítica à falta de água e onde há máxima demanda transpiratória devido ao maior índice de área foliar.

Durante o experimento foram necessárias aplicações do inseticida-acaricida Lorsban da “Dow AgroSciences” para o controle da lagarta-do-cartucho sempre que chegava a um nível de infestação capaz de causar dano a planta.

2.2.5.1 Densidade radicular

Ao final do experimento as plantas foram cortadas e o solo dos lisímetros retirado e dividido por camadas de acordo com as profundidades monitoradas pelo TDR. Este solo foi peneirado e as raízes foram separadas pelo sistema de catação, lavando-as em seguida e armazenando devidamente identificadas. Logo em seguida as raízes foram levadas para uma estufa ventilada a 65 °C por um período de 48 horas, para posterior determinação da massa

seca. Com base na massa seca, densidade e raio das raízes, calculou-se o comprimento, pela seguinte equação:

$$L = \frac{m}{dr_0\pi} \quad (6)$$

em que m (kg) é a massa seca, d (kg m^{-3}) a densidade e r_0 (m) o raio médio das raízes. Para este estudo, foi considerado um valor constante de raio, $r_0 = 0,0003$ m. Para a densidade foi considerado um valor $d = 500$ kg m^{-3} , conforme encontrado por Craine e Lee (2003). A densidade radicular (R , m m^{-3}) foi determinada pela medida do comprimento total de raízes (L) em um volume de solo que corresponde ao volume do respectivo compartimento no lisímetro ($0,0277$ m^3).

$$R = \frac{L}{V} \quad (7)$$

O valor da distância média entre as raízes (r_m , m) foi estimado com base na densidade radicular R pela expressão (8):

$$r_m = \sqrt{\frac{1}{\pi R}} \quad (8)$$

2.2.5.2 Extração radicular entre compartimentos

A extração radicular S_L ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) por compartimento foi estimada pelo modelo proposto por Jong van Lier et al. (2008):

$$S_L = \rho_L (\bar{M}_L - M_{0,L}) \quad (9)$$

em que \bar{M}_L é o potencial de fluxo matricial correspondente ao teor médio de água no compartimento do lisímetro, calculado pelas eq. (5), $M_{0,L}$ é o potencial de fluxo matricial na superfície radicular calculado pela eq. (10) descrito por:

$$M_0 = \frac{\rho_{AR} \bar{M}_{AR} + \rho_{AG} \bar{M}_{AG} - S}{\rho_{AR} + \rho_{AG}} \quad (10)$$

Os subscritos AR e AG representam os compartimentos do lisímetro com respectivo solo, e $S = (\Delta\theta_{AR} + \Delta\theta_{AG})/2\Delta t$.

O conjunto de parâmetros r_0 , r_m e a ($a = 0,53$ conforme encontrado numericamente por Jong van Lier et al., 2006) permitiu calcular o valor da variável ρ para cada compartimento de cada lisímetro conforme eq. (11):

$$\rho_L = \frac{4}{r_0^2 - a^2 r_{m,L}^2 + 2(r_{m,L}^2 + r_0^2) \ln \frac{ar_{m,L}}{r_0}} \quad (11)$$

Como pode ser observado na eq. 9, ρ é um coeficiente que determina a dependência entre o potencial de fluxo matricial e a extração de água pelas raízes e é uma função de a , r_0 e r_{mL} .

2.2.6 Análise estatística

A qualidade de estimativa do modelo (eq. 9) foi analisada pelo erro médio quadrático (*Mean Square Error*, MSE), dado pela eq. (12):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (S_m - S_o)^2 \quad (12)$$

que é a média quadrática das diferenças entre pares de simulações e observações. Sendo S_m o valor calculado pelo modelo e S_o o valor da extração observado. Valores elevados de MSE indicam alto nível de discrepância entre simulações e observações. A raiz quadrada do MSE (*Root Mean Square Error*, RMSE) tem as mesmas dimensões das simulações e observações, podendo ser considerada como a magnitude típica dos erros das simulações.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Sistema radicular

Os valores da massa seca das raízes obtidos dos solos AG e AR estão na Tabela 4. A tabela mostra também o comprimento radicular L calculado (eq. 6), a densidade radicular R (eq. 7) e a meia-distância média entre raízes r_m (eq. 8). Verifica-se uma densidade radicular maior no solo AR do que no AG, com uma massa radicular e densidade de ordem do dobro. Densidades radiculares normalmente encontradas variam de 0,01 a 1 cm cm^{-3} ou 10^2 a 10^4 m m^{-3} (Willigen e Van Noordwijk, 1987), faixa na qual se encontram os valores aqui obtidos.

Tabela 4 – Massa seca de raiz determinada nos compartimentos dos lisímetros, comprimento de raiz (L), densidade radicular (R), distância média entre as raízes (r_m)

<i>Lisímetro</i>	<i>Solo</i>	<i>Massa seca</i> (g)	<i>L</i> (m)	<i>R</i> (m m^{-3})	<i>r_m</i> (m)
1	AG	2,3790	16,83	606	0,023
	AR	6,2296	44,07	1588	0,014
2	AG	4,0494	28,64	1032	0,018
	AR	8,6062	60,88	2194	0,012
3	AG	4,6117	32,62	1175	0,016
	AR	7,5414	53,34	1922	0,013
4	AG	4,2452	30,03	1082	0,017
	AR	8,2358	58,26	2099	0,012

2.3.2 Calibração do TDR

A Figura 9 mostra os pontos (ϵ , θ) observados. Para o solo AG optou-se pelo ajuste da eq. 1 diferenciado para valores menores e maiores de ϵ . Para o solo AR, uma reta foi ajustada à faixa inteira de valores observados. Os parâmetros de ajuste estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de ajuste da eq. 1

Solo	Constante dielétrica	a	b
AG	$\epsilon \leq 7,6$	0,0299	-0,0466
	$\epsilon > 7,6$	0,0081	0,1193
AR		0,8035	5,7191

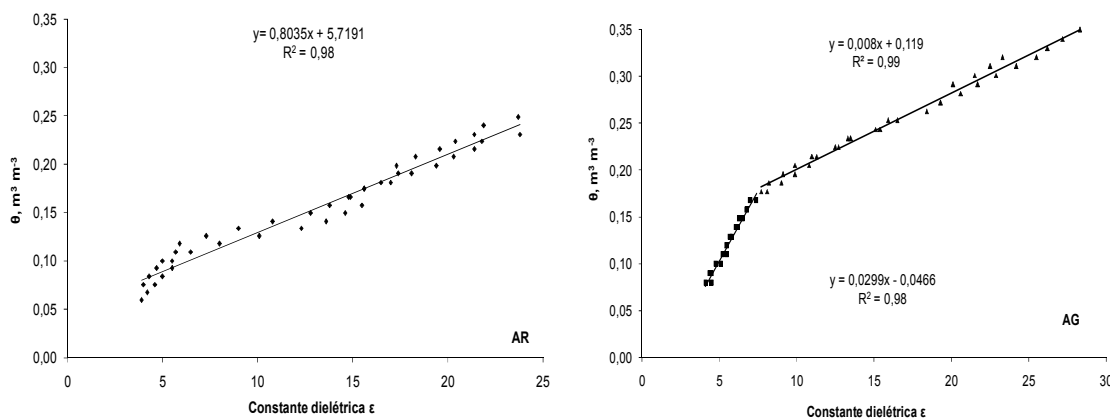


Figura 9 – Relação entre teor de água obtido gravimetricamente e leituras do TDR para calibração nos solos AR e AG

2.3.3 Curva de retenção

Os resultados dos experimentos para a obtenção da curva de retenção estão apresentados na Tabela 6 e Figura 10 (a e b), para os solos AR e AG.

O solo AR mostra características típicas de um solo de granulometria mais grosseira: Uma umidade de saturação relativamente baixa, um ponto de inflexão claro num potencial matricial ao redor de -1 m e um teor de água muito baixo ($\sim 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para as tensões máximas aplicadas.

O solo AG, por sua vez, apresenta-se como solo típico de textura argilosa: Um teor de água de saturação alto ($\sim 0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), ausência de um ponto de inflexão nítido e teores de água relativamente altos mesmo em tensões grandes ($\sim 0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Tabela 6 – Médias e desvios padrão do teor de água no solo (θ), em dez valores de potencial matricial (h) para os solos AG e AR

h (m)	AG		AR	
	θ Média ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ desvio padrão ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ média ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ desvio padrão ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
- 0	0,5536	0,0175	0,4523	0,0061
- 0,1	0,4560	0,0404	0,4352	0,0086
- 0,2	0,4133	0,0331	0,4135	0,0087
- 0,4	0,3693	0,0222	0,3732	0,0120
- 1	0,3353	0,0127	0,2585	0,0121
- 3	0,3115	0,0103	0,2086	0,0179
- 5	0,2877	0,0099	0,1715	0,0141
- 10	0,2444	0,0089	0,1162	0,0067
- 50	0,2148	0,0077	0,0919	0,0015
- 150	0,2033	0,0087	0,0842	0,0019

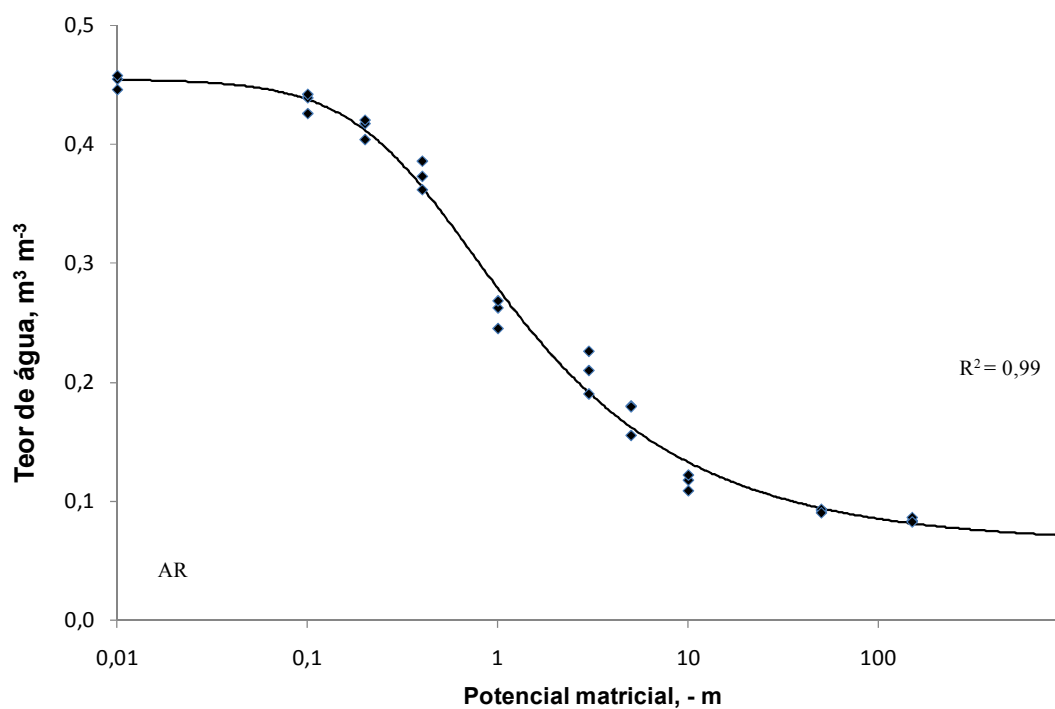


Figura 10a – Teor de água em função do potencial matricial no solo AR (dados obtidos representados por pontos, e equação de Van Genuchten (eq. 2) ajustada representada pela linha)

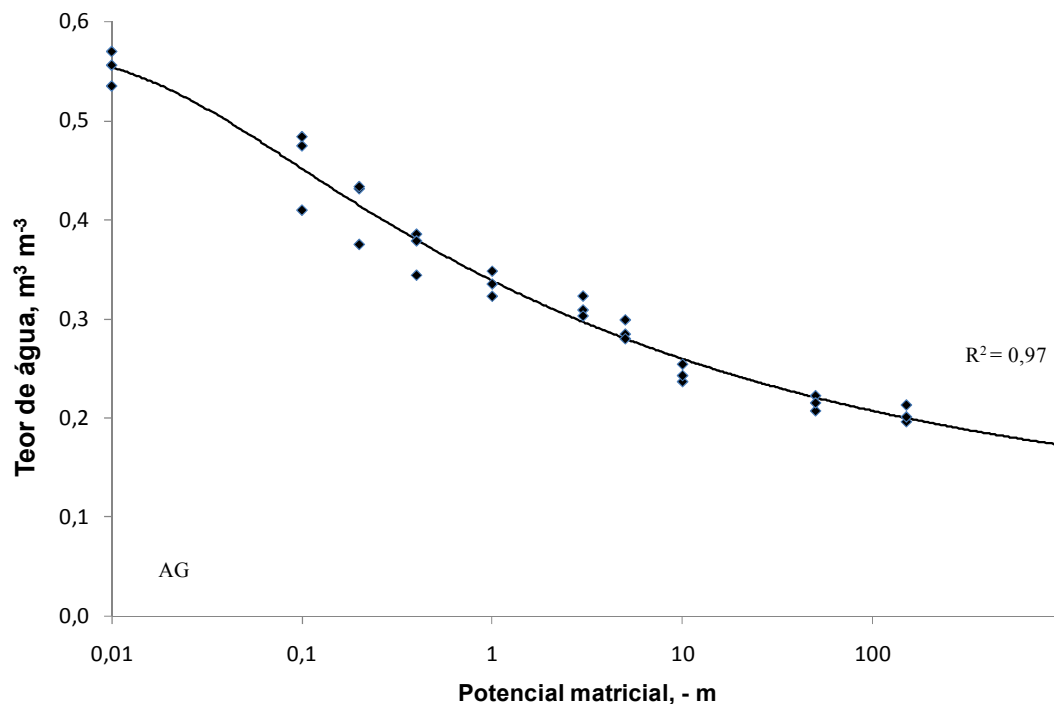


Figura 10b – Teor de água em função do potencial matricial no solo AG (dados obtidos representados por pontos, e equação de Van Genuchten (eq. 2) ajustada representada pela linha)

2.3.4 Condutividade hidráulica

Os parâmetros da equação que descreva a condutividade hidráulica em função do potencial matricial (eq. 3) obtidos nos experimentos pelo método de Wind (1968) para os dois tipos de solos estão apresentados na Tabela 7 e nas Figuras 11 e 12. As Figuras 13 e 14 mostram os gráficos de M em função de h (eq. 5).

Observa-se que os valores K_s estão na mesma ordem de grandeza para os dois solos. A tensão de entrada de ar (na relação $K-h$ representada pelo valor de h_b e nas curvas de retenção pelo início do decréscimo do teor de água) ocorre para valores menores de h no solo AG do que AR na curva de retenção; o contrário se observa na relação $K-h$. O decréscimo de K com h é mais intenso no solo AR do que no AG, conforme o esperado em função da classe textural.

Tabela 7 – Parâmetros da condutividade hidráulica do solo em função do potencial matricial $K(h)$ (eq.3), para os dois solos

Solos	K_s (m d ⁻¹)	$ h_b $ (m)	b
AR	0,06454	0,4211	2,9995
AG	0,06034	1,0000	4,3692

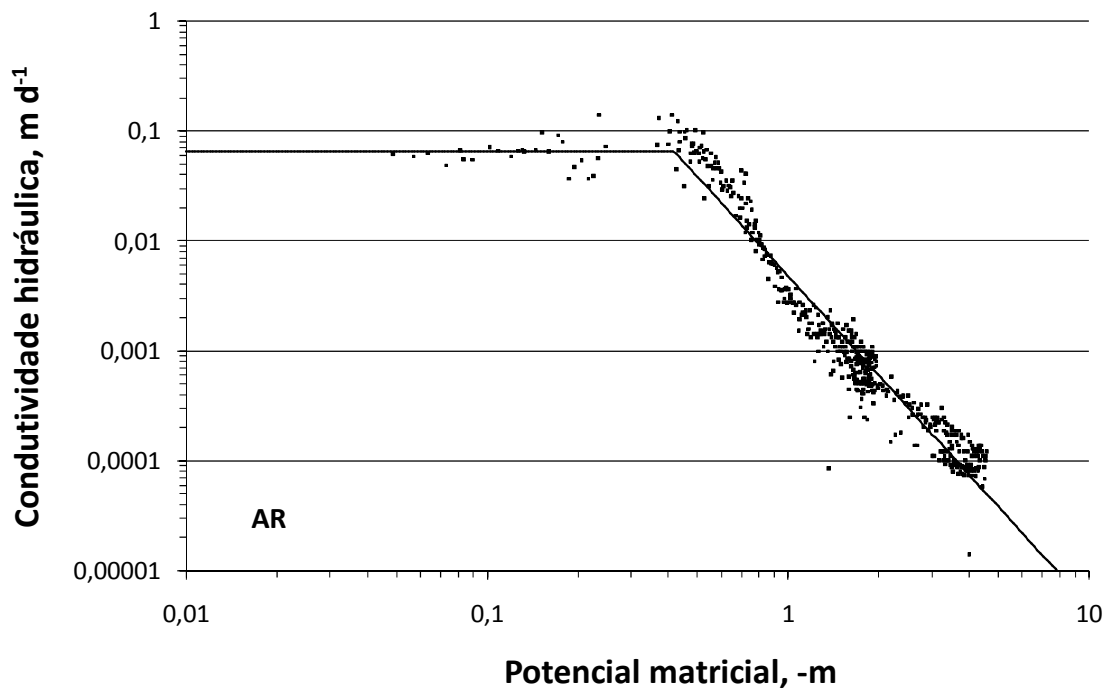


Figura 11 – Condutividade hidráulica em função do potencial matricial no solo AR determinada pelo método de Wind (1968). Pontos representam os valores observados, a linha é a equação 3 ajustada

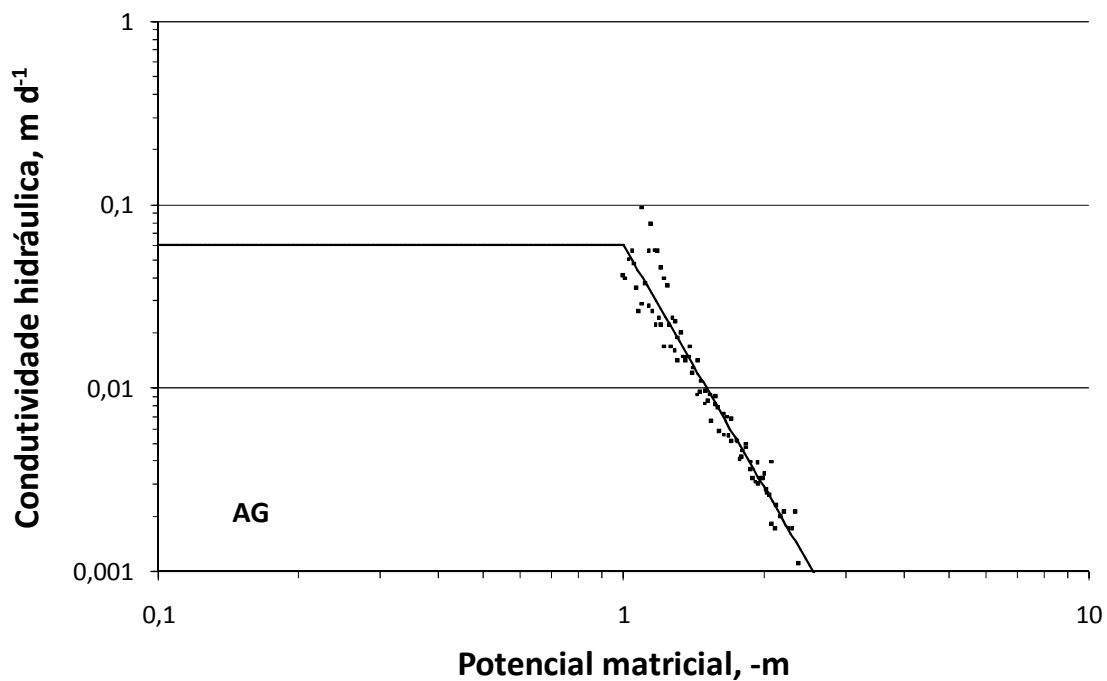


Figura 12 – Condutividade hidráulica em função do potencial matricial no solo AG determinada pelo método de Wind (1968). Pontos representam os valores observados, a linha é a equação 3 ajustada

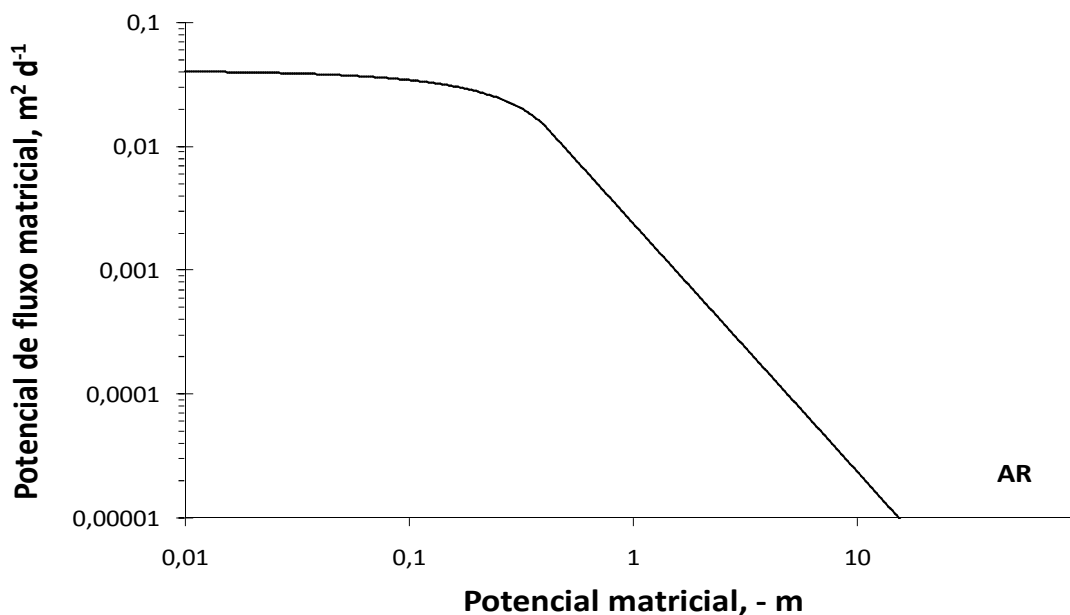


Figura 13 – Potencial de fluxo matricial M em função do potencial matricial h no solo AR (eq. 5)

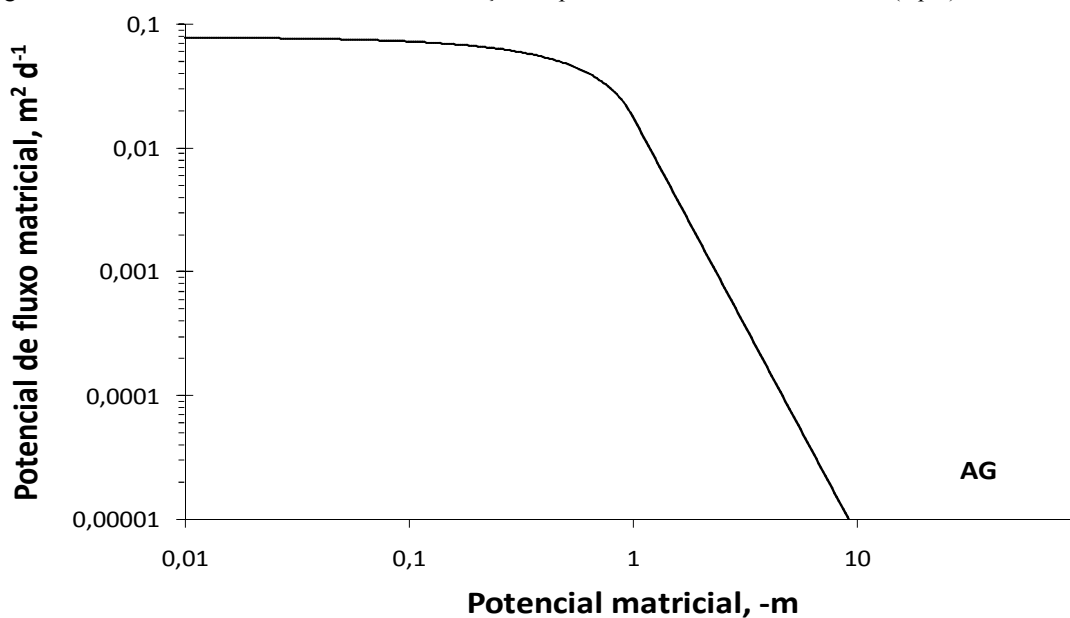


Figura 14 – Potencial de fluxo matricial M em função do potencial matricial h no solo AG (eq. 5)

2.3.5 Observações experimentais nos lisímetros

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram os parâmetros observados (teor de água, potencial matricial e potencial de fluxo matricial) nos lisímetros em função do tempo durante 46 dias do período experimental. Em todas as figuras é possível observar que a extração de água se intensifica no lado do lisímetro onde ocorre maior teor de água. Nessa figura, a inclinação da linha $\theta-t$ indica a taxa de extração de água do respectivo solo. Os valores de M são

indicadores da facilidade que o sistema radicular tem para extrair a água do solo: quanto maior o M , mais fácil a extração do respectivo solo.

Observando as Figuras 15, 16, 17 e 18 verifica-se que inicialmente a extração da água do AR e AG, indicada pela inclinação da linha $\theta-t$, está parecida. Até o início da fase III (em 06 de junho), o valor de M está sempre maior no solo AR, irrigado na fase I. Portanto, pela eq. 9, considerando $M_{0,L}$ e ρ_L da mesma ordem em ambos os compartimentos, espera-se uma extração de água mais intensa do solo AR, o que de fato é observado durante todo esse período.

Verifica-se que o teor de água, ao contrário de M , não é um bom indicador de disponibilidade de água, sendo inferior no solo AR mesmo durante a fase I em que ele foi irrigado. Na fase II, percebe-se uma maior extração do solo AR enquanto este está com maior valor de M . No dia 29/30 de maio há uma redução momentânea da extração, correlacionada com as menores temperaturas e maiores valores de umidade relativa observadas naqueles dias. A nitidez com que essa ocorrência aparece nos resultados de todos os lisímetros corrobora o método experimental utilizado. A partir de 4 de junho os valores de M dos dois lados ficaram parecidos e a extração de ambos intensifica de forma geral.

Na fase III, (a partir de 6 de junho) onde o solo AG recebia irrigação, a extração do AR cessou. Esse fato está claramente visível nos resultados dos quatro lisímetros: Assim que o solo AG foi irrigado, a extração do solo AR terminou, demonstrando uma resposta muito rápida da planta em relação a mudanças no ambiente radicular.

Observando detalhadamente o teor de água do solo AR (não irrigado) no período a partir de 6 de junho, verifica-se um aumento de θ , podendo ser atribuído à transferência de água do lado de maior potencial matricial ao lado de menor potencial matricial através das raízes da própria planta. Esse fenômeno, chamado de “hydraulic lift”, tem sido observado por diversos autores, por exemplo, Richards e Caldwell (1987) e Leffler et al. (2005).

Em 15 de junho observa-se, em todos os lisímetros, um dia de redução do teor de água no solo AR. Possivelmente houve, nesse dia, uma maior dificuldade de extração do solo AG em função do término das irrigações. Com exceção do lisímetro 1, os valores de M nesse dia se igualam nos dois solos, o que reforça essa hipótese. Não está claro, no entanto, porque a extração segue apenas do solo AG nos dias subsequentes.

Os valores de $|h|$ subiram até a ordem de 30 m no AG e de 10 m no AR. Houve diferenças grandes entre os lisímetros. No caso do lisímetro 4 foram observados valores muito maiores de $|h|$. Deve-se lembrar que a curva de retenção apresenta alta sensibilidade ($dh/d\theta$ muito grande) nessa faixa.

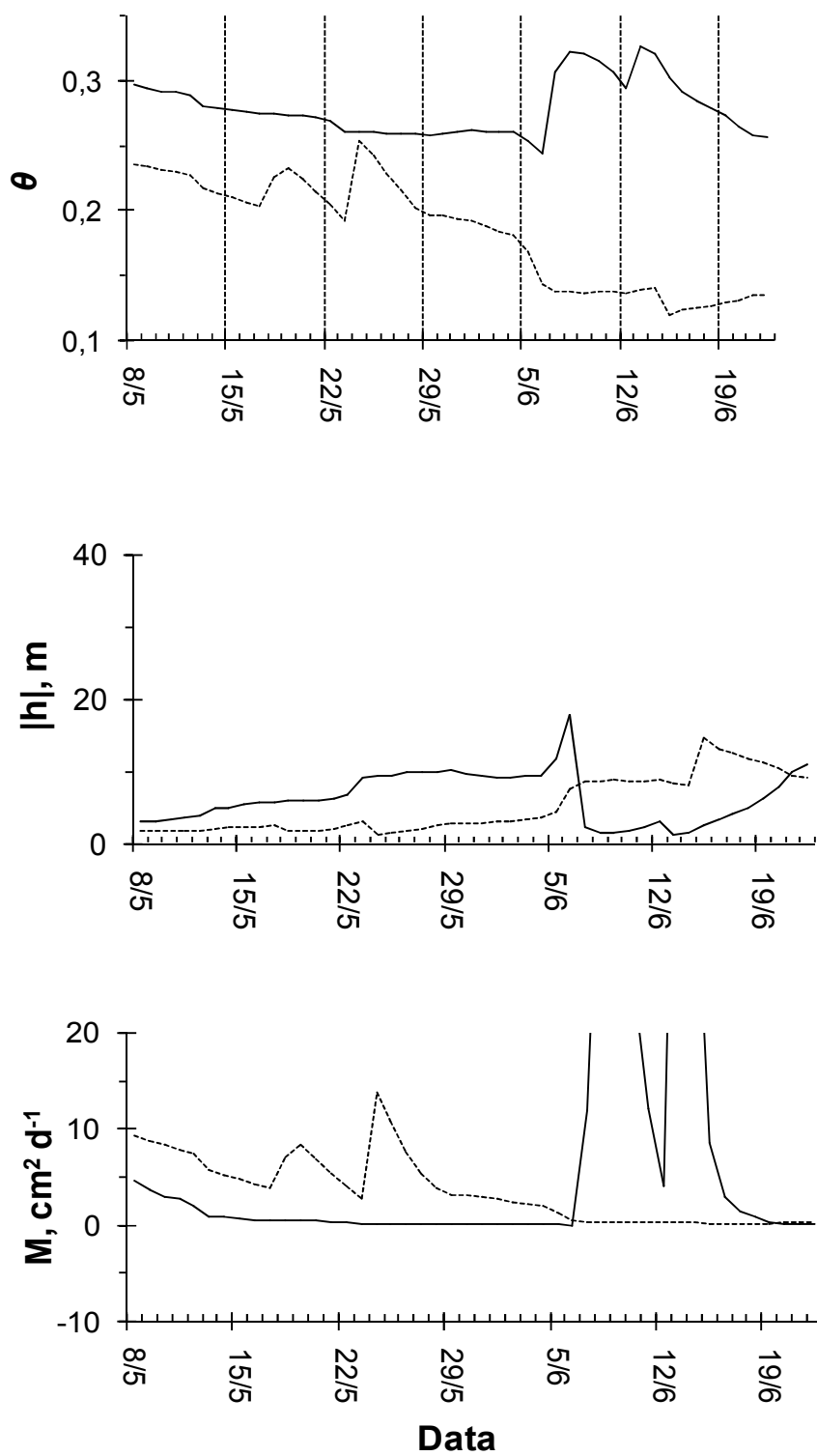


Figura 15 – Teor de água (θ), potencial matricial (h) e potencial de fluxo matricial (M) no lisímetro 1. A linha contínua dos gráficos representa o solo AG, e a linha pontilhada representa o solo AR

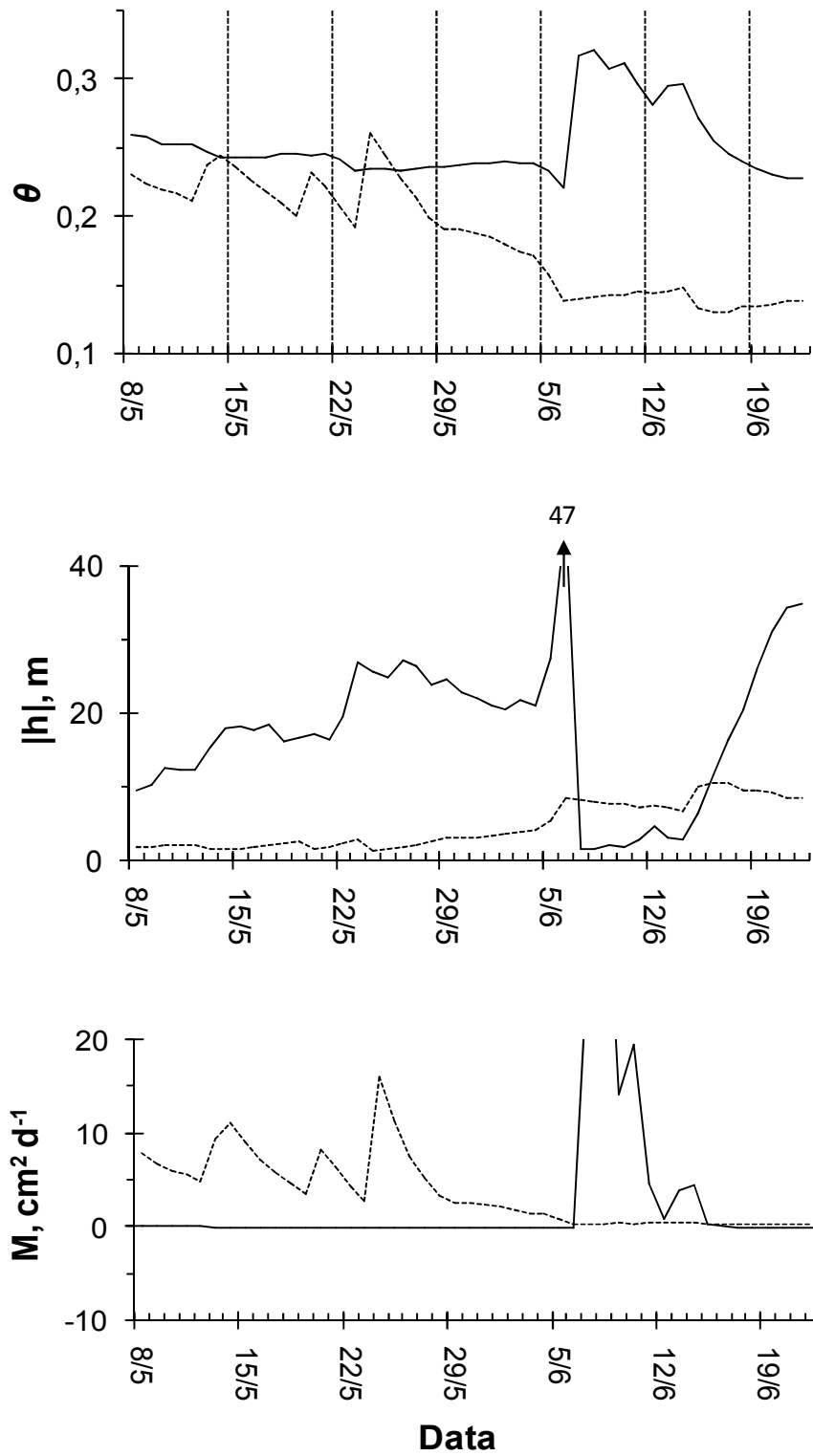


Figura 16 – Teor de água (θ), potencial matricial (h), potencial de fluxo matricial (M) no lisímetro 2. A linha contínua dos gráficos representa o solo AG, e a linha pontilhada representa o solo AR

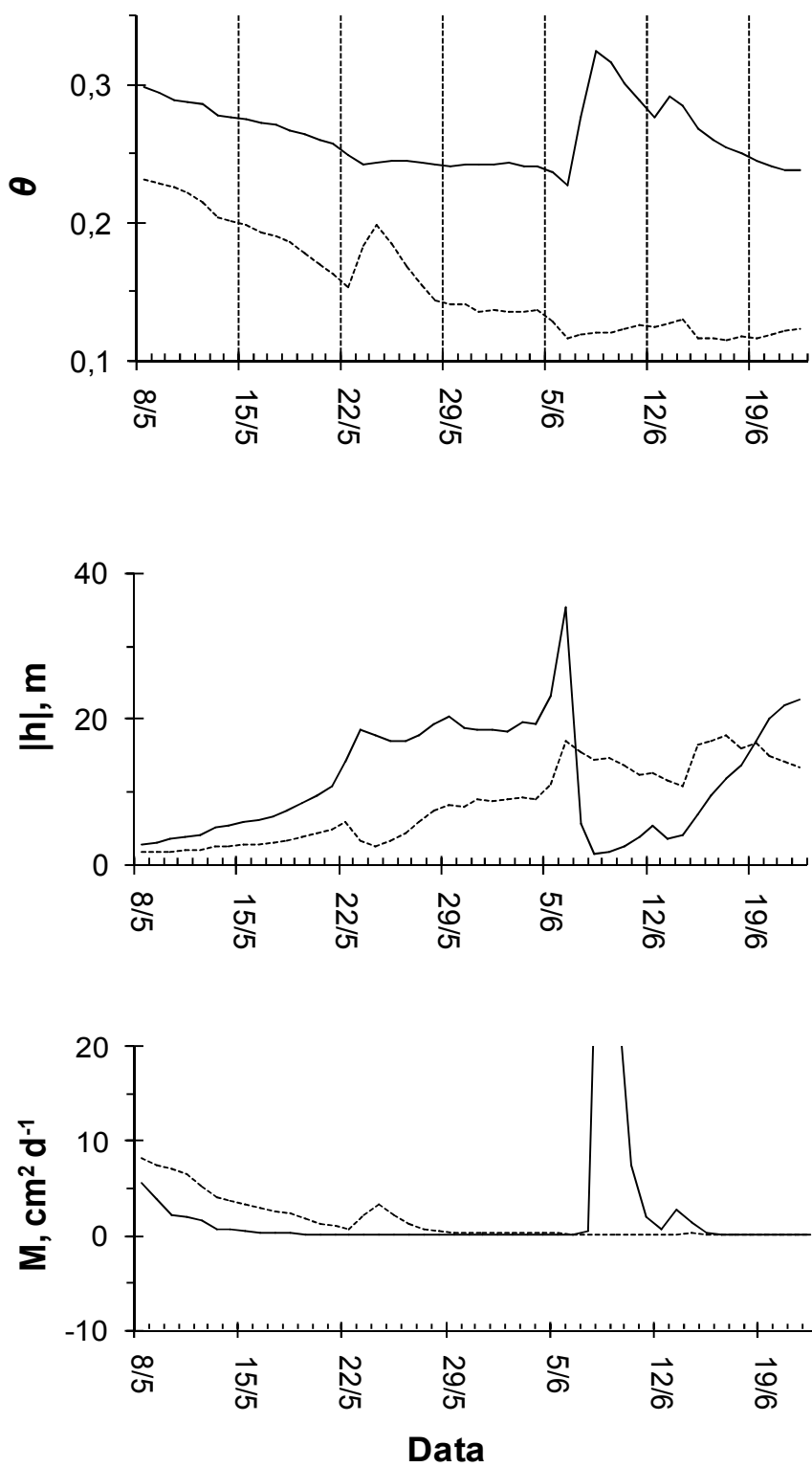


Figura 17 – Teor de água (θ), potencial matricial (h), potencial de fluxo matricial (M) no lisímetro 3. A linha contínua dos gráficos representa o solo AG, e a linha pontilhada representa o solo AR

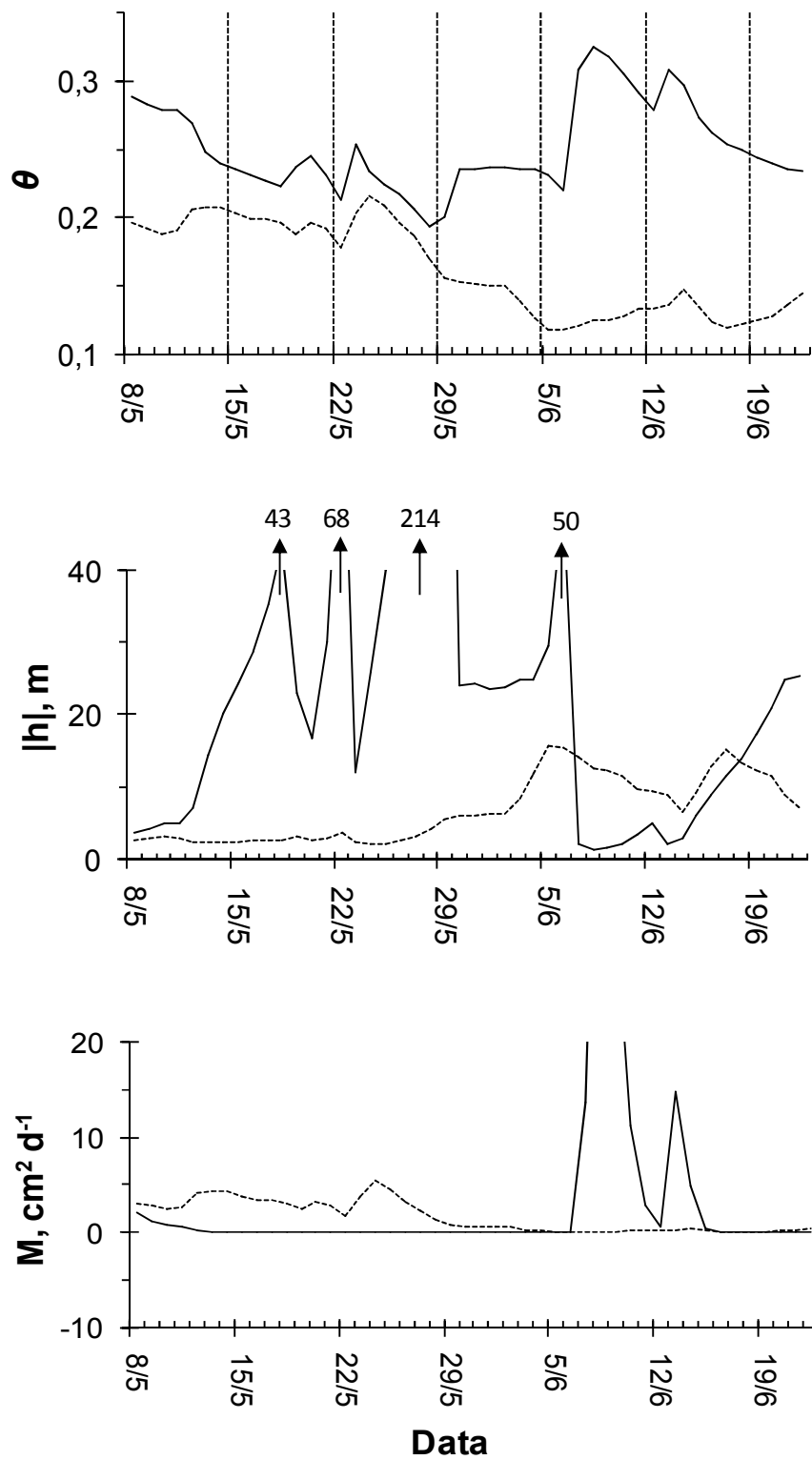


Figura 18 – Teor de água (θ), potencial matricial (h), potencial de fluxo matricial (M) no lisímetro 4. A linha contínua dos gráficos representa o solo AG, e a linha pontilhada representa o solo AR

2.3.6 Avaliação do modelo

Os valores de S observados nos lisímetros foram comparados aos estimados pela eq. 9, verificando-se praticamente a ausência de correlação (Figura 19).

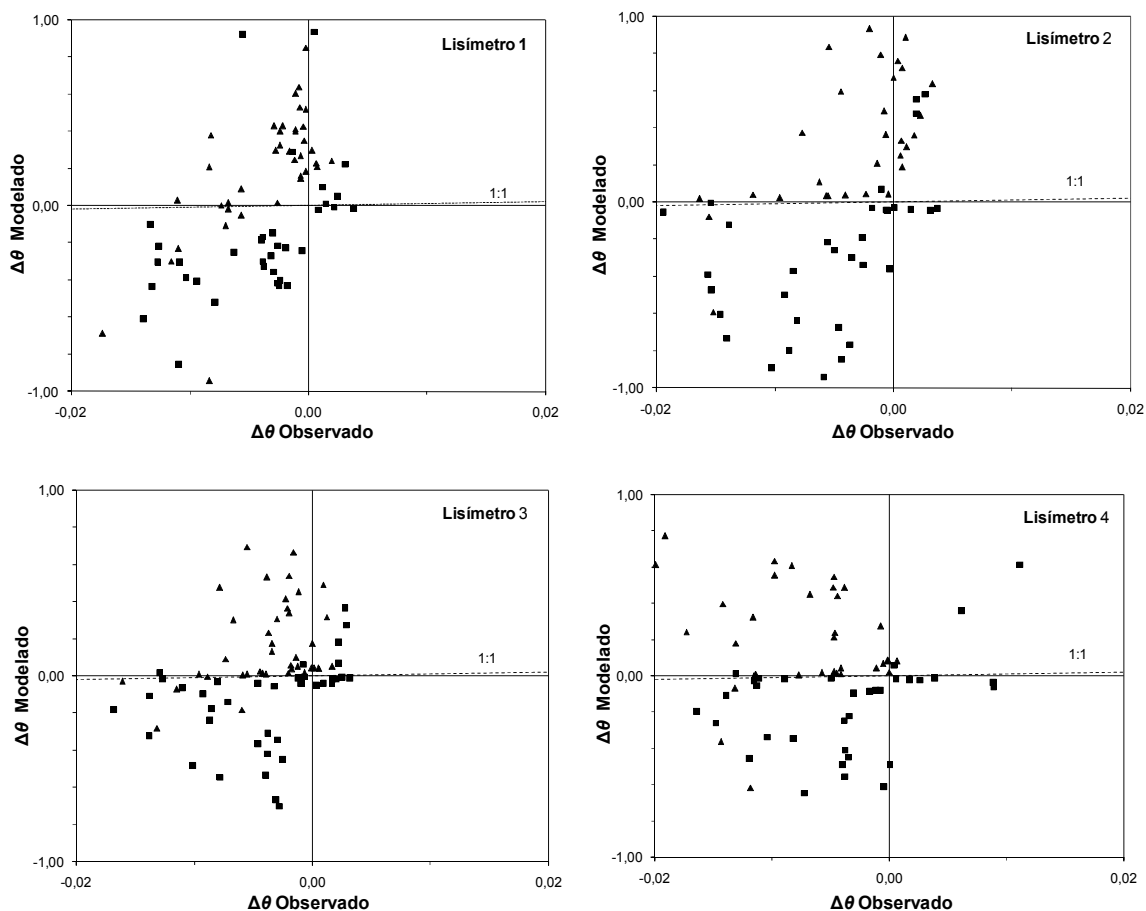


Figura 19 – $\Delta\theta$ modelado (eq. 9) em função de $\Delta\theta$ observado, para os quatro lisímetros. Triângulos representam observações do solo AG. Retângulos são observações do solo AR

Essa falta de correlação é causada, mais provavelmente, por problemas na atribuição do valor do parâmetro ρ , bem como pela suposição do modelo de um sistema radicular homogêneo, em contato perfeito com o solo e com atividade igual em todas as raízes. A distribuição real do sistema radicular é desordenada, principalmente, pelo crescimento preferencial das raízes em rachaduras e macroporos do solo, ocasionando o acúmulo de raízes em determinado local (TARDIEU; MANICHON, 1986; PASSIOURA, 1988). Essa desuniformidade gera uma maior distância média entre as raízes em relação ao considerado pelo modelo. A distribuição uniforme no solo resulta sempre numa maior eficiência na extração de água. Quanto à atividade das raízes, nem todas elas contribuem da mesma forma para extração, existindo aquelas mais velhas e lignificadas. O contato da raiz com o solo

também não acontece perfeitamente, pois não se trata de um material cilindro e reto com espessura uniforme. Devido a todos esses fatores, um parâmetro de correção deve ser incluído na eq. 9, tornando-a:

$$S_L = f_L \rho_L (M_L - M_{0L}) \quad (13)$$

Procurou-se, então, uma combinação de r_0 (que influencia no valor de ρ_L (eq.11)) e f_L que resultasse numa correlação máxima entre modelo e observação nos quatro lisímetros. Para o solo AR, os valores de r_0 e f encontrados em experimento simultâneo (Faria¹, comunicação pessoal) foram de 0,3 mm e 0,01506, respectivamente. Para o solo AG, utilizou-se o mesmo valor para r_0 , e determinou-se interativamente o valor de f em 0,003713. Os valores são da mesma ordem que os relatados por Herkelrath, Miller e Gardner (1977).

Utilizando-se esses valores obtiveram-se as representações gráficas da correlação entre observação e modelo (Figuras 20, 21, 22 e 23).

¹Faria, L.N. PPG Física do Ambiente Agrícola, ESALQ/USP, (2009)

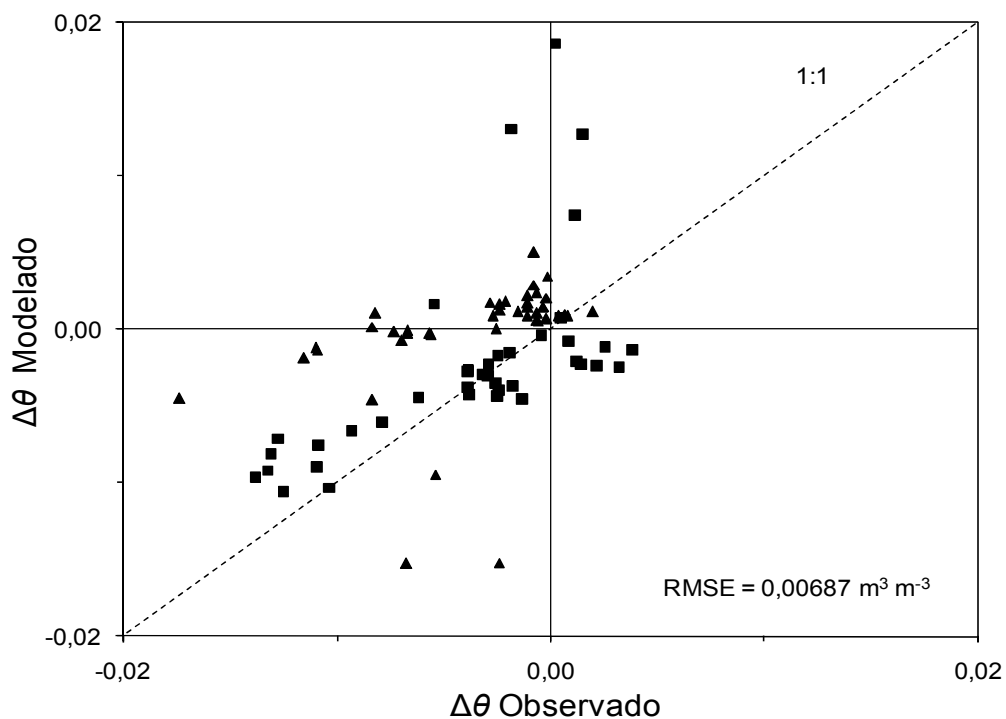


Figura 20 - $\Delta\theta$ modelado versus observado, após ajuste do fator f (eq. 13) no lisímetro 1. Quadrados e triângulos representam observações no solo AR e AG, respectivamente

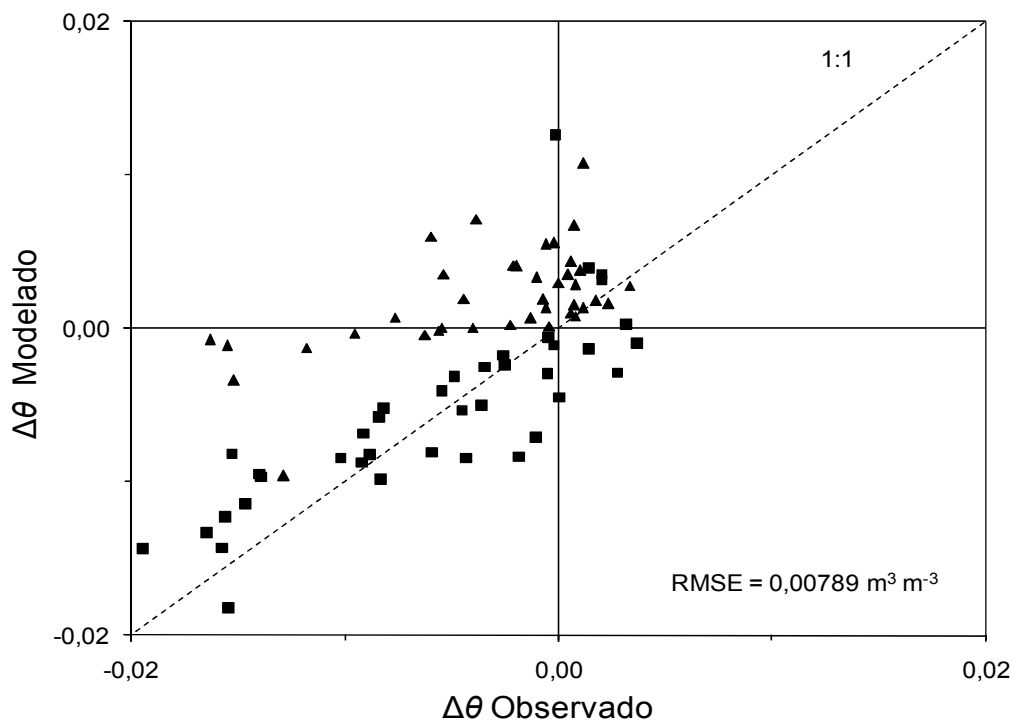


Figura 21 - $\Delta\theta$ modelado versus observado, após ajuste do fator f (eq. 13) no lisímetro 2. Quadrados e triângulos representam observações no solo AR e AG, respectivamente

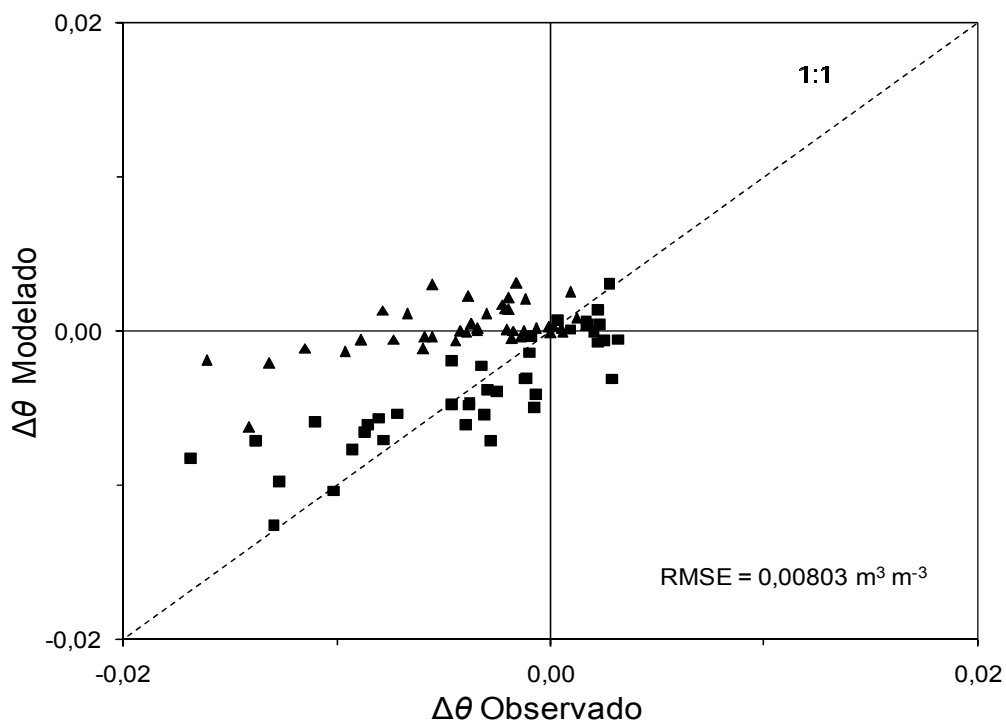


Figura 22 - $\Delta\theta$ modelado versus observado, após ajuste do fator f (eq. 13) no lisímetro 3. Quadrados e triângulos representam observações no solo AR e AG, respectivamente

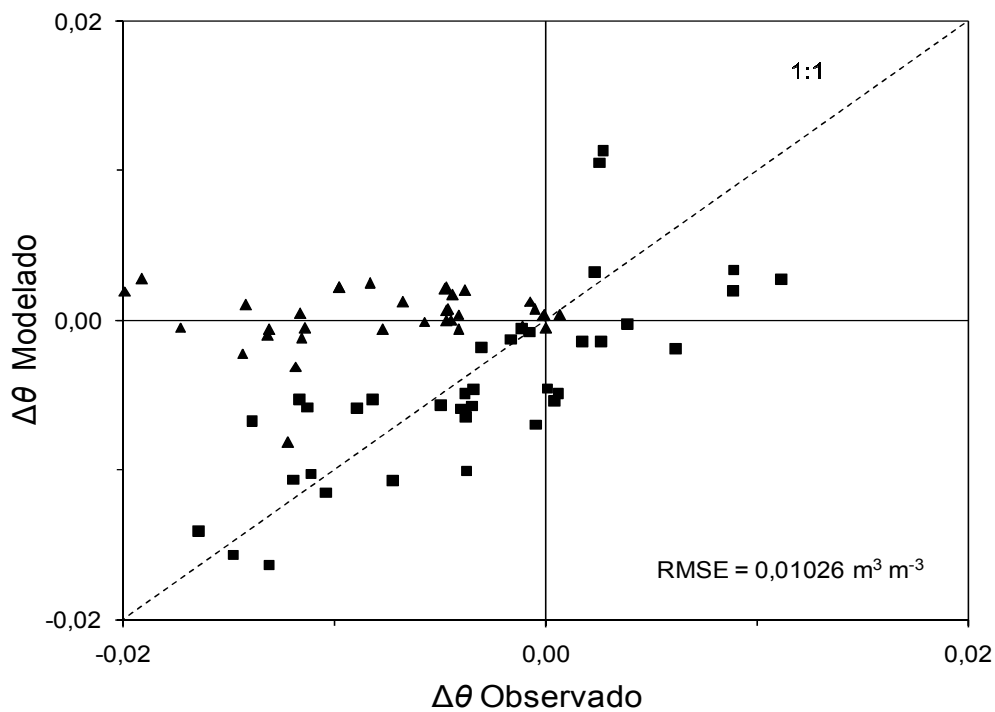


Figura 23 - $\Delta\theta$ modelado versus observado, após ajuste do fator f (eq. 13) no lisímetro 4. Quadrados e triângulos representam observações no solo AR e AG, respectivamente

Observa-se uma correlação razoável entre modelo e observação nos lisímetros de 1 a 3. No lisímetro 4, o desvio foi maior, conforme pode também ser observado pelo valor do RMSE maior nesse lisímetro do que nos outros três. No solo AR observou-se que os pontos seguiram uma melhor tendência nos quatro lisímetros, com melhor aproximação nos lisímetros de número 2 e 3 e uma maior dispersão dos pontos no lisímetro 4. Em relação ao solo AG, os valores se mostraram mais distantes da reta 1:1.

Os valores experimentais e teóricos foram avaliados a partir do índice RMSE. Quanto menor o valor do RMSE maior é a semelhança entre os dados experimentais e da previsão teórica. As comparações entre os valores experimentais e teóricos mostraram os melhores resultados para os três primeiros lisímetros.

A suposição de um M_0 igual nos dois solos AR e AG pode, também, ter sido uma causa de erro de estimativa pelo modelo, uma vez que se considera, normalmente, que os valores de h são iguais na superfície radicular. Para verificar os valores de h na superfície radicular, confeccionaram-se os gráficos da figura 24 que mostraram os valores de h_0 desiguais na superfície radicular, contrário ao normalmente considerado.

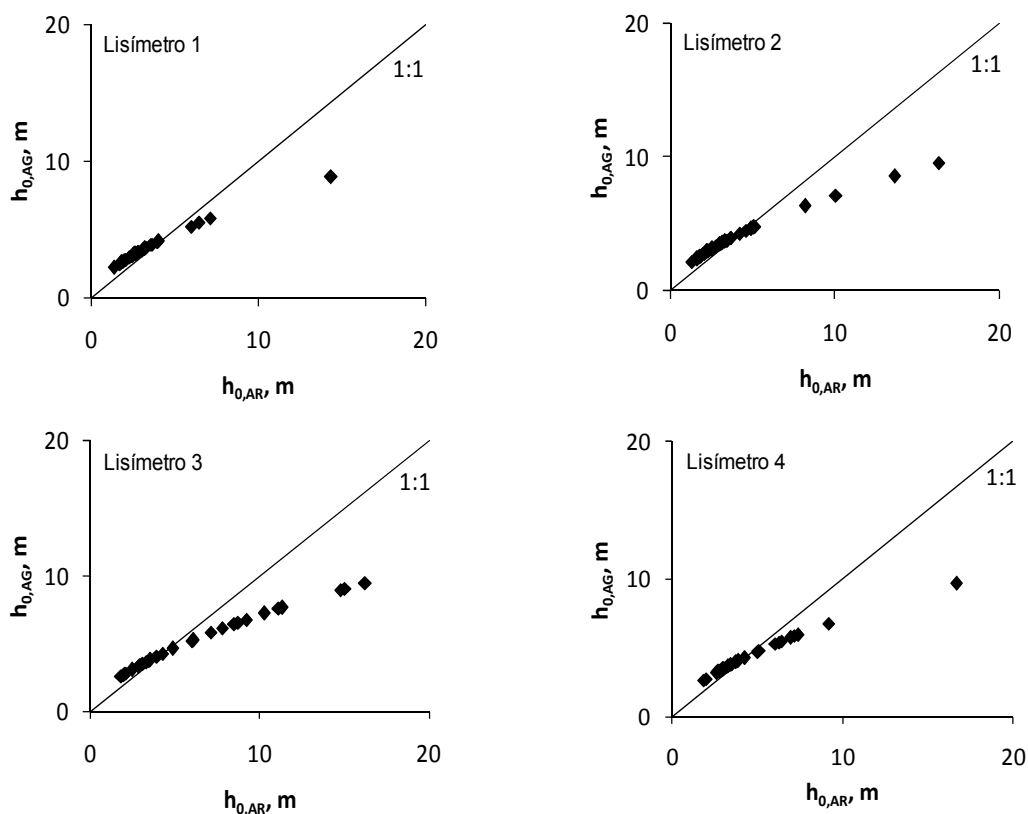


Figura 24 – Relação entre os potenciais matriciais estimados pelo modelo na superfície radicular no solo argiloso e arenoso ao longo do experimento nos quatro lisímetros

3 CONCLUSÕES

1. Um experimento com lisímetro dividido (“split-pot”) com plantas de sorgo e solos de diferentes granulometria (textura média e argilosa) nos compartimentos permitiu fazer observações quanto à partição da extração da água pelo sistema radicular.
2. As plantas demonstraram preferência por extrair água dos compartimentos com potencial de fluxo matricial maior.
3. Em diversas ocasiões a liberação da água ao solo pelo sistema radicular (“hydraulic lift”) foi observada nos compartimentos de potencial matricial mais negativo.
4. O modelo de Jong Van Lier (2008) descreveu razoavelmente bem as observações após inclusão de um fator de eficiência radicular de 0,0150 e 0,0037 nos solos de textura média e argilosa, respectivamente.

REFERÊNCIAS

AMARAL, S.R. do; LIRA, M.A; TABOSA, J.N; SANTOS, M.V.F. dos; MELLO, A.C.L. de; SANTOS, V.F. dos. Comportamento de linhagens de sorgo forrageiro submetidas a déficit hídrico sob condição controlada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 973-979, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO. **Sorgo granífero, cultivo e utilização**. Pelotas: Grupo Pró-Sorgo - Sul, 1989. 41p.

CARLESSO, R. **Influence of soil water deficits on maize growth and leaf area adjustments**. 1993. 253 p. Tese (Doutorado em Crop and Soil Science.) – Michigan State University, East Lansing, 1993.

_____. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CASAROLI, D. **Transpiração de plantas e condições hidráulicas do solo**. 2008. 113p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

COELHO, E.F.; OLIVEIRA, F C.; ARAUJO, E.C.E.; VASCONCELOS, L.F.L.; LIMA, D. M. Distribuição do sistema radicular da mangueira sob irrigação localizada em solo arenoso de tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 250-256, 2001.

COWAN, I.R. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 2, n. 1, p. 221-239, 1965.

CRAINE, J.M.; LEE, W.G. Covariation in leaf and root traits for native and non-native grasses along an altitudinal gradient in New Zealand. **Ecophysiology**, Dunedin, v. 134, p. 471-478, 2003.

DARRAH, P.R.; JONES, D.L.; KIRK, G.J.D.; ROOSE, T. Modelling the rhizosphere: a review of methods for ‘upscaling’ to the whole-plant scale. **European Journal of Soil Science**, Bognor Regis, v. 57, n. 1, p.13-25, 2006.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water**. Rome: FAO, 1986. (Irrigation and Drainage Paper, 33.).

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Ecofisiologia in: cultivo do sorgo. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo/ambientais.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2008.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Centro Nacional de Pesquisa em Solos, 1999. 412 p.

- ESPELETA, J.F.; EISSENSTAT, D.M.; GRAHAM, J.H. Citrus root responses to localized drying soil: A new approach to studying mycorrhizal effects on the roots of mature trees. **Plant and Soil**, Springer, v. 206, p. 1-1, 2004.
- FEDDES, R.A.; KABAT, P.; BAKEL, P.J.T. van; BRONSWIJK, J.J.B.; HALBERTSMA, J. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone - State of the art. **Journal of Hydrology**, Madison, v. 100, n. 1/3, p. 69-111, 1988.
- FERREIRA, L.G.R.; ALBUQUERQUE, I.M.; CRUZ, M.G.M. Alterações na produção de sorgo em resposta ao estresse hídrico aplicado em diferentes fases do ciclo vital. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 3, n. 2, p. 50-64, 1992.
- GARDNER, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil Science**, Riverside, v. 89, n. 35, p. 63-67, 1960.
- GOMIDE, R.L.; DURÃES, F.O.M.; KOBAYASHI, M.K.; MACHADO, R.A.F. Caracterização de estresse hídrico de duas espécies de milho (*Zea mays* L.) com sonda de fluxo de seiva. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.4, n.3, p.344-354, 2005.
- HERKELRATH, W.N.; MILLER, E.E.; GARDNER, W.R. Water uptake by plants: II. The root contact model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 1039-1043, 1977.
- HUSSAIN, A.; BLACK, C.R.; TAYLOR, I.B.; ROBERTS, J.A. Soil Compaction. A Role for Ethylene in Regulating Leaf Expansion and Shoot Growth in Tomato? **Plant Physiology**, v. 121, p. 1227-1237, 1999.
- JONG VAN LIER, Q. de; LIBARDI, P.L. Extraction of soil water by plants: Development and validation of a model. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.4, p. 535-542, 1997.
- JONG VAN LIER, Q. de; METSELAAR, K.; VAN DAM, J.C. Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.5, p. 1264-1277, 2006.
- JONG VAN LIER, Q. de.; METSELAAR, K.; VAN DAM, J.C.; JONG, R. de.; DUIJNISVELD, W.H.M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.7, n.3, p.1065-1078, 2008.
- JORDAN, W.R. Whole plant response to water deficit: An overview. In: TAYLOR, H.M.; JORDAN, W.R.; SINCLAIR, T.R. **Limitations to efficient water use in crop production**, Madison: ASA, CSSA, and SSA, 1983. p. 289-317.
- KOSOLA, K.R.; EISSENSTAT, D.M.. The fate of surface roots of citrus seedlings in dry soil. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 45, p. 1639-1645, 1994.
- KRAMER, P.J. **Plant and soil water relationships. A modern synthesis**. New Delhi: McGraw-Hill, 1995. 482p.
- KRIEG, D.R. **Stress tolerance mechanisms in above ground organs**. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESS, 1993. Nebraska. **Proceedings...** Nebraska, 1993. p. 65-79.

- KROES, J.G.; VAN DAM, J.C. **Reference Manual SWAP version 3.0.3**. Wageningen, Alterra Green World Research, 2003. 211 p. (Alterra Report, 773).
- LEFFLER, A.J.; PEEK, M.S.; RYEL, R.J.; IVANS, C.Y.; CALDWELL, M.M. Hydraulic redistribution through the root systems of senesced plants. **Ecology**, Utah, v. 86, n. 3, p. 633-642, 2005.
- LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stress**. New York: Academic Press, 1972. 697p.
- LI, K.Y.; DE JONG, R.; BOISVERT, J.B. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. **Journal of Hydrology**, Ottawa, v.252, p. 189 – 204, 2001.
- LI, K.Y.; DE JONG, R.; COE, M.T.; RAMANKUTTY, N. Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function. **Earth Interactions**, Duhan, v.10, n. 14, p. 1-22, 2006.
- LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. **Advances in Agronomy**, São Diego, v.43, p.107-153, 1990.
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Ecofisiologia da produção de sorgo**: Sete Lagoas: EMBRAPA, 2003. 4p. (Comunicado Técnico, 87)
- MASOJIDEK, J.; TRIVEDI, S.; HALSHAW, L.; ALEXIOU, A.; HALL, D.O. The synergetic effect of drought and light stress in sorghum and pearl millet. **Plant Physiology**, Bethesda, v.96, p. 198-207, 1991.
- METSELAAR, K.; JONG VAN LIER, Q. de. The shape of the transpiration reduction function under plant water stress. **Vadose Zone Journal**, Madson, n. 6, p. 124-139, 2007.
- NÓBREGA, J.Q.; RAMANA RAO, T.V.; BELTRÃO, N.E.M.; FIDELES FILHO, J. Avaliação do efeito do estresse hídrico no rendimento do feijoeiro por sensoriamento remoto termal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 299-305, 2004.
- NOGUEIRA, R.J.M.C.; SANTOS, C.R. dos; NETO, E.B.; SANTOS, V.F. dos. Comportamento fisiológico de duas cultivares de amendoim a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 12, p. 163-169, 1998.
- OLIVEIRA, M.A.J. de; BOVI, M. L.A.; MACHADO, E.C.; GOMES, M.M.A.; HABERMANN, G.; RODRIGUES, J.D. Fotossíntese, condutância estomática e transpiração em pupunheira sob deficiência hídrica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 59-63, jan./mar. 2002.
- PASSIOURA, J.B. Water transport in and to roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 39, p. 245-265, 1988.
- PORTO, A.L.P. **Efeitos do déficit hídrico e do nitrogênio em cobertura em folhas de sorgo granífero (*Sorghum bicolor*, L)**.1993. 101p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1993.

- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. FURLANI, A.M.C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto agrônomo, 1997. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- REIS, O.V. **Seleção de linhagens de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) tolerantes ao estresse hídrico em fase de plântula**. 1992. 150p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1992.
- RICHARDS, J.H.; CALDWELL, M.M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. **Oecologia**, Berlin, v. 73, p. 486–489, 1987.
- RITCHIE, J.T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, The Hague, v. 58, p. 81-96, 1981.
- ROSENTHAL, W.D.; ARKIN, G.F.; SHOUSE, P.J., et al. Water deficit effects on transpiration and leaf growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 1019-1026, 1987.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Fisiologia Vegetal**. México: Iberoamerica, 1994. 758 p.
- SANTOS, D.B. dos; COELHO, E.F.; AZEVEDO, C.A.V. de. Absorção de água pelas raízes do limoeiro sob distintas frequências de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 327-333, 2005.
- SCAPIM, C.A.; RODRIGUES, J.A.S.; CRUZ, C.D.; CECON, P.R.; RIBEIRO JUNIOR, J.I.; BRACCINI, A.L. Efeitos gênicos, Heterose e depressão endogâmica em caracteres de sorgo forrageiro. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n.1, p. 81-94, 1998.
- SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F.; SANTOS, M.R.; PINHO, R.E.C.; COELHO FILHO, M.A. Distribuição e extração de água pela bananeira BRS tropical, submetida a diferentes sistemas de irrigação por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA,, 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2006. 35 p.
- SOUZA, C.L. de. **Avaliação do crescimento a nível de mudas de pupunheira (*Bactris gasipaes* H. B. K.) em função da disponibilidade de água no solo**. 2000. 42 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2000.
- TARDIEU, F.; MANICHON, H. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. 2. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. **Agronomie**, Paris, v. 6, p. 415-425, 1986.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p. 892-898, 1980.
- VIEIRA JUNIOR, P.A.; DOURADO NETO, D.; OLIVEIRA, R.F. de; PERES, L.E.P.; MARTIN, T.N.; MANFRON, P.A.; BONNECARRÈRE, R.A.G. Relações entre o potencial e a temperatura da folha de plantas de milho e sorgo submetida a estresse hídrico. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 29, n. 4, p. 555-561, 2007.

WILLIGEN, P. de; VAN NOORDWIJK, M. **Roots, plant production and nutrient use efficiency**. 1987. 282 p. (PhD thesis) - Agricultural University Wageningen, Wageningen, 1987.

WIND, G.P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: RIJTEMA, P.E. ; WASSINK, H. (Ed.) Water in the unsaturated zone. In: WAGENINGEN SYMPOSIUM, WAGENINGEN, THE NETHERLANDS. 19–23 June 1966. Gentbrugge. **Proceedings...** Gentbrugge, Bélgica: **International Association Scientific Hydrological**, 1968. v.1. p. 181–191.

ZHANG, J.; KIRKHAM, M.B. Water relations of water-stressed, split-root C4 (*Sorghum Bicolor*; Poaceae) and C3 (*Helianthus Annuus*; Asteraceae) plants. **American Journal of Botany**, Manhattan, v. 82, n. 10, p. 1220-1229, 1995.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)