

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

Transpiração de plantas e condições hidráulicas do solo

Derblai Casaroli

**Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente
Agrícola**

Piracicaba
2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Derblai Casaroli
Engenheiro Agrônomo

Transpiração de plantas e condições hidráulicas do solo

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

Co-Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente
Agrícola

**Piracicaba
2008**

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

Casaroli, Derblai
Transpiração de plantas e condições hidráulicas do solo / Derblai Casaroli. - -
Piracicaba, 2008.
145 p.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Feijão 2. Sistema radicular 3. Solos – Propriedades físicas 4. Transpiração
vegetal I. Título

CDD 631.432

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

Aos meus amados pais,

Liceu F. Casaroli e Carmem M. Casaroli

A minha querida irmã,

Lutiana Casaroli

A minha querida namorada e companheira,

Rafaela Andolhe

Pelo amor, carinho, compreensão, apoio, amizade, incentivo e dedicação

dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por me conceder vida e saúde.

Aos meus pais e irmã por sempre me dizerem palavras de incentivo e de orientação para que eu traçasse bons caminhos em minha vida.

A minha querida namorada e, acima de tudo, companheira de todas as horas; por seu amor, carinho, amizade e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Quirijn de Jong Van Lier, por seu apoio, incentivo, aprendizado, exemplo profissional e ético e, em especial, pela grande amizade construída.

Ao Prof. Dr. Durval Dourado Neto, pela cooperação na realização deste trabalho de tese e grande amizade.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- USP, pela oportunidade da realização deste curso de doutorado.

À FAPESP pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos Professores Doutores: Iran J. O. da Silva, Jarbas H. de Miranda, Luiz R. Angelocci, Nilson A. Villa Nova, Paulo C. Sentelhas, Paulo L. Libardi, Sérgio O. Moraes, Valter Barbieri; integrantes do PPG em Física do Ambiente Agrícola, por seus ensinamentos e grande amizade.

A todos os meus colegas do PPG em Física do Ambiente Agrícola que fizeram parte desta pequena, mas importante etapa de minha vida.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas pela colaboração para a realização deste trabalho de tese, em especial aos amigos Ângela, Edivaldo (“*porpeta*”), Fernando, Francisco (“*chiquinho*”), Robinson e Solange.

Ao professor Dr. Ricardo Ferraz de Oliveira, pela colaboração na realização deste trabalho de tese e amizade.

Ao meu amigo, Prof. Dr. Paulo Augusto Manfron, pela amizade, companheirismo e confiança em âmbitos pessoais e profissionais.

Aos meus amigos e colegas Evandro B. Fagan, Jones Simon e Rafael Vivian, pela amizade, companheirismo e, principalmente, por me agüentarem debaixo do mesmo teto!

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

Obrigado!

“Se encontrares um caminho sem obstáculos, pensa que esse talvez não te leve a nenhum lugar”.

Benjamin Franklin

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos.....	11
2 DESENVOLVIMENTO.....	12
2.1 Revisão Bibliográfica	12
2.2 Material e Métodos.....	19
2.2.1 Localização e instalação	19
2.2.2 Solo.....	20
2.2.2.1 Adubação	22
2.2.3 Teor de água inicial dos solos	23
2.2.4 Caracterização hidráulica dos solos.....	23
2.2.4.1 Curva de retenção da água no solo	23
2.2.4.2 Condutividade hidráulica.....	27
2.2.4.3 Potencial de fluxo matricial.....	27
2.2.5 Capacidade de vaso	28
2.2.6 Ventilação forçada.....	28
2.2.7 Unidades experimentais e delineamento	29
2.2.8 Planta	31
2.2.8.1 Manejo da planta	31
2.2.9 Deficiência hídrica.....	31
2.2.10 Área foliar.....	32
2.2.11 Comprimento de raiz	32
2.2.12 Densidade e área de raiz	34
2.2.13 Equipamentos micrometeorológicos	34
2.2.14 Medidas de fotossíntese líquida.....	34
2.2.15 Transpiração	35
2.2.16 Potencial de fluxo matricial crítico estimado por um modelo (M_{crit}^*).....	35
2.2.17 Relação M/M_{crit}	36

2.2.18 Solução analítica para a função $T_R(\theta)$ baseada na equação de Brooks e Corey	38
2.2.19 Modelagem da extração de água pelas raízes	38
2.2.20 Análise estatística	44
2.3 Resultados e Discussão	45
2.3.1 Transpiração observada e identificação do “ponto crítico”	45
2.3.1.1 Fotossíntese	53
2.3.2 Características das plantas relacionadas à extração de água do solo	57
2.3.2 Condições hidráulicas no ponto crítico	61
2.3.4 Transpiração relativa em função das variáveis hidráulicas do solo	74
2.3.4.1 Experimento versus previsão teórica	74
2.3.5 Potencial de fluxo matricial observado no experimento e simulado por modelo	87
2.3.6 Simulação da heterogeneidade na distribuição radicular	89
2.3.7 Considerações finais	103
3 CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	105
ANEXOS	113

RESUMO

Transpiração de plantas e condições hidráulicas do solo

Taxas de transpiração inferiores às taxas potenciais limitam o crescimento e desenvolvimento vegetal e ocorrem em solos que apresentam condições hidráulicas inadequadas para a manutenção do fluxo de água requerido em direção às raízes de uma planta. A pesquisa que resultou nesta tese teve como objetivos: estimar em quais condições hidráulicas se inicia a redução da taxa de transpiração, em termos de potencial de fluxo matricial (M_{crit}), teor de água (θ_{crit}), potencial matricial (h_{crit}) e condutividade hidráulica (K_{crit}), para diferentes solos e condições atmosféricas; demonstrar experimentalmente que M_{crit} é independente do tipo de solo e influenciado apenas pelas características radiculares e demanda atmosférica, ao contrário de θ_{crit} , h_{crit} e K_{crit} ; comparar valores de M_{crit} obtidos nos experimentos com respectivos valores de M_{crit} estimados por um modelo de extração de água do solo por raízes, para uma mesma densidade radicular; propor uma alternativa para a estimativa de θ_{crit} no solo, baseada na interrelação entre M , θ e h . O presente estudo conteve dois experimentos conduzidos em ambiente protegido, com plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas em vasos. O delineamento experimental utilizado, tanto no primeiro quanto no segundo experimento, foi o inteiramente casualizado com três repetições. Os tratamentos do primeiro experimento formaram uma combinação bifatorial 2x2 (solos: argiloso e arenoso; e regimes hídricos: sem e com deficiência hídrica) para as características das plantas e um fatorial (solos: argiloso e arenoso) para as condições hidráulicas críticas do solo. Para o segundo experimento os tratamentos tiveram uma combinação trifatorial 2x2x2 (solos: argiloso e arenoso; regimes hídricos: sem e com deficiência hídrica; e demandas atmosféricas: sem e com ventilação forçada) para as características das plantas e um bifatorial 2x2 (solos: argiloso e arenoso; e demandas atmosféricas: sem e com ventilação forçada) para as condições hidráulicas críticas. O ponto crítico (θ_{crit} , h_{crit} , K_{crit} e M_{crit}) foi identificado no dia anterior à transpiração relativa $T_R < 1$. Compararam-se os valores de T_R em função de θ , h , K e M observados no experimento (após o ponto crítico) com seus respectivos valores estimados por um modelo teórico, obtendo-se um bom ajuste. Verificaram-se diferenças na ordem de grandeza entre os valores de M_{crit} observados no experimento em relação aos estimados por modelo (M_{crit}^*), em que $M_{crit} > M_{crit}^*$. Em consequência disso, propôs-se uma alternativa para estimar as condições hidráulicas críticas para uma distribuição heterogênea da densidade radicular em frações de volume do solo. Os valores experimentais foram comparados aos obtidos pelo modelo, resultando nos índices RMSE (raiz do quadrado médio do erro), MAE (erro médio absoluto) e “d” (índice de concordância de Willmott). Os resultados evidenciaram que o M_{crit} pode ser utilizado para identificar o início da taxa de transpiração decrescente e da diminuição na fotossíntese líquida, em plantas de feijão. Os valores de M_{crit} podem ser transformados em θ_{crit} e h_{crit} , que são mais facilmente medidos em campo. A heterogeneidade na distribuição do sistema radicular no solo infere em diferentes valores de M_{crit} observados experimentalmente e obtidos por modelo. Pode-se estimar a T_R com base nos valores de M (após o ponto crítico) para uma distribuição heterogênea das densidades radiculares em frações de volume do solo. O melhor ajuste ocorreu quando uma menor densidade radicular ocupasse uma maior fração de volume do solo ($\approx 90\%$).

Palavras-chave: Taxa de transpiração decrescente; Condições hidráulicas críticas; Extração de água do solo por raízes; *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

Plant transpiration and soil hydraulic conditions

Transpiration lower than potential rates reduce plant productivity and occur in soils with hydraulic conditions that are inadequate to maintain the necessary water flux towards the plant roots. Soil physical models that describe root water uptake are an important tool to estimate this transpiration reduction. The research that resulted in this thesis aimed: to estimate under which hydraulic conditions occurs the onset of transpiration reduction in terms of matric flux potential (M_{crit}), water content (θ_{crit}), pressure head (h_{crit}) and hydraulic conductivity (K_{crit}) for different soil and atmospheric conditions; to demonstrate experimentally that M_{crit} is independent of soil properties and only influenced by root characteristics and atmospheric demand, on the contrary of θ_{crit} , h_{crit} e K_{crit} ; to compare values of M_{crit} obtained in the experiments with M_{crit} estimated by a root water uptake model at the same root length density; to estimate the onset of the falling rate phase from M_{crit} values; to propose an alternative to estimate θ_{crit} , based on the relationship among M , θ e h . The present study contained two greenhouse experiments with bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) in pots. A completely randomized design was used with three repetitions in both experiments. The treatments, in the first experiment, formed a factorial 2x2 combination (soils: loamy and sandy; and water regimes: irrigated and water deficit) for plant characteristics and a one-factorial was used for critical hydraulic conditions of the soil (soils: loamy and sandy). In the second experiment a 2x2x2 combination factorial was applied (soils: loamy and sandy; water regimes: irrigated and water deficit; and atmospheric demands: without and with forced ventilation) for plant characteristics and a 2x2 factorial (soils: loamy and sandy; and atmospheric demands: without and with forced ventilation) for the critical hydraulic conditions. The critical point (θ_{crit} , h_{crit} , K_{crit} and M_{crit}) was identified on the day previous to a relative transpiration $T_R < 1$. The T_R values as a function of θ , h , K and M observed in the experiments (after occurrence of critical conditions) were compared with values estimated by a model, resulting in a good fit. The experimental values (M_{crit}) and the model-estimated values (M_{crit}^*) were different, with $M_{crit} > M_{crit}^*$. A model was proposed to estimate the critical hydraulic conditions by heterogeneous distribution of root densities in soil volume fractions. The experimental and model-estimated M_{crit} were compared through the RMSE (root medium square error), MAE (medium absolute error) and "d" (agreement index of Willmott) indexes. The results showed that M_{crit} can be used to identify the onset of the falling rate phase referring to transpiration and liquid photosynthesis for the bean crop. The M_{crit} values can be transformed in θ_{crit} and h_{crit} , which are easily measured at field. The heterogeneous distribution of the root system in the soil caused different values of M_{crit} observed experimentally and M_{crit} obtained by the model. A good estimation of T_R was obtained through M values by using a heterogeneous distribution of root densities in the model. The best fit was obtained when a large soil volume fraction ($\approx 90\%$) was modeled with a small root density and the remaining 10% with a high root density.

Keywords: Falling rate transpiration; Critical hydraulic conditions; Root water uptake; *Phaseolus vulgaris* L.

1 INTRODUÇÃO

O solo é o reservatório natural de água para as plantas, porém, diversas práticas de manejo na agricultura afetam sua capacidade de armazenamento, direta ou indiretamente. É de interesse agrônômico estimar a quantidade de água que esse reservatório pode disponibilizar às plantas.

O conhecimento do fluxo de água no solo, principalmente na rizosfera, é fundamental para a determinação da disponibilidade de água às culturas e para o entendimento do processo de suprimento. O fluxo de água e o transporte de solutos entre o sistema solo-raiz, podem ser modelados numericamente contornando-se problemas relacionados com a heterogeneidade do solo, a não linearidade das propriedades físicas do solo, a não uniformidade da extração de água pelas raízes e as mudanças rápidas nas condições de contorno. Assim, a partir da modelagem da dinâmica da água na rizosfera pode-se estimar o conteúdo de água no solo denominado *crítico*.

A Lei de Darcy-Buckingham que descreve macroscopicamente o movimento da água em um meio poroso é amplamente utilizada no estudo do movimento da água no solo. Sua aplicação requer o conhecimento das características hidrodinâmicas do solo: (i) a relação entre o potencial matricial (h) e o teor de água no solo (θ), conhecida como curva de retenção da água no solo $\theta(h)$; e (ii) a relação entre a condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo, ou potencial matricial, $K(\theta, h)$.

A extração de água do solo por raízes depende das condições atmosféricas e da disponibilidade de água no solo, que por sua vez depende da resistência ao fluxo de água existente na interface solo-raiz e, também, das resistências do tecido radicular e do xilema. A diminuição do teor de água no solo na região da rizosfera provoca um fluxo de água vindo de regiões circunvizinhas. Esse fluxo depende do valor momentâneo da condutividade hidráulica dentro de um volume de solo circundando as raízes e do gradiente hidráulico existente entre o solo e a interface solo-raiz. Desta forma, o equilíbrio momentâneo entre o fluxo de água atual, num volume de solo circundando as raízes, e a taxa de extração de água potencial (que depende principalmente das condições atmosféricas momentâneas) determinam se aquele teor de água no solo atende a demanda hídrica das plantas.

Uma propriedade hidráulica do solo intimamente ligada ao movimento da água é o potencial de fluxo matricial ou potencial de Kirchhoff, que integra duas importantes grandezas que determinam o movimento da água no solo: a condutividade hidráulica (K) e o potencial matricial (h); descrevendo a integral de valores de $K(h)$ entre dois valores de h .

As condições hídricas críticas de um solo são definidas por condições limitantes ao movimento de água neste solo, portanto, ligados ao potencial de fluxo matricial.

Algumas plantas apresentam maior sensibilidade à falta de água, inferindo em estresse hídrico. O feijoeiro é uma planta de grande importância econômica no cenário nacional e possui a característica de ser sensível a deficiência hídrica.

Sendo assim, o presente estudo tem como hipóteses que: *i*) a capacidade de um solo fornecer água às plantas é determinada pelo seu potencial de fluxo matricial (M); *ii*) existe um potencial de fluxo matricial crítico (M_{crit}), abaixo do qual, o solo não consegue suprir a demanda de água para a transpiração e a planta apresenta deficiência hídrica momentânea; *iii*) o M_{crit} é dependente apenas da densidade e distribuição radicular e da demanda atmosférica, e independe das propriedades do solo.

1.1 Objetivos

Para testar as hipóteses, os objetivos específicos desta Tese são:

- i.* Estimar em quais condições hidráulicas se inicia a redução da taxa de transpiração, em termos de potencial de fluxo matricial (M_{crit}), teor de água no solo (θ_{crit}), potencial matricial (h_{crit}) e condutividade hidráulica (K_{crit}), para diferentes solos (argiloso e arenoso) e condições atmosféricas (demanda ambiental e alta demanda).
- ii.* Demonstrar experimentalmente que M_{crit} é independente das propriedades do solo e influenciado apenas pelas características radiculares e demanda atmosférica, ao contrário de θ_{crit} , h_{crit} e K_{crit} .
- iii.* Comparar valores de M_{crit} obtidos nos experimentos com respectivos valores de M_{crit} estimados por um modelo de extração de água do solo por raízes, para uma mesma densidade radicular.
- iv.* Propor uma alternativa, para a estimativa de θ_{crit} , baseada na interrelação entre M , θ e h .

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

Uma das etapas essenciais na produção vegetal é a assimilação de CO₂ do ar. Na superfície de trocas gasosas, ao mesmo tempo em que o CO₂ é absorvido, água evapora e difunde no ar. Estômatos são estruturas presentes em plantas superiores, que permitem a regulação da resistência ao fluxo de gases (vapor de água e CO₂), podendo reduzir o fluxo de água para a atmosfera (transpiração) sob condições de deficiência hídrica. Da mesma forma, o aumento da resistência causa a redução na assimilação de CO₂, ocasionando a diminuição da taxa fotossintética. A deficiência hídrica inibe a atividade fotossintética pela diminuição da assimilação de CO₂, causada pelo fechamento dos estômatos (SLAVIK, 1975; BOYER, 1976; SOUZA; SOARES; REGINA, 2001; TAIZ; ZEIGER, 2004). Outro efeito provocado pela reduzida taxa de transpiração é o aumento da temperatura do dossel das plantas, que pode levar a condições fisiologicamente adversas, como a desnaturação de proteínas (GARCIA et al., 2000).

O estresse provocado pela falta de água também reduz o crescimento, a partir da diminuição do tamanho das células e dos espaços intercelulares (HSIAO; ACEVEDO, 1974) e, com isso, pode-se explicar a redução na taxa de expansão foliar e, conseqüentemente, da área foliar em feijoeiro (LOPES et al., 1986). Além disto, a desidratação induz a abscisão foliar em virtude da aceleração da senescência (BOYER, 1976). Esses efeitos reduzem tanto o crescimento vegetativo das plantas quanto o reprodutivo, provocado pela diminuição de fotoassimilados disponíveis para a produção de fitomassa seca e sementes (LAWN, 1982; MARKHART, 1985).

Por estas razões, o teor e a capacidade de armazenagem de água no solo são decisivos para a produtividade agrícola, pois o regime pluviométrico é irregular na maior parte do mundo, o que torna a deficiência hídrica um dos fatores mais limitantes à agricultura. Esse fato demonstra a importância de manejos agrícolas adequados que possibilitem a utilização compatível com a disponibilidade dos recursos hídricos. Com relação a isso, existem inúmeros trabalhos publicados no mundo e no Brasil, sobre o estresse hídrico vegetal (CARLESSO, 1995; COSTA; MORISON; DENNETT, 1997; FIORIN; REINERT; ALBUQUERQUE, 1997; SOUZA et al., 2004).

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) possui grande importância econômica no cenário nacional, e será utilizada nesta tese como espécie vegetal. Costa, Lopes e Oliva (1991) evidenciaram que o efeito da deficiência hídrica modificou a morfologia das plantas de feijão,

reduzindo sua altura, número de folíolos, área foliar e os componentes da produção, trabalhando em uma faixa de potencial matricial entre -100 e -30 m.

O feijoeiro é mais sensível à deficiência de água no início da floração até o início da formação das vagens (FAGERIA; BALIGAR; JONES, 1991). Outros autores também corroboram que a fase de pré-florescimento, ou início do subperíodo reprodutivo entre R5 e R6, a partir do momento em que a planta apresenta ao menos uma flor aberta, é considerada crítica à deficiência de água (DOORENBOS; PRUITT, 1976; FANCELLI; DOURADO NETO, 1997, 2005). O consumo de água no estágio R5, por exemplo, varia entre 4,0 e 4,5 mm d⁻¹, podendo exceder 5 mm d⁻¹, quando as condições ambientais forem de intenso calor e de baixa umidade relativa do ar (CAIXETA, 1978). A fase de formação de vagens, que abrange o estágio R7, também é extremamente sensível à deficiência hídrica, pois pode provocar a diminuição da produtividade pela redução da fotossíntese e do metabolismo das plantas. Essa diminuição na produtividade foi de 38% no período efetivo de formação de vagens, conforme observado por Garrido, Purcino e Lima (1979). Podem contribuir também, para o aumento da queda de vagens imaturas (abortamento), além de causar a retração no tamanho das vagens em crescimento (FANCELLI; DOURADO NETO, 1997, 2005).

De acordo com Doorenbos et al. (1979), a necessidade de água requerida pelo feijoeiro com ciclo de 60 a 120 dias, varia entre 300 a 500 mm para obtenção de alta produtividade. Entretanto, Arf et al. (2004) conseguiram alta produtividade com lâminas de água menores, complementando o regime pluviométrico com irrigação (\approx 230 mm para um ciclo médio de 90 dias).

A água de irrigação deve atender à exigência hídrica da planta, que varia, principalmente, com as condições de clima do local, época de semeadura, cultivares e estádios de desenvolvimento da planta (KATTAN; FLEMING, 1956; PORTES, 1996; GUIMARÃES, 1996; MOREIRA; SILVEIRA; STONE, 1996; STONE; MOREIRA, 2000). Além disso, a quantidade de água no solo tem grande influência na disponibilidade dos nutrientes para as plantas (MALAVOLTA, 1980).

Mesmo que, a cultura do feijão seja cultivada em campo, torna-se importante ressaltar algumas informações a respeito de cultivos dentro de ambientes protegidos, os quais são amplamente utilizados em pesquisas, devido ao melhor controle das condições de contorno.

O que se nota em ambientes protegidos é o pequeno controle exercido pelos estômatos sobre a transpiração de uma cultura em casa-de-vegetação para altos valores de condutância estomática, ocorrendo normalmente durante o dia. Isso ocorre pela diminuição da demanda atmosférica no interior da casa-de-vegetação; neste caso, mantendo a oferta hídrica, ocorre diminuição da regulação estomática, ficando os estômatos abertos por mais tempo, o que aumenta a atividade fotossintética da planta, compensando as perdas oriundas da diminuição da radiação solar no interior da estufa (ALPI; TOGNONI, 1978; MARTINEZ GARCIA, 1986; AUBINET, DELTOUR; HALLEUX, 1989).

No interior da casa-de-vegetação a evapotranspiração é de 60 a 80% inferior àquela do ambiente externo, devido às alterações, principalmente, dos dois componentes fundamentais no processo: o energético e o aerodinâmico (STANGHELLINI, 1993; MARTINS; GONZALEZ, 1995). Isso, em função de a cobertura plástica reduzir a radiação solar incidente e a velocidade do vento no interior da estufa (VAN DER POST; VAN-SHIE; GRAAF, 1974; ROSENBERG; McKENNEY; MARTIN, 1989). Martins e Gonzalez (1995), trabalhando com plantas de feijão cultivadas em vasos, também concluíram que a casa-de-vegetação com cobertura plástica não é capaz, mesmo com o uso de sistema de ventilação, de superar condições adversas de alta temperatura em seu interior. Essas plantas apresentaram estresse, o qual foi evidenciado devido à baixa atividade fotossintética e a baixa condutância estomática, além de apresentarem temperatura foliar superior à temperatura no ambiente, um dia após a irrigação.

Os aspectos até aqui discutidos relatam as relações existentes entre a planta e o ambiente (atmosfera). Entretanto, um fator de igual relevância a ser considerado em um sistema agrícola, é o *solo*. O solo para os cultivos vegetais, pode ser visto como um reservatório de água e de nutrientes. Neste trabalho, serão abordados estudos de movimento da água no solo e extração de água do solo por raízes, os quais possuem relação direta com a deficiência hídrica em plantas cultivadas.

Modelos integrados de balanço hídrico e de crescimento vegetal buscam melhorar o manejo agrícola para minimizar a ocorrência de estresse hídrico. A descrição da extração da água do solo por raízes de plantas é um módulo essencial nesses modelos (FEDDES; BRESLER; NEUMAN, 1974; GARDNER, 1991; JONG VAN LIER; LIBARDI, 1997; WU; ZHANG; GUI, 1999; ZUO; ZHANG; 2002; JONG VAN LIER; METSELAAR; VAM DAM, 2006; METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007). A maior parte dos modelos se utiliza de um alto nível

de simplificação quanto às condições hídricas do solo, considerando 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 do qual a extração da água torna-se 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 et al., 1979; KROES; VAN DAM, 2003).

A modelagem do mecanismo de extração da água do solo pelas raízes pode ser uma ferramenta importante na estimativa mecanística da transpiração ou evapotranspiração em função do θ_{crit} ou h_{crit} . Nas últimas décadas, vários modelos foram desenvolvidos para essa finalidade. Entre esses, dois grandes grupos se distinguem: modelos que simulam a extração por uma raiz singular (modelos microscópicos) e os que consideram o sistema radicular como um todo (modelos macroscópicos). Os modelos macroscópicos consideram, em geral, que o sistema radicular seja uma unidade estratificada extratora de água (HUPET et al., 2002, 2003; ZUO; ZHANG, 2002; HOMAEE; FEDDES; DIRKSEN, 2002; DARDANELLI et al., 2004). A principal desvantagem desses modelos é que eles desconsideram o fato que a redução no teor de água ao redor das raízes pode levar a um aumento da resistência hidráulica próxima a elas, conforme modelo pioneiro de Gardner (1960), demonstrado experimentalmente por Hainsworth e Aylmore (1986).

Modelos microscópicos geralmente utilizam a equação de Darcy-Buckingham para descrever a extração radicular para cada raiz e podem descrever a extração em nível macroscópico, presumindo certa geometria e distribuição radicular (MOLDRUP et al., 1992; PERSONNE; PERRIER; TUZET, 2003; ROOSE; FOWLER, 2004).

De acordo com essa equação:

$$q = -K(\theta, h) \frac{dH}{dz} \quad (1)$$

em que q (m s^{-1}) é a densidade de fluxo da água no solo, K (m s^{-1}) é a condutividade hidráulica em função do teor de água θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e do potencial matricial h (m), H (m) é o potencial total composto pelos potenciais matricial e gravitacional; e z (m) é a distância. Considerando a conservação de massa e representando a extração da água do solo pelas raízes como sumidouro S ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$), obtém-se a equação da continuidade:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_z = - \left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_t - S = \frac{d\theta}{dt} = - \frac{dq}{dz} - S \quad (2)$$

em que t (s) é o tempo. A combinação das equações (1) e (2) resulta em

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left(K(\theta, h) \frac{dH}{dz} \right) - S \quad (3)$$

A eq. (3) é conhecida como a equação de Richards (1928) e o maior obstáculo para sua resolução está no desconhecimento da relação entre o termo S e h . O S pode ser descrito análogo à equação de Darcy-Buckingham, presumindo que a extração seja proporcional à condutividade hidráulica e ao gradiente do potencial total. Nesse caso, conforme introduzido por Gardner (1960):

$$S = BLK(h - h_r - Z) \quad (4)$$

em que B é um fator adimensional de distribuição geométrica: $B = 2\pi / [\ln(r_2/r_1)]$, sendo r_2 (m) a distância à raiz, r_1 (m) o raio da raiz, L (m m⁻³) é o comprimento radicular por unidade de volume de solo, h (m) e h_r (m) são os potenciais matriciais no solo e na superfície radicular e Z (m) é a profundidade do solo.

Considerando uma condutividade hidráulica fixa, a solução da eq. (4) pode ser facilmente obtida. Na realidade, deve-se supor uma redução do teor de água e, conseqüentemente, da condutividade hidráulica na proximidade imediata às raízes que extraem água do solo, conforme confirmado experimentalmente por Hainsworth e Aylmore (1986). Uma solução numérica para essa condição foi apresentada por Jong Van Lier e Libardi (1997) e Jong Van Lier, Metselaar e Vam Dam (2006).

A disponibilidade de água e de ar no solo, sob o ponto de vista dinâmico, deve contemplar a densidade de fluxo de água no solo, radialmente em direção às raízes (q , m d⁻¹), principal processo que define a magnitude das taxas de transpiração (m d⁻¹), a qual só será máxima (T_p , m d⁻¹) se a densidade de fluxo for suficiente para suprir a demanda. Assim, chama-se de θ_{crit} ou h_{crit} o valor de teor de água no solo ou potencial matricial limítrofe entre a fase de taxa constante e a fase de taxa decrescente da transpiração (Figura 1).

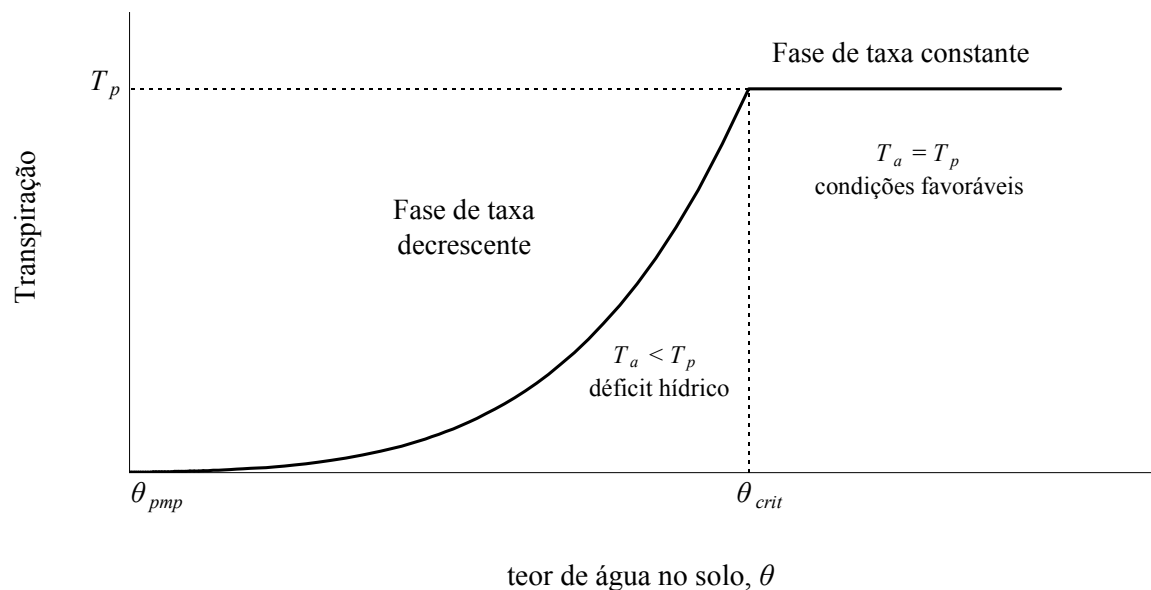


Figura 1 - Transpiração em função do teor de água no solo (θ) na fase de taxa constante ($\theta \geq \theta_{crit}$) e na fase de taxa decrescente ($\theta_{pmp} \leq \theta < \theta_{crit}$)

O potencial matricial corresponde ao ponto de murcha permanente (h_{pmp}) representa o valor limítrofe entre as condições hídricas em que o fluxo de água às raízes ainda é capaz ou tornou-se incapaz de suprir até mesmo as taxas muito pequenas de transpiração, que ocorrem com o total fechamento dos estômatos. Em outras palavras, h_{pmp} é o valor menos negativo de potencial matricial do solo em que a resistência estomática é máxima. Da mesma forma, o potencial matricial crítico (h_{crit}) é o valor de h limítrofe em que o fluxo de água do solo à raiz ainda é igual ao fluxo potencial. A partir desse valor os estômatos passam a apresentar resistência ao fluxo de vapor de água no sistema planta-atmosfera.

As condições hidráulicas críticas, ou limitantes, correspondem a densidades de fluxo críticas correlacionadas principalmente, mas não somente, a uma condutividade hidráulica crítica K_{crit} (equação de Darcy-Buckingham), mas também determinadas parcialmente por dH/dz e, portanto, por H e h nas condições específicas. Polak e Wallach (2001) e Li, Wallach e Cohen (2002) encontraram condutividades hidráulicas críticas relativas da ordem de grandeza de $0,001K_s$ (um milésimo da condutividade hidráulica do solo saturado).

Considerando que as alterações temporais e espaciais em θ e h , resultantes do movimento da água no solo, são descritas pela equação de Richards (1928), a extração de água por raízes de plantas é determinada, em parte, pela condutividade hidráulica. Por isso, alguns autores sugerem

ser mais apropriado expressar um limite crítico de extração de água por raízes e até mesmo o ponto de murcha permanente, a partir da condutividade hidráulica do solo ao invés de um teor de água ou de um potencial matricial fixo (POLAK; WALLACH, 2001; LI; WALLACH; COHEN, 2002; HULUGALLE; WILLATT, 1983).

Outros autores estudaram o movimento da água utilizando a condutividade hidráulica integrada em função do potencial matricial do solo (h), entre dois valores de h , tendo como h_{ref} de referência ou inicial, o potencial matricial no ponto de murcha permanente (RAATS, 1977; WARRICK; AMOOZEGAR-FARD, 1977; PULLAN, 1990; JONG VAN LIER et al., 2006; METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007). Esta propriedade foi definida por Gardner (1958) e é chamada de potencial de fluxo matricial (M).

Desconsiderando diferenças de outros potenciais, que não o matricial, a equação de Darcy-Buckingham se torna: $q = -K\nabla h$. Definindo $M = \int Kdh$, a equação de Darcy-Buckingham, para o fluxo devido apenas ao potencial matricial, pode ser escrita como: $q = -\nabla M$. Daí o M ser chamado também de potencial de fluxo matricial (RAATS, 1970).

As transformações de θ ou h em M , foram determinadas por Kirchhoff em meados de 1880, em suas conferências de condução de calor (KIRCHHOFF, 1894), por isso, são chamadas de transformações de Kirchhoff. Ainda, freqüentemente, M é chamado de potencial de Kirchhoff.

O M está sendo convenientemente utilizado em estudos de movimento da água no solo, pois une duas importantes grandezas relacionadas a esse movimento: a condutividade hidráulica e o potencial matricial (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAM DAM, 2006; METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007). Essas variáveis, por serem fortemente dependentes entre si, em aspectos que regem o movimento da água no solo, dificultam estudos de seu comportamento isolado, daí a importância de se ampliar o conceito do potencial de fluxo matricial.

Ao contrário de θ_{crit} ou h_{crit} , por hipótese, M_{crit} seria menos dependente do tipo de solo e, principalmente, varia apenas em função das características do sistema radicular e da demanda atmosférica. Essa independência do tipo de solo seria vantajosa para a modelagem, e a substituição de θ_{crit} ou h_{crit} por M_{crit} poderia ser proposta. No entanto, comparando com os dados de teor de água e de potencial matricial, a disponibilidade de valores de M ou mesmo de K são pequenas e de obtenção experimental difícil. Pode-se avançar nessa questão, a partir das funções de pedotransferência ou “pedotransfer functions”, as quais, de modo geral, são funções que

traduzem dados disponíveis em dados necessários. São basicamente equações de regressão estatística que expressam as relações entre as propriedades dos solos (BOUMA, 1989; HAMBLIM, 1991; RAWLS; GISH; BRAKENSIEK, 1991; WÖSTEN; PACHEPSKY; RAWLS, 2001).

Outros aspectos a serem resolvidos para o emprego de M_{crit} em modelos são as questões acerca da dependência entre os valores de M_{crit} , de densidade radicular, de demanda atmosférica e de outras condições do sistema planta-atmosfera.

A modelagem da extração da água do solo por raízes poderá permitir um avanço no entendimento da inter-relação entre variáveis do sistema, como demanda atmosférica e densidade radicular, que afetam os fluxos e os valores críticos dessas variáveis.

Desta forma, presume-se que a partir do potencial de fluxo matricial do solo (M) podem-se determinar as condições hidráulicas críticas, independentemente do solo, visando suprir as necessidades hídricas das plantas. A dependência de M em relação ao teor de água no solo pode ser encontrada quantitativamente por um modelo de extração radicular e, ainda, M é função apenas do sistema radicular e da demanda atmosférica.

2.2 Material e Métodos

Neste item são descritos os materiais e as metodologias empregadas em dois experimentos para verificar a relação entre a transpiração e a deficiência hídrica nas plantas, condições hidráulicas do solo e caracterização do sistema radicular. Os resultados experimentais foram utilizados para calibrar um modelo que permite estimar a extração de água do solo pelas raízes, para um sistema radicular com distribuição heterogênea.

2.2.1 Localização e instalação

O primeiro experimento foi instalado em uma casa-de-vegetação localizada no Departamento de Ciências Florestais (Figura 2; A e B); e o segundo experimento em uma casa-de-vegetação com cobertura plástica localizada no Laboratório de Fisiologia do Estresse (Figura 2; C e D); ambos localizados na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), em Piracicaba – SP, tendo como coordenadas geográficas: 22°42’ de latitude sul, 47°37’ de longitude oeste e 546 m de altitude.

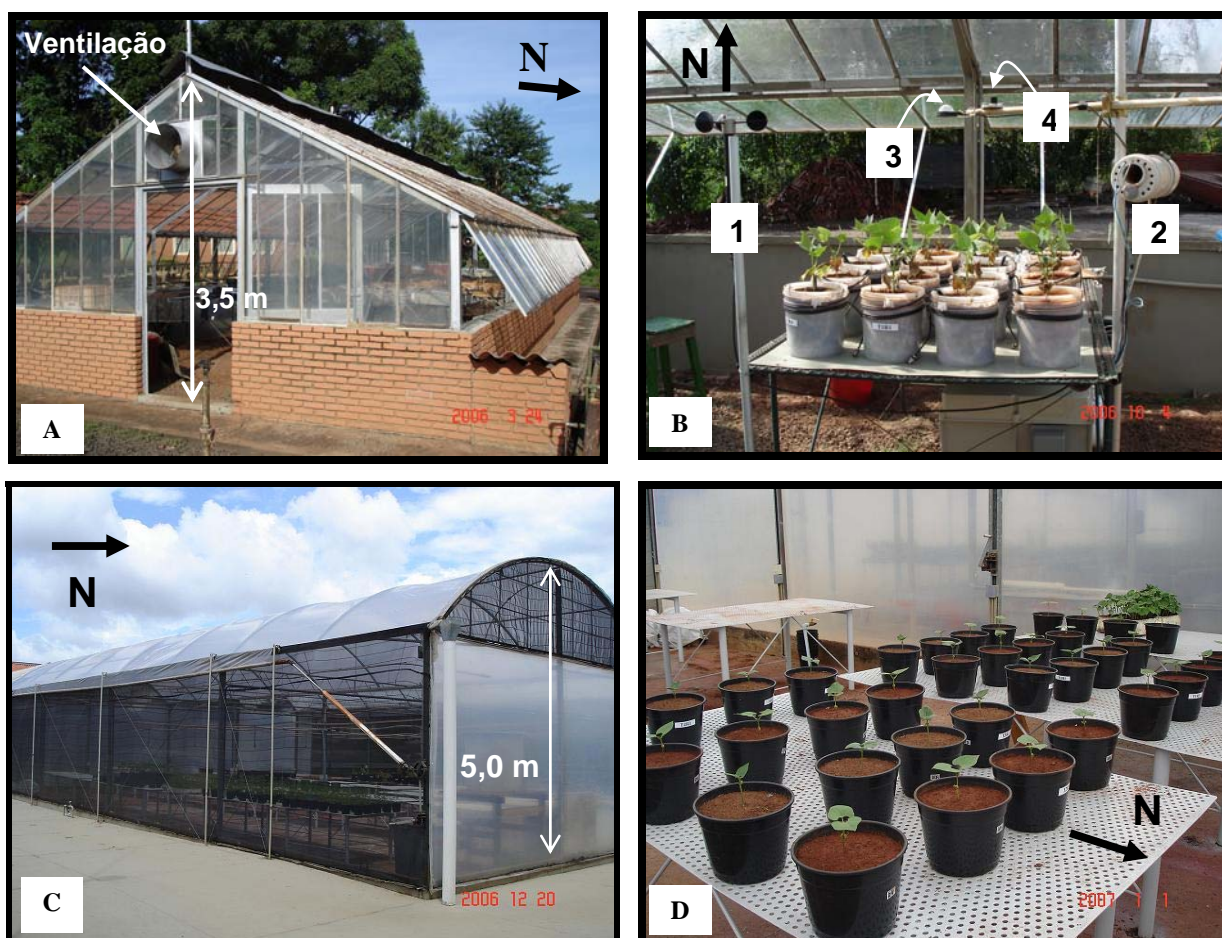


Figura 2 - Casa-de-vegetação onde foi conduzido o 1º experimento (A); vasos com plantas de feijão e equipamentos de medidas micrometeorológicas durante o 1º experimento: 1 = anemômetro, 2 = psicrômetro, 3 = saldo-radiômetro, 4 = quantômetro (B); casa-de-vegetação com cobertura plástica onde foi conduzido o 2º experimento (C); vasos com plantas de feijão em desenvolvimento no 2º experimento (D)

O primeiro experimento foi realizado sob condições de demanda atmosférica ambiental e o segundo, em casa-de-vegetação com cobertura plástica, sob demanda atmosférica ambiental e com ventilação forçada. O período experimental, com as plantas em ambiente protegido, foi de setembro a novembro de 2006 (1º experimento) e de abril a junho de 2007 (2º experimento).

2.2.2 Solo

Dois materiais de solos de diferentes classes texturais foram utilizados em cada experimento. Para o primeiro experimento utilizou-se material de um solo ARGISSOLO

VERMELHO Distrófico latossólico com textura muito argilosa (AG₁) e de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico com textura média (AR₁). No segundo experimento, os materiais de solo foram de um NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico com textura argilosa (AG₂) e de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico com textura arenosa (AR₂), conforme a classificação da EMBRAPA (1999). Suas características granulométricas e químicas foram determinadas no Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP (Tabelas 1 e 2, respectivamente).

Tabela 1 - Granulometria dos solos utilizados nos experimentos 1 e 2

	SOLOS			
	AG ₁ *	AR ₁	AG ₂	AR ₂
<i>Areia</i> (kg kg ⁻¹)				
Grossa	0,01	0,02	-	-
Média	0,04	0,22	-	-
Fina	0,12	0,40	-	-
Muito Fina	0,08	0,12	-	-
Total	0,25	0,76	0,39	0,80
<i>Silte</i> (kg kg ⁻¹)	0,12	0,04	0,08	0,06
<i>Argila</i> (kg kg ⁻¹)				
Total	0,63	0,20	0,53	0,14
em água	0	0,60	-	-
<i>Floculação</i> (kg kg ⁻¹)	1,0	0,70	-	-
<i>Classe textural</i>	Muito argilosa	Média	Argilosa	Arenosa

*AG₁ = ARGISSOLO VERMELHO; AR₁ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO; AG₂ = NITOSSOLO VERMELHO; AR₂ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO.

Tabela 2 - Resultado das análises químicas para os quatro materiais de solos utilizados nos experimentos 1 e 2

	SOLOS			
	AG ₁ *	AR ₁	AG ₂	AR ₂
Matéria orgânica (g dm ⁻³)	18,6	14,9	20,0	13,0
pH (SMP)	4,9	5,9	5,7	6,5
Saturação por bases (V%)	22,3	76,1	73,0	81,0
Alumínio (mmol _c dm ⁻³)	14,0	5,6	0	0
<i>Macronutrientes</i>				
Fósforo (mg dm ⁻³)	81,5	4,5	20,0	26,0
Enxofre (mg SO ₄ dm ⁻³)	55,5	17,1	1,0	-
Potássio (mmol _c dm ⁻³)	1,7	0,5	7,1	1,9
Cálcio (mmol _c dm ⁻³)	7,0	11,0	45,0	31,0
Magnésio (mmol _c dm ⁻³)	5,0	6,0	15,0	19,0
<i>Micronutrientes</i>				
	mg dm ⁻³			
Cobre	1,6	1,7	5,1	1,0
Zinco	0,54	1,10	1,60	1,50
Manganês	51,2	8,6	22,8	13,5
Boro	1,06	0,80	0,49	0,52
Ferro	33,7	60,8	13,0	7,0

*AG₁ = ARGISSOLO VERMELHO; AR₁ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO; AG₂ = NITOSSOLO VERMELHO; AR₂ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO.

2.2.2.1 Adubação

A adubação dos solos (Tabela 3) foi feita seguindo as normas de interpretação do Boletim Técnico 100 (RAIJ et al., 1997), para a cultura do feijão, baseando-se nos dados da análise química (Tabela 2).

Tabela 3 - Adubação aplicada nos quatro materiais de solo (no plantio)

Solos	Uréia (46% de N)	P ₂ O ₅	K ₂ O	Calcário
	kg m ⁻³			
AG ₁ *	0,01	-	0,01	-
AR ₁	0,01	0,035	0,025	0,405
AG ₂	0,01	0,015	-	-
AR ₂	0,01	0,015	0,025	-

*AG₁ = ARGISSOLO VERMELHO; AR₁ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO; AG₂ = NITOSSOLO VERMELHO; AR₂ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO.

Para a incorporação dos adubos, os solos foram colocados dentro de sacos plásticos com volume de 10 L, juntamente com a quantidade de adubo e calcário necessária. A mistura foi

sacudida manualmente por aproximadamente um minuto. Após a incorporação, o material foi colocado nos vasos, sem drenagem, onde se adicionaram 300 mL de água para facilitar as reações químicas entre os fertilizantes e o solo. As plantas foram transplantadas para os vasos sete dias após a adubação.

Os índices subscritos 1 e 2, para AG e AR, foram utilizados apenas no item material e métodos para diferenciar os materiais de solos referentes ao primeiro (1) e segundo experimento (2). No item resultados e discussão o referencial foi apenas de solo AG (argiloso) e solo AR (arenoso). A referência de primeiro ou segundo experimento foi colocada de forma textual.

2.2.3 Teor de água inicial dos solos

O teor de água inicial nos solos, a base de massa, foi determinado logo após a secagem ao ar, seguindo metodologia padrão. Observaram-se valores de 0,024 (AG₁); 0,0062 (AR₁); 0,018 (AG₂) e 0,0071 kg kg⁻¹ (AR₂).

2.2.4 Caracterização hidráulica dos solos

2.2.4.1 Curva de retenção da água no solo

Para a confecção das curvas de retenção da água foram coletadas oito amostras indeformadas, com anel volumétrico, diretamente nos vasos onde foram colocadas as plantas. As amostras foram submetidas a oito tensões, saturando-as novamente antes da aplicação de cada nova tensão. Para as tensões de 0,05 a 0,6 m foi utilizada a metodologia de mesa de tensão e para os valores acima destes a câmara de pressão de Richards (1949).

A eq. (5) descrita por Brooks e Corey (1964) foi ajustada aos dados da curva de retenção:

$$\Theta = \left(\frac{h_b}{h} \right)^\lambda \quad (5)$$

em que $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, θ , θ_r e θ_s são, respectivamente, o teor de água no solo em um dado momento, o valor residual e na saturação (m³ m⁻³); h é o potencial matricial (m); h_b (m) e λ são os parâmetros empíricos.

A Tabela 4 e a Figura 3 apresentam os resultados da curva de retenção da água no solo, para os solos utilizados nos ensaios referentes ao primeiro experimento (AG₁ e AR₁). Para o segundo experimento (AG₂ e AR₂), os resultados estão na Tabela 5 e na Figura 4.

Tabela 4 - Médias e desvios padrão do teor de água no solo (θ), baseados em oito observações em oito valores de potencial matricial (h) para os solos AG₁ e AR₁

h (m)	AG ₁		AR ₁	
	θ média (m ³ m ⁻³)	θ desvio padrão (m ³ m ⁻³)	θ média (m ³ m ⁻³)	θ desvio padrão (m ³ m ⁻³)
-0,05	0,5581	0,0103	0,4459	0,0124
-0,2	0,5203	0,0074	0,4158	0,0094
-0,6	0,4358	0,0094	0,3128	0,0186
-1,0	0,3960	0,0126	0,2539	0,0087
-3,3	0,3205	0,0127	0,1738	0,0072
-10	0,2629	0,0089	0,1268	0,0033
-30	0,2377	0,0084	0,1108	0,0044
-150	0,2183	0,0070	0,0965	0,0026

Tabela 5 - Médias e desvios padrão do teor de água no solo (θ), baseados em cinco observações em nove valores de potencial matricial (h) para os solos AG₂ e AR₂

h (m)	AG ₂		AR ₂	
	θ média (m ³ m ⁻³)	θ desvio padrão (m ³ m ⁻³)	θ média (m ³ m ⁻³)	θ desvio padrão (m ³ m ⁻³)
-0,1	0,3971	0,0102	0,3784	0,0145
-0,2	0,3705	0,0095	0,3477	0,0164
-0,4	0,3433	0,0163	0,3108	0,0136
-1,0	0,2477	0,0255	0,2547	0,0164
-3,0	0,2231	0,0301	0,2312	0,0178
-5,0	0,1860	0,0185	0,2098	0,0178
-10	0,1570	0,0236	0,1805	0,0143
-50	0,1181	0,0099	0,1423	0,0068
-150	0,1053	0,0024	0,1144	0,0086

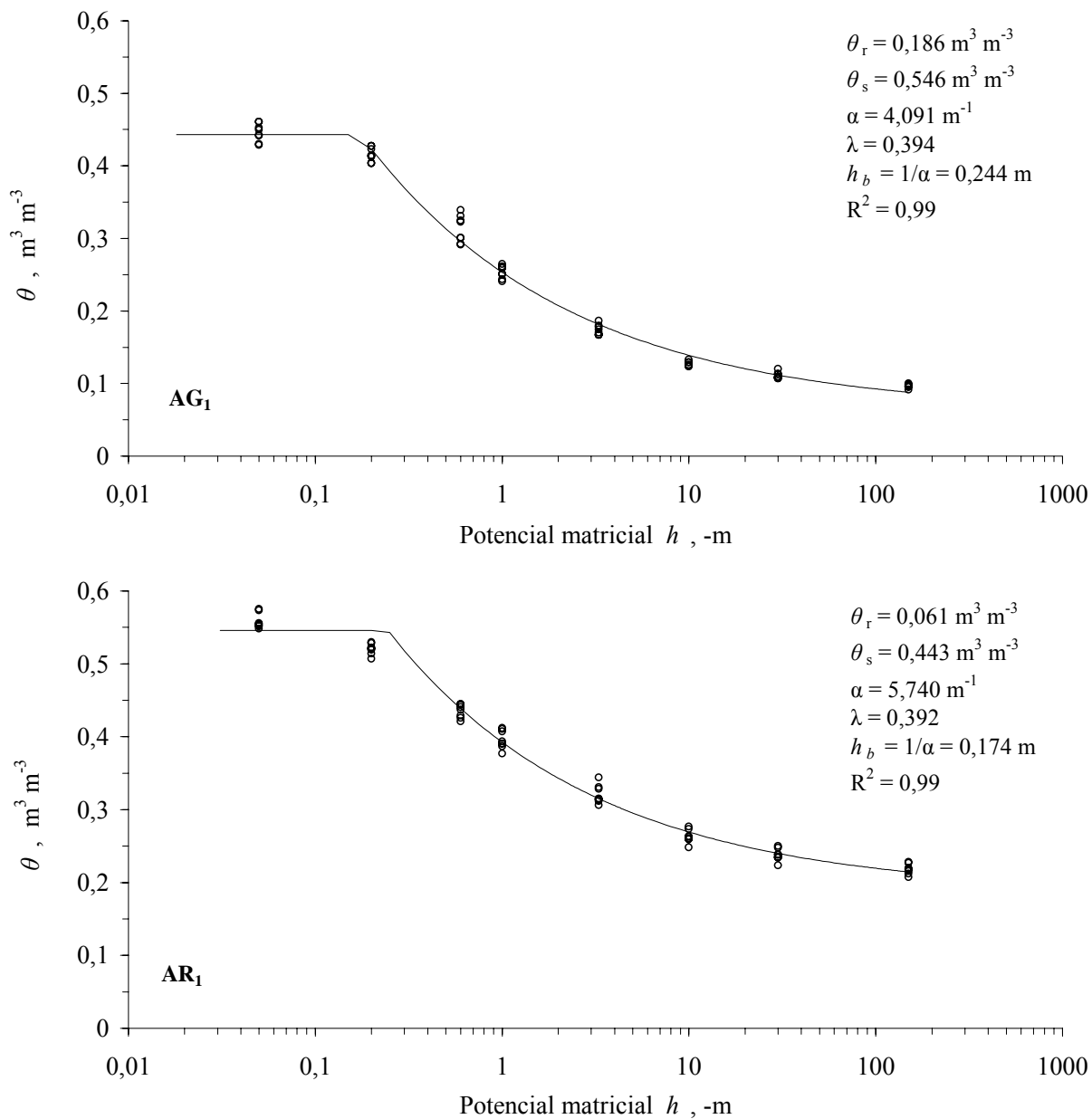


Figura 3 - Valores observados do teor de água θ em função do potencial matricial (pontos), curva de retenção da água no solo representada pela equação de Brooks e Corey (parâmetros válidos para $|h| > |h_b|$, para $h \leq h_b$ e $\theta = \theta_s$) ajustada (linha) e parâmetros de ajuste para os dois solos AG₁ e AR₁

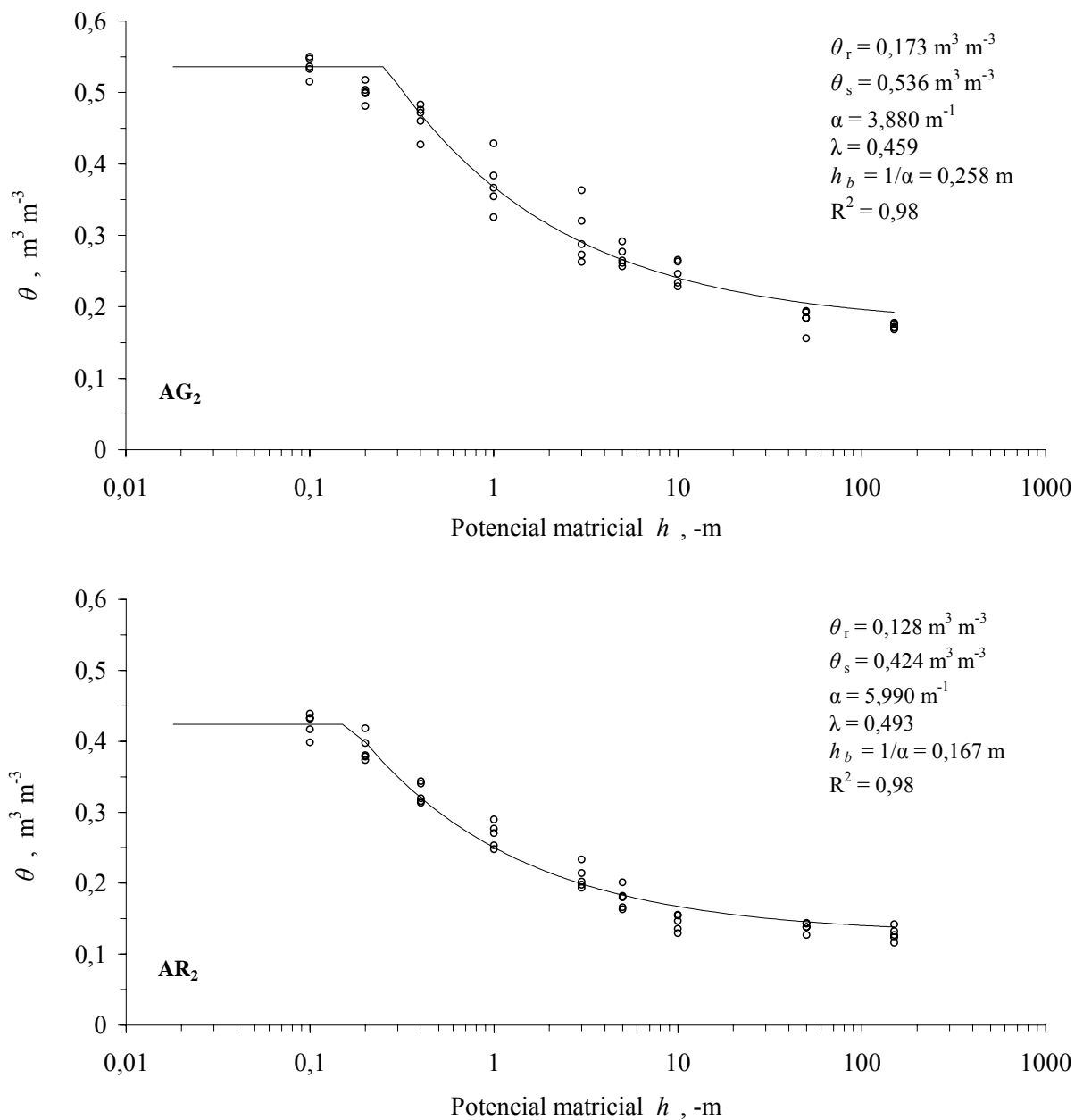


Figura 4 - Valores observados do teor de água θ em função do potencial matricial (pontos), curva de retenção da água no solo representada pela equação de Brooks e Corey (parâmetros válidos para $|h| > |h_b|$, para $h \leq h_b$ e $\theta = \theta_s$) ajustada (linha) e parâmetros de ajuste para os dois solos AG_2 e AR_2

2.2.4.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s , m d⁻¹) foi determinada em laboratório seguindo a metodologia do permeâmetro de carga constante. Para a coleta das amostras, primeiramente, foram preenchidos três vasos plásticos para cada tipo de solo, deixando-os na densidade a ser aplicada nos tratamentos. A partir disso, foram coletadas nove amostras de cada tipo de solo em cilindros de alumínio, com medidas de 0,05 m de altura e 0,04 m de diâmetro. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado (K_s , m d⁻¹), para os quatro materiais de solo

Solos	K_s (m d ⁻¹)	Desvio padrão (m d ⁻¹)
AG ₁ *	0,58	0,06
AR ₁	1,27	0,18
AG ₂	0,67	0,09
AR ₂	1,36	0,21

*AG₁ = ARGISSOLO VERMELHO; AR₁ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO; AG₂ = NITOSSOLO VERMELHO; AR₂ = ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO.

A partir do conhecimento de λ , h_b e K_s , é possível estimar a condutividade hidráulica pela eq. (6), proposta por Brooks e Corey (1964):

$$K(h) = K_s \left(\frac{h_b}{h} \right)^{2+3\lambda} \quad (6)$$

2.2.4.3 Potencial de fluxo matricial

O potencial de fluxo matricial (M , m² d⁻¹) foi definido por Gardner (1958) como a integral da condutividade hidráulica (K) entre o potencial matricial de referência (h_{ref}) e o potencial matricial da água do solo (h); ou, equivalentemente, pela integral da difusividade hidráulica (D) entre os valores de teor de água de referência (θ_{ref}) e o θ em questão:

$$M = \int_{h_{ref}}^h K(h)dh = \int_{\theta_{ref}}^{\theta} D(\theta)d\theta \quad (7)$$

A partir dessa definição, Burdine (1953) desenvolveu uma equação para estimativa de M , que mais tarde também foi descrita e utilizada por Brooks e Corey (1964). Essa equação foi

utilizada no presente estudo com M em função de h e obtendo valor igual à zero no ponto de murcha permanente ($h_{pmp} = -150$ m), que foi assumido como ponto de referência h_{ref} (eq. 8):

$$M(h) = -\frac{K_s h_b}{1 + 3\lambda} \left(\frac{h_b}{h}\right)^{1+3\lambda} - \left(\frac{h_b}{h_{ref}}\right)^{1+3\lambda} \quad (8)$$

2.2.5 Capacidade de vaso

A capacidade de vaso foi estimada para encontrar um teor de água no solo equivalente a “capacidade de campo”, a qual é frequentemente utilizada como limite superior de água disponível as plantas, servindo de meta na prática de irrigação.

No primeiro experimento a capacidade de vaso foi obtida a partir da curva de retenção da água no solo. Nessa foram observados os valores de θ nas tensões 3,44 m (1/3 bar) para o solo AG₁ e 1,03 m (1/10 bar) para o solo AR₁, resultando em 0,32 e 0,26 m³ m⁻³ para os solos AG₁ e AR₁, respectivamente.

Para o segundo experimento devido à curva de retenção estar ainda em fase de confecção, utilizaram-se os valores de 0,30 e 0,24 m³ m⁻³, para os solos AG₂ e AR₂, respectivamente, obtidos a partir de experimento de estabilização da drenagem dos solos nos vasos.

A determinação da capacidade de vaso sem o auxílio da curva de retenção foi realizada a partir de ensaios de drenagem dos solos em vasos, após a saturação com água. Para saturá-los, os vasos preenchidos com os dois materiais de solo foram colocados em uma caixa de água contendo uma lâmina de água de aproximadamente 2/3 da altura do vaso, por um período de 24 horas. Após esse período, os vasos foram colocados em uma bancada perfurada, sendo pesados a cada 12 horas até a drenagem tornar-se desprezível. A capacidade de vaso foi considerada ser igual à umidade do solo nesse instante (CASAROLI; JONG VAN LIER, 2007).

2.2.6 Ventilação forçada

Para o tratamento com ventilação forçada foi utilizado um ventilador ligado a um temporizador, o qual permitiu a intermitência do sistema. O sistema ligava às 9:00, às 10:30, às 14:30 e às 16:30 horas, permanecendo ligado, a cada vez, por 30 minutos. O ventilador foi instalado a aproximadamente 0,10 m (partindo da parte inferior das hélices) acima do dossel das

plantas, com um giro de aproximadamente 80 graus, suficiente para cobrir a área ocupada pelas plantas dispostas nesse tratamento. Este equipamento foi utilizado apenas no segundo experimento (dados da velocidade do vento encontram-se nos ANEXOS E e J).

2.2.7 Unidades experimentais e delineamento

O ensaio foi realizado em vasos plásticos de 0,20 m de altura e 4,0 L de volume, preenchidos com 4,91 e 5,63 kg dos solos AG₁ e AR₁, respectivamente, para o primeiro experimento. No segundo experimento, preencheram-se os vasos com 4,89 e 5,64 kg dos solos AG₂ e AR₂, respectivamente. Essas massas de solo correspondem a densidades de 1200 kg m⁻³ (solos com textura argilosa) e 1400 kg m⁻³ (solos com textura arenosa). Antes do preenchimento dos vasos, os solos foram secos ao ar e peneirados em peneira de 5 mm.

A semeadura foi realizada em bandeja plástica contendo 100 células. Após a emergência (2 dias), as plântulas foram transplantadas para os vasos.

O delineamento experimental utilizado tanto para o primeiro quanto para o segundo experimento foi o inteiramente casualizado. As análises foram realizadas com o auxílio do pacote estatístico SOC - NTIA (EMBRAPA, 1997).

Para a análise das características das plantas (área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz) os tratamentos do primeiro experimento formaram um esquema bifatorial 2x2, composto de duas classes texturais de solo (argilosa e arenosa) e dois regimes hídricos (sem e com deficiência hídrica), com três repetições. Para o segundo experimento os tratamentos formaram um esquema trifatorial 2x2x2, composto de duas classes texturais de solo (argilosa e arenosa), dois regimes hídricos (com e sem deficiência hídrica) e duas condições de demanda atmosférica: a demanda natural do ambiente (sem ventilação) e a demanda natural com ventilação forçada.

As condições hidráulicas críticas (θ_{crit} , h_{crit} , K_{crit} e M_{crit}) foram analisadas apenas nos tratamentos submetidos a deficiência hídrica. Desta forma, no primeiro experimento avaliaram-se essas condições comparando-as apenas entre solos (argiloso e arenoso). No entanto, no segundo experimento formou-se um esquema bifatorial 2x2, composto pelos dois solos (argiloso e arenoso) e pelas duas condições de demanda (sem e com ventilação).

Antes da aplicação do teste de comparação de médias as variáveis foram testadas quanto a sua normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk. Todas as variáveis mostraram uma distribuição

normal até atingir as condições hidráulicas críticas, exceto as variáveis condutividade hidráulica e potencial de fluxo matricial. Essas variáveis foram normalizadas, a partir da obtenção de seus valores logarítmicos, para posterior comparação de médias. O teste de Tukey foi utilizado para comparar médias, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

O primeiro experimento continha 16 vasos e o segundo 32 vasos, nos quais foi transplantada apenas uma planta por vaso (Figuras 5 e 6, respectivamente). Esses foram distribuídos ao acaso, em espaçamento de 0,35 m entre plantas e entre fileiras. Por se tratar de um delineamento inteiramente casualizado, os vasos foram trocados de lugar diariamente, para minimizar o possível efeito de diferentes intensidades de radiação solar dentro do ambiente protegido.

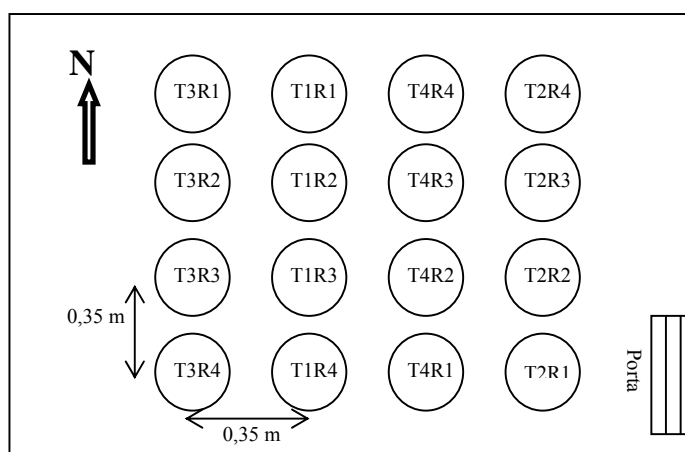


Figura 5 - Croqui do primeiro experimento

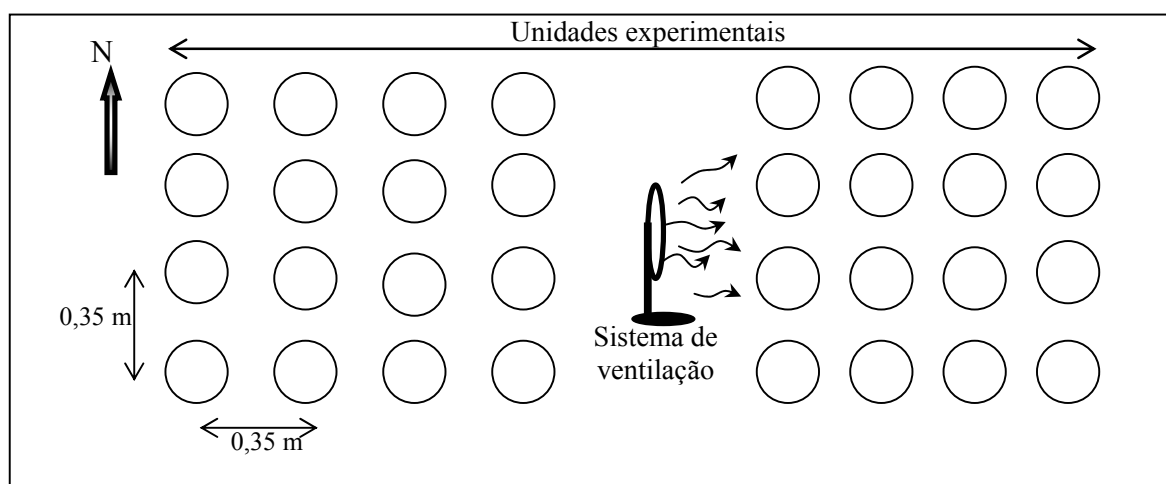


Figura 6 - Croqui do segundo experimento

2.2.8 Planta

Em ambos os experimentos foram utilizadas plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Pérola, cultivadas sob condições hídricas e nutricionais consideradas boas a seu crescimento e desenvolvimento, até as plantas se apresentarem no estágio fenológico de florescimento R6, em que 50% das plantas apresentam ao menos uma flor aberta.

Seguiram-se as normas de interpretação do Boletim Técnico 100 (RAIJ et al., 1997) para suprir as exigências nutricionais da cultura (item 2.2.2.1). Até este momento (estádio R6) as plantas eram irrigadas diariamente, de modo a repor as perdas de água devido à evapotranspiração, mantendo-se o solo na capacidade de vaso (item 2.2.5).

2.2.8.1 Manejo da planta

Foi realizada uma adubação de cobertura na quantidade de $0,035 \text{ kg m}^{-3}$, equivalente a 70 kg ha^{-1} , aos 20 dias após a emergência (DAE).

Por duas vezes, tanto no primeiro quanto no segundo experimento, foram necessárias aplicações de inseticida (Decis[®]), na quantidade de 0,8 mL para 5,0 L de solução, visando o controle de Trips e Pulgão. No primeiro experimento a primeira aplicação foi feita aos 18 dias após o transplante (DAT) e a segunda aos 28 DAT. Para o segundo experimento, essas aplicações foram realizadas aos 15 e aos 26 DAT.

Ainda, no segundo experimento foram realizadas três aplicações de acaricida (15 mL / 5 L de solução), aos 15, 21 e 28 DAT.

2.2.9 Deficiência hídrica

Para a aplicação do tratamento de deficiência hídrica, visando verificar a transpiração das plantas em função das condições hídricas do solo, foi utilizada a metodologia de Lisimetria para obtenção da perda de água diária pelo processo de transpiração. As observações foram realizadas com os vasos vedados em sua parte superior e inferior. Na parte superior foi utilizado um filme plástico colocado sobre o solo, contornando o caule da planta, de modo a minimizar as perdas de água por evaporação. Ainda, para evitar o aumento da temperatura no interior dos vasos e a formação de câmaras de ar entre o plástico e o solo dos vasos, foi colocada uma camada de terra seca ao ar, com aproximadamente 400 g, sobre o plástico, que impediu a incidência de radiação direta. Diariamente, às 18:00 horas foram realizadas medidas das massas desses vasos com

balança digital de 0,1 g de precisão. Isso foi feito até a estabilização da massa dos vasos, correspondente à cessão da transpiração. A fase do desenvolvimento em que os tratamentos se iniciaram foi o R6 (50% das plantas apresentando ao menos uma flor aberta), onde há uma máxima demanda evapotranspiratória devido ao máximo índice de área foliar, representando um momento de máxima sensibilidade à falta de água (FANCELLI; DOURADO NETO, 1997, 2005).

2.2.10 Área foliar

Ao final do experimento todas as folhas das plantas, a serem analisadas, foram cortadas e levadas em sacos plásticos ao laboratório, para a realização das medidas de área foliar. Utilizou-se um equipamento integrador de área, marca LI-COR, modelo 3100. Os resultados foram expressos em metros quadrados de área foliar (m²).

2.2.11 Comprimento de raiz

As raízes foram retiradas dos vasos e lavadas; logo após, foram armazenadas em câmara fria ($\approx 4^{\circ}\text{C}$) em solução alcoólica 10%, até sua análise. Subseqüentemente, uma imagem de aproximadamente 40% das raízes de cada planta foi digitalizada em “scanner”. As imagens, assim obtidas, foram analisadas por um programa para microcomputadores denominado SIARCS (Sistema integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo), desenvolvido pela EMBRAPA/CNPDIA (JORGE et al., 1994; JORGE, 1996), que estima os valores dos comprimentos das amostras das raízes avaliadas. A partir da relação entre a fitomassa seca e comprimento de raízes (Figuras 7 e 8), obteve-se o comprimento total das raízes.

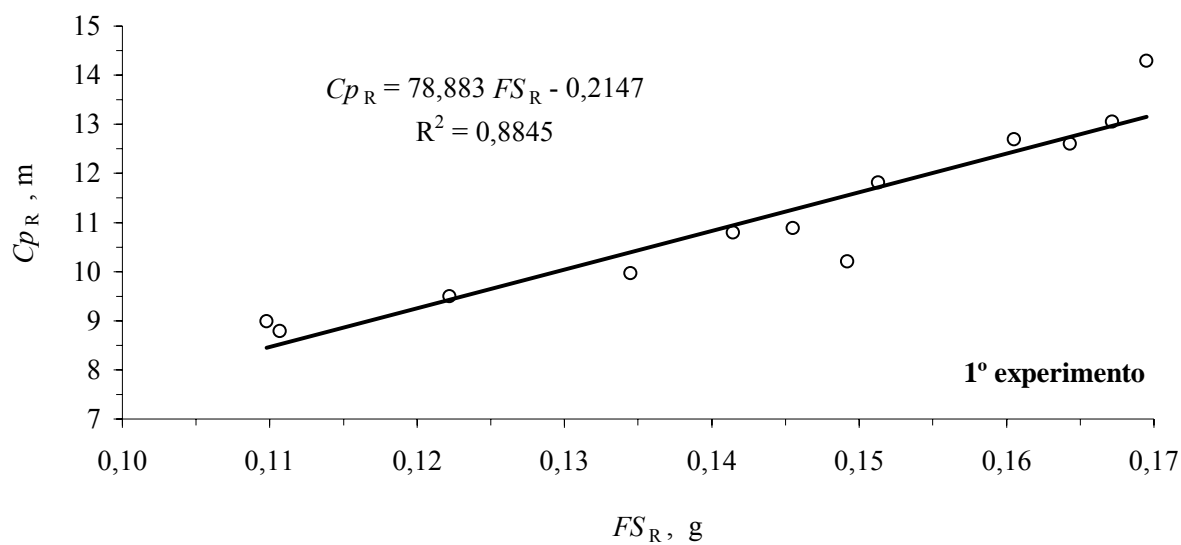


Figura 7 - Relação entre o comprimento de raiz (Cp_R) e a fitomassa seca de raiz (FS_R), para as subamostras avaliadas dos solos argiloso e arenoso, no primeiro experimento

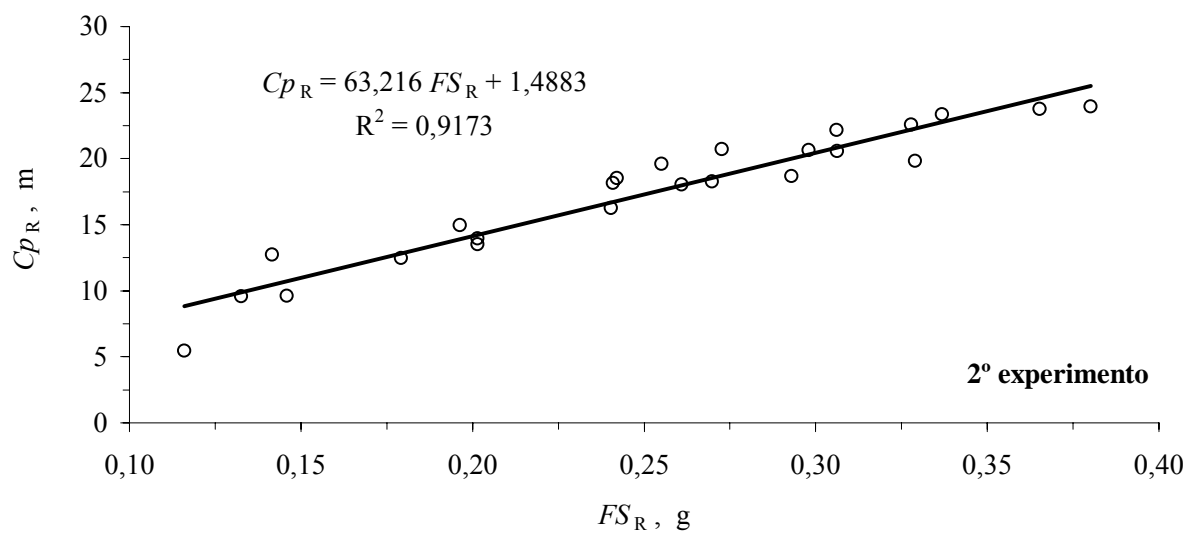


Figura 8 - Relação entre o comprimento de raiz (Cp_R) e a fitomassa seca de raiz (FS_R), para as subamostras avaliadas dos solos argiloso e arenoso, no primeiro experimento

2.2.12 Densidade e área de raiz

A densidade radicular (m m^{-3}) é a medida do comprimento de raiz, estimado no item anterior (2.2.11), em um volume de solo, o qual correspondeu ao volume preenchido nos vasos ($0,004 \text{ m}^3$).

A área de contato solo-raiz foi estimada utilizando-se a análise de imagem obtida pelo programa SIARCS (JORGE, 1996). Desta forma, as raízes foram colocadas em um “scanner” e o programa computacional SIARCS estimou a superfície das raízes. Com base nessa superfície (Sp) e com os dados de comprimento de raiz (L), estimou-se o raio médio de raiz (r_0) em que $r_0 = (Sp/L)/2$. A partir do raio médio pode-se estimar qual a área de absorção radicular (A), supondo que as raízes tenham formato cilíndrico. Sendo o perímetro $P = 2\pi r_0$; e $A = P L$.

2.2.13 Equipamentos micrometeorológicos

O anemômetro, o psicrômetro, o quantômetro e o saldo-radiômetro foram calibrados em relação aos mesmos equipamentos instalados na estação meteorológica da ESALQ/USP. Aqueles equipamentos permaneceram por um período de cinco dias instalados nessa estação meteorológica. Após esse período foram encontrados coeficientes de ajustes para cada um dos equipamentos.

Foram obtidos valores, nos dois experimentos, das seguintes variáveis micrometeorológicas: temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (UR, %), déficit de pressão de vapor (DPV, kPa), radiação fotossinteticamente ativa (PAR, W m^{-2}), saldo de radiação (R_n , W m^{-2}) e velocidade do vento (v , m s^{-1}). Os gráficos referentes a essas medidas, para os dois experimentos, estão apresentados nos ANEXOS de A até J.

2.2.14 Medidas de fotossíntese líquida

Esta medida foi realizada apenas no segundo experimento e para sua obtenção foi utilizado um medidor de trocas gasosas (CO_2 e água) denominado IRGA (*Infra-red Gas Analyzer*) ou “Analisador automático de fotossíntese LI-6400”. A fotossíntese líquida (F_s , $\mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$) serviu para auxiliar na interpretação dos resultados de transpiração relativa, como critério para identificação do ponto crítico.

Primeiramente, foram feitas duas curvas de luz, para uma planta cultivada em solo AG e outra em solo AR, selecionadas ao acaso, antes da aplicação dos tratamentos. Essa serviu para verificar qual o comportamento destas plantas em relação a esta variável.

As medidas de fotossíntese foram realizadas em uma planta por tratamento, totalizando oito plantas, efetuando-se duas medidas por planta (duas folhas/planta), sempre nas mesmas folhas (sadia, expandida e completamente exposta à radiação). As medidas eram realizadas a cada 48 horas, iniciando-se sempre no mesmo horário e na mesma seqüência de plantas (hora local = 8:30 h).

2.2.15 Transpiração

A taxa de transpiração, dada em mm d^{-1} (L de água / m^2 de área média do vaso/ dia), e o teor de água no solo em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, foram obtidos de medidas diárias pelo método de Lisimetria. Para isso, utilizou-se uma balança digital com resolução de 16 kg e precisão de 0,1 g. O início das condições hídricas críticas foi identificado entre tratamentos sem e com deficiência hídrica.

A partir da razão entre a taxa de transpiração diária, para cada planta submetida ao tratamento de deficiência hídrica (T_a = transpiração atual), e as médias da taxa de transpiração diária das três plantas mantidas irrigadas (T_p = transpiração potencial) obtiveram-se transpirações relativas diárias ($T_R = T_a / T_p$). Desta forma, as condições hidráulicas do solo consideradas críticas (θ_{crit} , h_{crit} , K_{crit} e M_{crit}) ou, “ponto crítico”, foram identificadas no primeiro dia anterior a $T_R < 1$, não retornando aos valores de $T_R > 1$, nos dias subsequentes.

2.2.16 Potencial de fluxo matricial crítico estimado por um modelo (M_{crit}^*)

Para fins de comparação com os valores de M_{crit} observados no experimento, foi estimado M_{crit}^* a partir do modelo descrito por Jong Van Lier, Metselaar e Van Dam (2006), seguindo a equação:

$$M_{crit}^* = T_p p r_m^q \quad (9)$$

com

$$r_m = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot R}} \quad (10)$$

Em que: M_{crit}^* ($m^2 d^{-1}$) é o potencial de fluxo matricial estimado pelo modelo, T_p ($m d^{-1}$) a taxa de transpiração potencial de cada planta, obtida da média da taxa de transpiração da planta até o momento do ponto crítico, p é um parâmetro empírico do modelo ($p = 23,5 m^{-q+1}$), r_m (m) é a distância radial média entre raízes estimada a partir da densidade radicular medida, q também é um parâmetro empírico do modelo ($q = 2,367$) e R ($m m^{-3}$) a densidade radicular.

Alternativamente, partindo dos valores de M_{crit} ($m^2 d^{-1}$) observados experimentalmente no ponto crítico, um valor correspondente de r_m (r_m^* , m) pode ser encontrado pela eq. (9), como sendo:

$$r_m^* = \left(\frac{M_{crit}}{T_p p} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (11)$$

2.2.17 Relação M/M_{crit}

Pela Lei de Darcy-Buckingham, a densidade de fluxo da água no solo é dada por:

$$q = -K \frac{dh}{dr} \quad (12)$$

em que K , h e r são, respectivamente, a condutividade hidráulica do solo, o potencial matricial do solo e a distância radial (m). Sabendo-se que por definição o M é descrito pela eq. (7), verifica-se que:

$$Kdh = dM \quad (13)$$

Desta forma, substituindo a eq. (13) na eq. (12), obtém-se:

$$q = -\frac{dM}{dr} \quad (14)$$

Assumindo que a taxa de transpiração potencial ocorre até o momento de atingir o ponto crítico ou para $M \geq M_{crit}$, portanto a densidade de fluxo atual (q_a) e potencial (q_p) são:

$$q_a = -\frac{T_a \overline{A_v}}{Ar} = -\frac{dM}{dr} \quad (15)$$

$$q_p = -\frac{T_p \overline{A_v}}{Ar} = -\frac{dM}{dr} \quad (16)$$

em que T_a (m), T_p (m), $\overline{A_v}$ (m²) e Ar (m²) são as taxas de transpiração atual e potencial, a área média do vaso e área radicular.

Sabendo que, na fase de taxa decrescente da transpiração para $\theta < \theta_{crit}$, o potencial de fluxo matricial na superfície radicular é $M_0 = 0$, e supondo que $\left. \frac{\partial M}{\partial t} \right|_r$ é proporcional a $M(r)$ a qualquer distância de raiz (METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007) obtém-se:

$$\frac{T_a}{T_p} = \frac{M}{M_{crit}} \quad \text{para } r_0 \leq r \leq r_m \text{ e } M \leq M_{crit} \quad (17)$$

Sendo o M_{crit} igual ao valor de M no ponto crítico ou limitante e r_0 (m) é o raio médio da raiz.

Pode-se dizer também que o potencial de fluxo matricial médio crítico do solo (\overline{M}_{crit}) ocorre a uma distância média de raízes correspondente a $0,53r_m$ (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006). Após a ocorrência de \overline{M}_{crit} , é possível verificar que $\left. \frac{dM}{dt} \right|_r$ é linearmente proporcional a r (Figura 9).

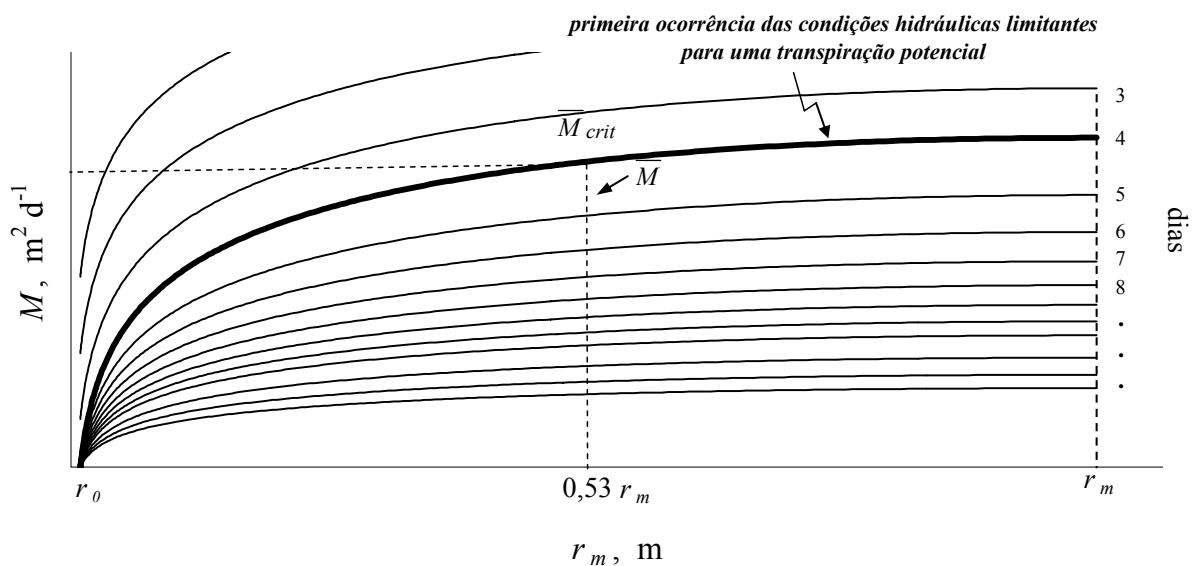


Figura 9 - Potencial de fluxo matricial (M) em função da distância média de raízes (r_m)

2.2.18 Solução analítica para a função $T_R(\theta)$ baseada na equação de Brooks e Corey

Baseado na eq. (17), Metselaar e Jong Van Lier (2007) demonstraram que, em solos cuja curva de retenção é descrita pela equação de Brooks e Corey (eq. 5), a transpiração relativa é função do teor de água, conforme:

$$T_R = \frac{\Theta^P - \Theta_{pmp}^P}{\Theta_{crit}^P - \Theta_{pmp}^P} \quad (18)$$

em que $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ e θ , θ_r e θ_s são o teor de água no solo, o teor de água residual e de saturação, respectivamente. O valor de $P = 3 + 1/\lambda$, em que λ é o parâmetro empírico da equação da curva de retenção de Brooks e Corey (1964). Θ_{crit} e Θ_{pmp} representam os valores de Θ para $\theta = \theta_{crit}$ e $\theta = \theta_{pmp}$.

A partir da eq. (18), conjuntamente com as equações (5), (6) e (8) foram obtidos valores teóricos de T_R em função de θ , h , K e M .

2.2.19 Modelagem da extração de água pelas raízes

Jong Van Lier, Metselaar e Van Dam (2006) e Schröder et al. (2007), considerando uma distribuição uniforme do sistema radicular, demonstraram que:

$$M - M_o = \frac{T_p}{2z} \left[\frac{r_0^2 - r^2}{2} + (r_m^2 + r_0^2) \ln \frac{r}{r_0} \right] \quad (19)$$

Em que: M ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$) é o potencial de fluxo matricial do solo, M_o ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$) o potencial de fluxo matricial do solo na superfície radicular, T_p ($\text{m} \text{d}^{-1}$) a taxa de transpiração potencial, z (m) a profundidade radicular, r_0 (m) o raio da raiz, r (m) a distância radial da superfície radicular em que se atinge o ponto crítico ou fase de taxa de transpiração decrescente, baseada na equação da continuidade e r_m (m) a distância média entre raízes.

Metselaar e Jong Van Lier (2007) demonstraram, por análise numérica, que $M(r)$ sob condições hidráulicas limitantes possui o mesmo formato para condições não limitantes, podendo ser descritas com uma expressão equivalente a eq. (19), sendo T_p substituído pela transpiração atual T_a e M_o pelo potencial de fluxo matricial no ponto de murcha permanente (M_{pmp} , $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$) o qual por definição é igual a zero:

$$M = \frac{T_a}{2z} \left[\frac{r_0^2 - r^2}{2} + (r_m^2 + r_0^2) \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \right] \quad (20)$$

No presente estudo, observou-se que os valores de r_m e r_m^* diferiram significativamente, o que indica uma distribuição heterogênea das raízes. Uma forma de incorporar a heterogeneidade da distribuição radicular ao modelo de Jong Van Lier, Metselaar e Van Dam (2006) é a divisão do volume de solo em duas ou mais frações do volume f , nas quais se supõem densidades radiculares uniformes. Assim, a eq. (19) foi aplicada em cada uma dessas frações, substituindo o termo T_p/z pela extração de água por raízes em cada fração, S_f ($\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$):

$$M_f - M_{0,f} = \frac{S_f}{2} \left[\frac{r_{0,f}^2 - r^2}{2} + (r_{m,f}^2 + r_{0,f}^2) \ln \left(\frac{r}{r_{0,f}} \right) \right] \quad (21)$$

Na qual, o índice f se refere ao número de ordem da fração.

Partindo da superfície radicular, tem-se uma distância radial \bar{r} (m) na qual o teor de água no solo é igual ao teor de água médio na região da rizosfera, correspondendo a um valor de potencial de fluxo matricial \bar{M} ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$).

Ainda, um coeficiente a_z foi definido como:

$$a_z = \frac{\bar{r}_z}{r_{m,z}} \quad (22)$$

Utilizando um método analítico, o valor de a pode ser mostrado igual a $e^{-1/2}$ ($\approx 0,607$), supondo difusividade constante (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006). Para solos que seguem funções hidráulicas caracterizadas pela equação de Van Genuchten (1980), aqueles autores apresentaram a partir de simulações numéricas, que o valor de a é ligeiramente menor ($0,56 \pm 0,06$; com valor mediano de 0,53).

Substituindo \bar{M} e \bar{r} na eq. (21) e incorporando a eq. (22) tem-se:

$$\bar{M}_f - M_{0,f} = \frac{S_f}{2} \left[\frac{r_{0,f}^2 - a_f^2 r_{m,f}^2}{2} + (r_{m,f}^2 + r_{0,f}^2) \ln \left(\frac{a_f r_{m,f}}{r_{0,f}} \right) \right] \quad (23)$$

Reescrevendo a eq. (23) resulta em

$$S_f = \frac{4(\bar{M}_f - M_{0,f})}{r_{0,f}^2 - a_f^2 r_{m,f}^2 + 2(r_{m,f}^2 + r_{0,f}^2) \ln\left(\frac{a_f r_{m,f}}{r_{0,f}}\right)} = \rho_f (\bar{M}_f - M_{0,f}) \quad (24)$$

em que ρ_f (m⁻²) é definido como:

$$\rho_f = \frac{4}{r_{0,f}^2 - a_f^2 r_{m,f}^2 + 2(r_{m,f}^2 + r_{0,f}^2) \ln\left(\frac{a_f r_{m,f}}{r_{0,f}}\right)} \quad (25)$$

A integral da extração de água pelas raízes em todas as frações F , resulta na transpiração total T_a :

$$T_a = \sum_{f=1}^F S_f w_f = z \sum_{f=1}^F \rho_f (\bar{M}_f - M_{0,f}) \quad (26)$$

Como pode ser observado nas equações (24) e (25), ρ_f 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_f , $r_{0,f}$ e $r_{m,f}$.

Valores de $r_{m,f}$ estão relacionados a densidade radicular R_f . Devido à pequena faixa de variação do parâmetro a , encontrado em estudo numérico, a foi considerado no presente estudo independente da fração, com valor igual a 0,53 (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006).

Ainda, para este estudo, um valor constante de raio de raiz foi utilizado: $r_0 = 0,05$ mm. Pois, demonstrou-se que o modelo é pouco sensível ao valor de r_0 (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006).

A eq. (24) apresenta que S_f , a extração radicular numa determinada fração do volume do solo, é dependente de ρ_f , \bar{M}_f e $M_{pmp,f}$. O ρ_f pode ser calculado reescrevendo-se a eq. (25) e assumindo valores de r_0 e a independentes da fração:

$$\rho_f = \frac{4}{r_0^2 - a^2 r_{m,f}^2 + 2(r_{m,f}^2 + r_0^2) \ln\left(\frac{a r_{m,f}}{r_0}\right)} \quad (27)$$

O valor de \bar{M}_f é uma função das propriedades hidráulicas, que deixa M_{0f} como um parâmetro desconhecido. Assumindo que o valor de M_{0f} é igual em qualquer fração, pode-se determinar o valor de M_0 e da taxa de transpiração a partir dos valores conhecidos de ρ_f , \bar{M}_f .

Essa situação encontra-se ilustrada na Figura 10, observando-se uma fração do solo com maior densidade radicular (menor distância entre raízes) e outra fração com menor densidade (maior distância entre raízes). O potencial de fluxo matricial na superfície das raízes é zero, e verifica-se que o valor médio de M entre as raízes é menor na fração com alta densidade radicular (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006).

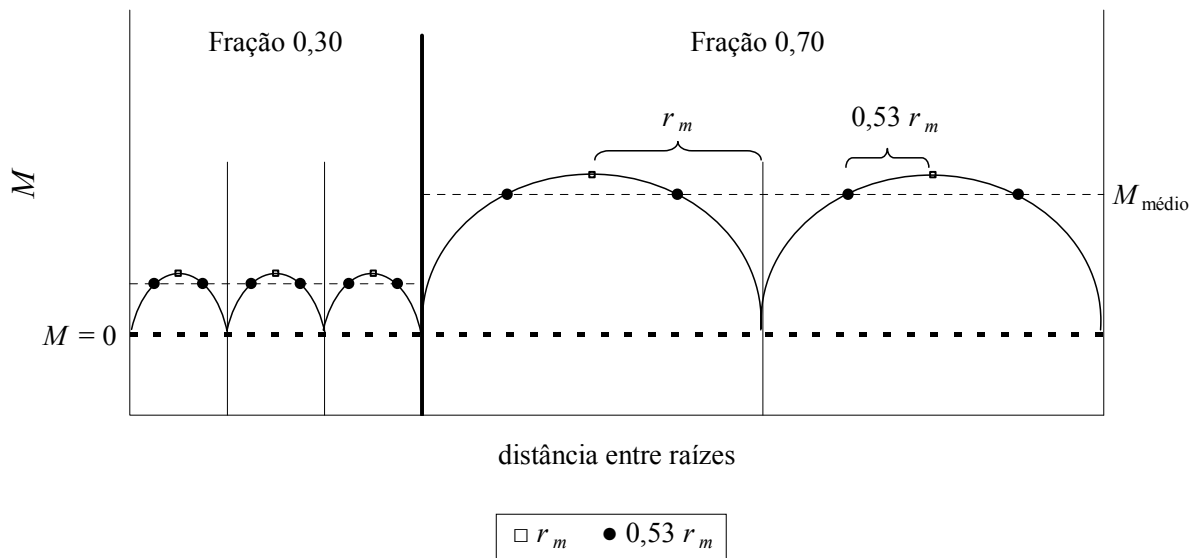


Figura 10 - Representação esquemática do potencial de fluxo matricial (M) no solo entre as raízes, supondo-se uma fração do solo ocupada por uma alta densidade radicular e outra fração com baixa densidade radicular

O procedimento utilizado para calcular a extração de água por raízes foi o seguinte: primeiro, utilizou-se a eq. (26) para calcular a taxa de transpiração máxima (T_m , m d^{-1}) que poderia ser alcançada num dado teor de água no solo e densidade radicular, para o mais negativo potencial na superfície radicular, como exemplo, h_{pmp} e $M_{pmp,f} = M_{pmp} = 0$. O valor de T_m é então comparado a uma independente medida ou estimativa de T_p . Desta maneira, dois casos podem ocorrer:

1. Se o valor calculado de T_m for menor que T_p , ocorre o estresse. Neste caso, a suposição de que $M_0 = 0$ é aceita, $T_a = T_m$ e a eq. (24) é usada para calcular a extração de água em cada

fração do volume de solo. O mesmo acontece quando T_m se iguala exatamente aos valores de T_p , e as condições hidráulicas estão exatamente no início das condições limitantes ou críticas.

2. Se o valor calculado de T_m é maior que T_p , não há estresse. Assim, M_0 é maior que zero, e seu valor pode ser calculado pela eq. (26) com $T_a = T_p$:

$$M_0 = \frac{-T_p + z \sum_{f=1}^F \rho_f \bar{M}_f}{z \sum_{f=1}^F \rho_f} \quad (28)$$

Subseqüentemente, a substituição de M_0 na eq. (24) permite calcular a extração de água para cada fração do volume de solo.

A taxa de transpiração potencial (T_p) utilizada foi calculada a partir dos dados experimentais seguindo a eq. (29):

$$T_p = \bar{T}_p \cdot C_T \quad (29)$$

O valor de \bar{T}_p é a taxa de transpiração média diária obtida dos três vasos mantidos irrigados, para cada tipo de solo. O valor de C_T é um fator para corrigir as diferentes transpirações potenciais entre as plantas, calculado como:

$$C_T = \frac{\sum_{i=1}^{d_{crit}} T_a}{\sum_{i=1}^{d_{crit}} T_p} \quad (30)$$

em que d_{crit} é o número de ordem do dia em que o ponto crítico foi identificado.

Para determinar os valores das frações volumétricas e respectivas densidades radiculares que, aplicando-se o procedimento de cálculo descrito resultam em maior semelhança com os dados experimentais, uma rotina computacional foi elaborada. O volume total do solo foi dividido em duas frações f (f_1 e f_2), com respectivas densidades radiculares (R_1 e R_2). Procuraram-se os valores de R e f com a menor soma dos quadrados médios dos erros ($SQMe$) entre o modelo e o experimento:

$$SQMe = \frac{\sum (\theta_E - \theta_M)^2}{n} \quad (31)$$

No qual, θ_E e θ_M são os valores de teor de água estimados pelo modelo e medidos no experimento, respectivamente; e n é o número de observações.

A rotina realiza uma “varredura” por tentativa e erro, checando todas as combinações de f e R em um determinado intervalo. Para a determinação de f_1 a sub-rotina utiliza primeiramente um passo de 0,01 entre os valores de 0,1 a 0,9 e, subsequentemente, até a quarta casa decimal. A partir dos valores de f_1 obtêm-se os valores de f_2 :

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (32)$$

Semelhantemente, para cada conjunto de valores f_1 e f_2 , a seqüência de valores de R é calculada como:

$$R_1 = \bar{R} 10^x \quad (33)$$

em que \bar{R} é a densidade radicular média observada no experimento e x varia de -2 a $-\log(f_1) = \log \frac{1}{f_1}$, com passo incremental de 0,1. O valor máximo é $-\log(f_1)$, pois valores maiores impossibilitariam encontrar um R_2 tal que a densidade radicular média fosse igual ao seu valor experimental, conforme se comprova a seguir. A densidade radicular na fração 2 (R_2) é expressa como:

$$R_2 = \frac{\bar{R} - f_1 R_1}{f_2} \quad (34)$$

Assim, $\bar{R} - f_1 R_1 > 0 \Rightarrow f_1 R_1 < \bar{R} \Rightarrow f_1 < \frac{\bar{R}}{R_1}$ ou, ainda, $R_1 < \frac{\bar{R}}{f_1}$. Como $R_1 = \bar{R} 10^x$ tem-se

que $10^x < \frac{1}{f_1}$, logo $x < -\log(f_1)$ ou $x < \log \frac{1}{f_1}$.

2.2.20 Análise estatística

a) Soma dos quadrados médios dos erros (RMSE) e erro médio absoluto (MAE)

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}}{n} \quad (35)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - M_i|}{n} \quad (36)$$

Em que E_i , M_i e n são, respectivamente, os valores estimados, medidos e o número de observações.

b) Índice de concordância “d” de Willmott

Willmott (1982, 1984) buscou superar a insensibilidade das medidas baseadas na correlação e variâncias entre valores observados e estimados, a partir de um índice de concordância dado por:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(|E_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}| \right)^2} \quad (37)$$

Em que E_i , M_i , \bar{M} e n são, respectivamente, os valores estimados, medidos, média dos valores medidos e o número de observações. O Índice de concordância varia de 0,0 (modelo pobre) a 1,0 (modelo perfeito), semelhante à interpretação do Coeficiente de Determinação (R^2). O Índice de Concordância representa uma melhoria na interpretação dos resultados em relação ao Coeficiente de Determinação, pois é sensível a valores extremos, devido às diferenças ao quadrado (LEGATES; MCCABE, 1999).

c) Teste t de Student

Para a comparação de duas médias com distribuição normal utilizou-se o teste t de Student ao nível de 1% de probabilidade de erro.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Transpiração observada e identificação do “ponto crítico”

As taxas de transpiração observadas no primeiro experimento (Figura 11) nas plantas sem deficiência hídrica variaram pouco ao longo do período experimental e foram da ordem de 2 mm d^{-1} no solo AG e de 3 mm d^{-1} para o solo AR. No segundo experimento (Figuras 12 e 13) essas taxas variaram mais ao longo do tempo, devido às variações micrometeorológicas. Nesse experimento verificou-se, no sexto dia de avaliação, uma queda abrupta nas taxas de transpiração em todas as plantas. Isso pode ter sido provocado devido a este dia (dia 02/06/2007) ter estado nublado e com chuva, mostrando diferenças em suas variáveis micrometeorológicas em relação aos demais dias: a temperatura máxima foi da ordem de $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, inferior às máximas registradas nos outros dias; umidade relativa do ar acima de 80%; déficit de pressão de vapor atingindo seu máximo a valores de aproximadamente $0,5 \text{ kPa}$, que foi menor aos pontos de máxima dos demais dias, que variaram de $1,5$ a $2,5 \text{ kPa}$. A radiação fotossinteticamente ativa e o saldo de radiação também mostraram seus valores máximos inferiores (40 e 50 W m^{-2} , respectivamente) aos encontrados nos demais dias de avaliação (120 e 350 W m^{-2} , respectivamente). Esses dados apresentam-se com maior detalhamento nos gráficos dos ANEXOS de A até J.

Os valores da transpiração relativa (T_R) das plantas submetidas à deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6 de cada experimento) e tipo de solo (argiloso e arenoso) estão na Figura 14 (1º experimento) e nas Figuras 15 e 16 (2º experimento). Valores de $T_R > 1$ foram frequentes nos primeiros dias dos experimentos em ambos os solos. O fato das plantas submetidas ao tratamento de deficiência hídrica ter apresentado antes da ocorrência das condições hidráulicas críticas, taxas de transpiração maiores em relação às mantidas irrigadas, pode ser explicado pelas características das plantas, discutido mais adiante no item 2.3.2.

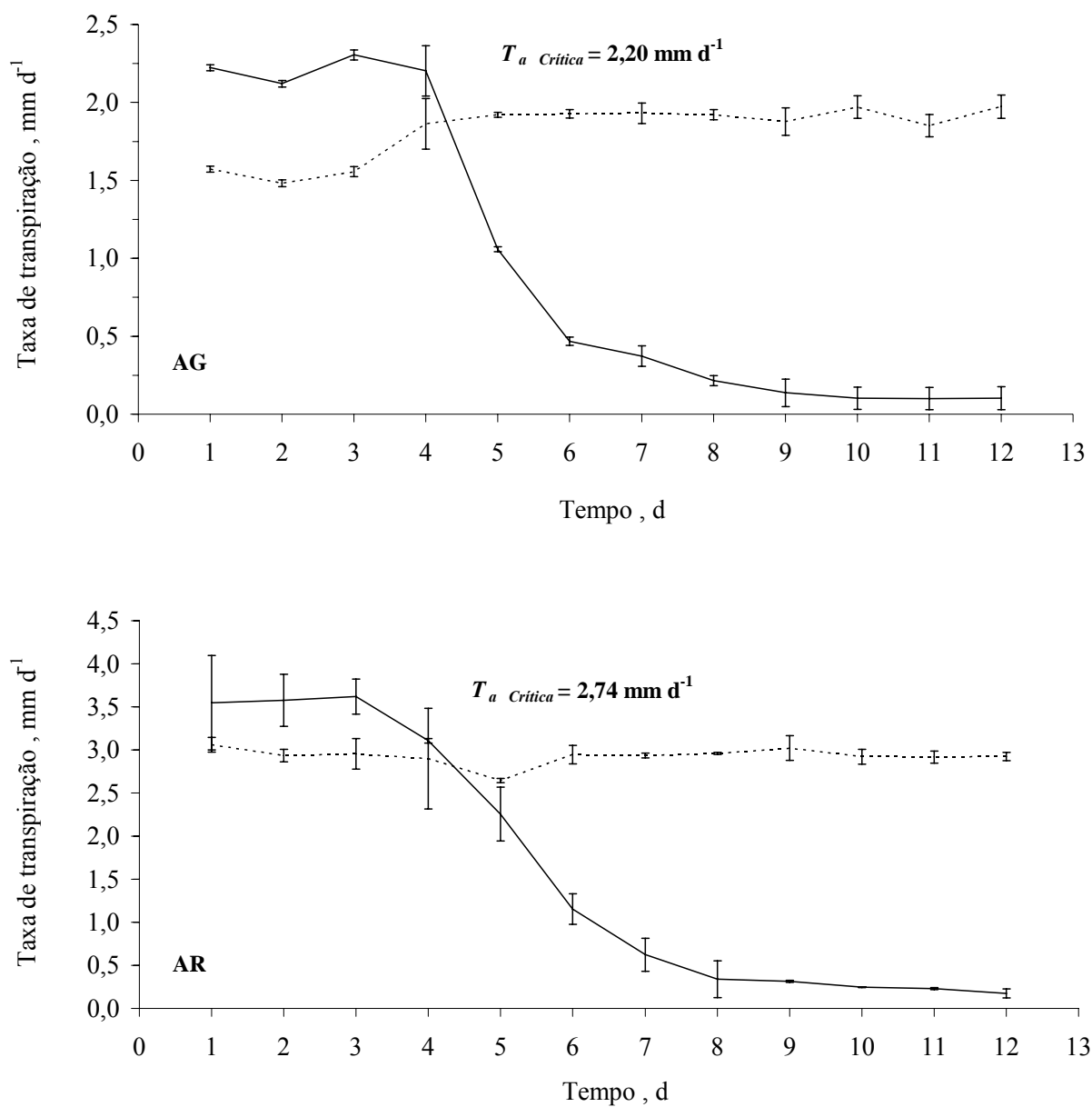


Figura 11 - Médias da taxa de transpiração das plantas ao longo do tempo, no 1º experimento, das plantas cultivadas nos solos de textura argilosa (AG) e arenosa (AR), sendo mantida a irrigação (linha pontilhada; plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (linha cheia; plantas 4, 5 e 6). Barras verticais indicam o intervalo do valor mais ou menos um desvio padrão

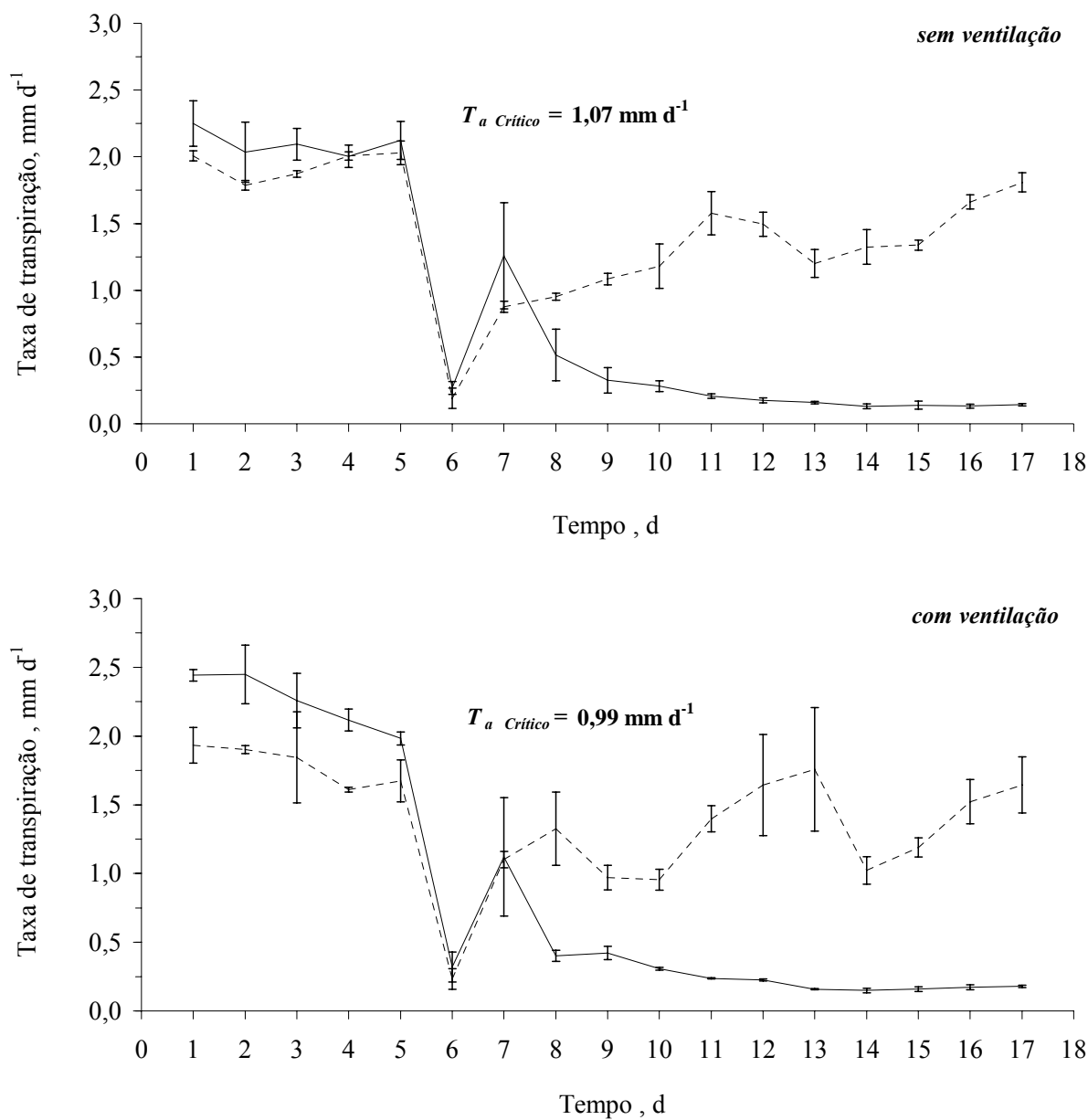


Figura 12 - Médias da taxa de transpiração das plantas, no 2º experimento, cultivadas no solo de textura argilosa (AG), mantida a irrigação (linha pontilhada, plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (linha cheia, plantas 4, 5 e 6), sem ou com ventilação forçada. Barras verticais indicam o intervalo do valor mais ou menos um desvio padrão

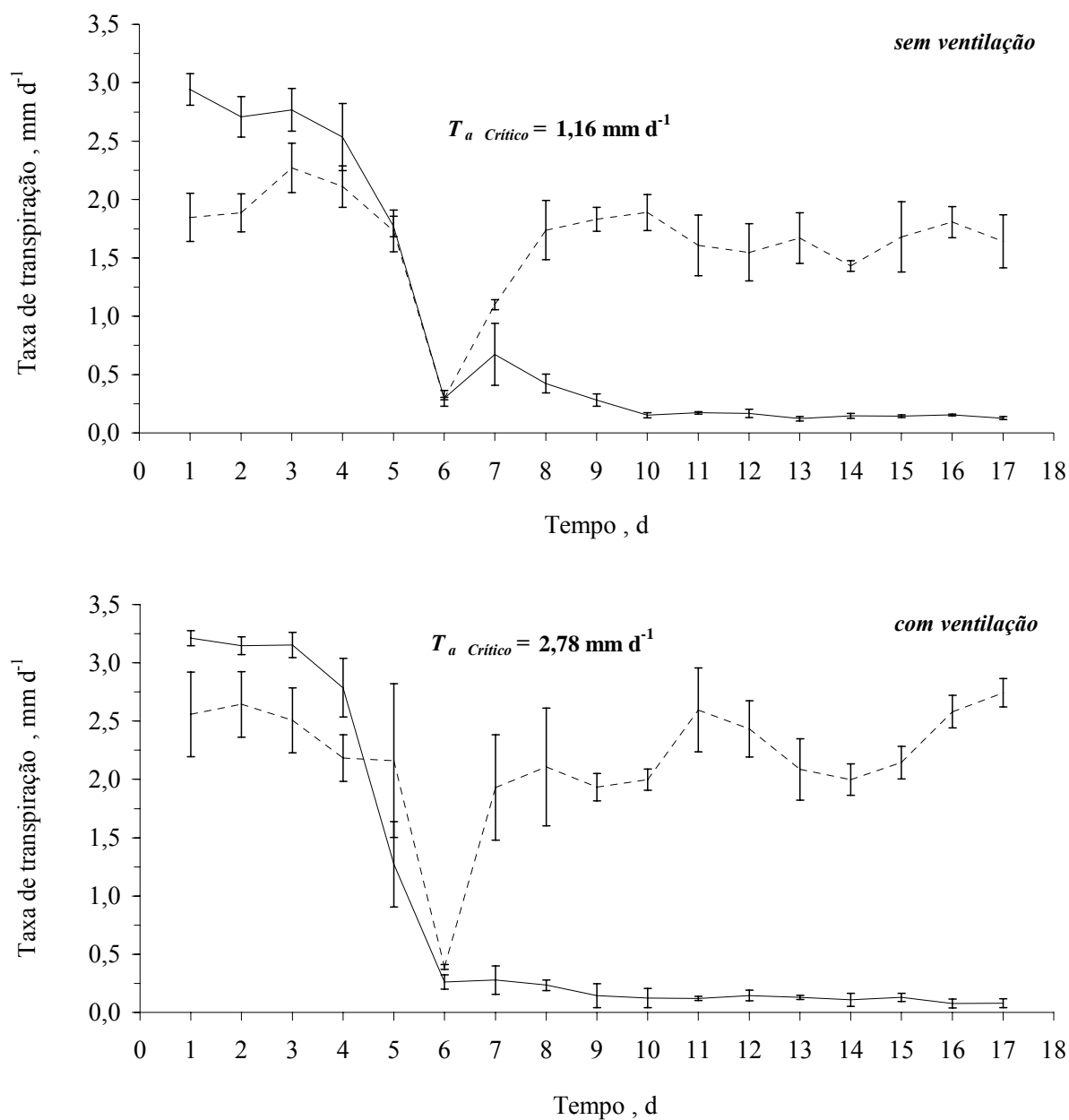


Figura 13 - Médias da taxa de transpiração das plantas, no 2º experimento, cultivadas no solo de textura arenosa (AR), mantida a irrigação (linha pontilhada, plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (linha cheia, plantas 4, 5 e 6), sem ou com ventilação. Barras verticais indicam o intervalo do valor mais ou menos um desvio padrão

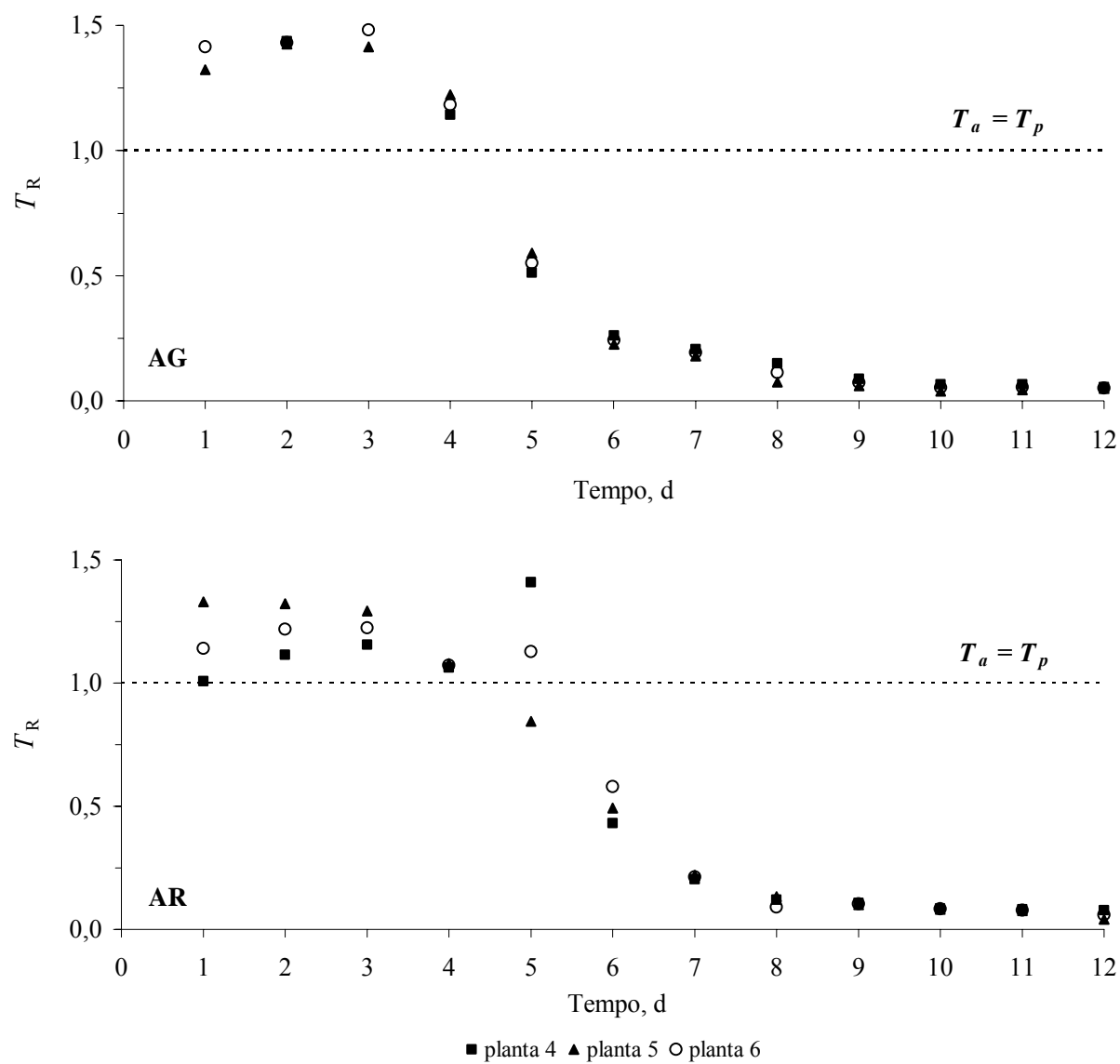


Figura 14 - Transpiração relativa (T_R) em função do tempo, das plantas cultivadas nos solos com textura argilosa (AG) e arenosa (AR), submetidas à deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), no 1º experimento

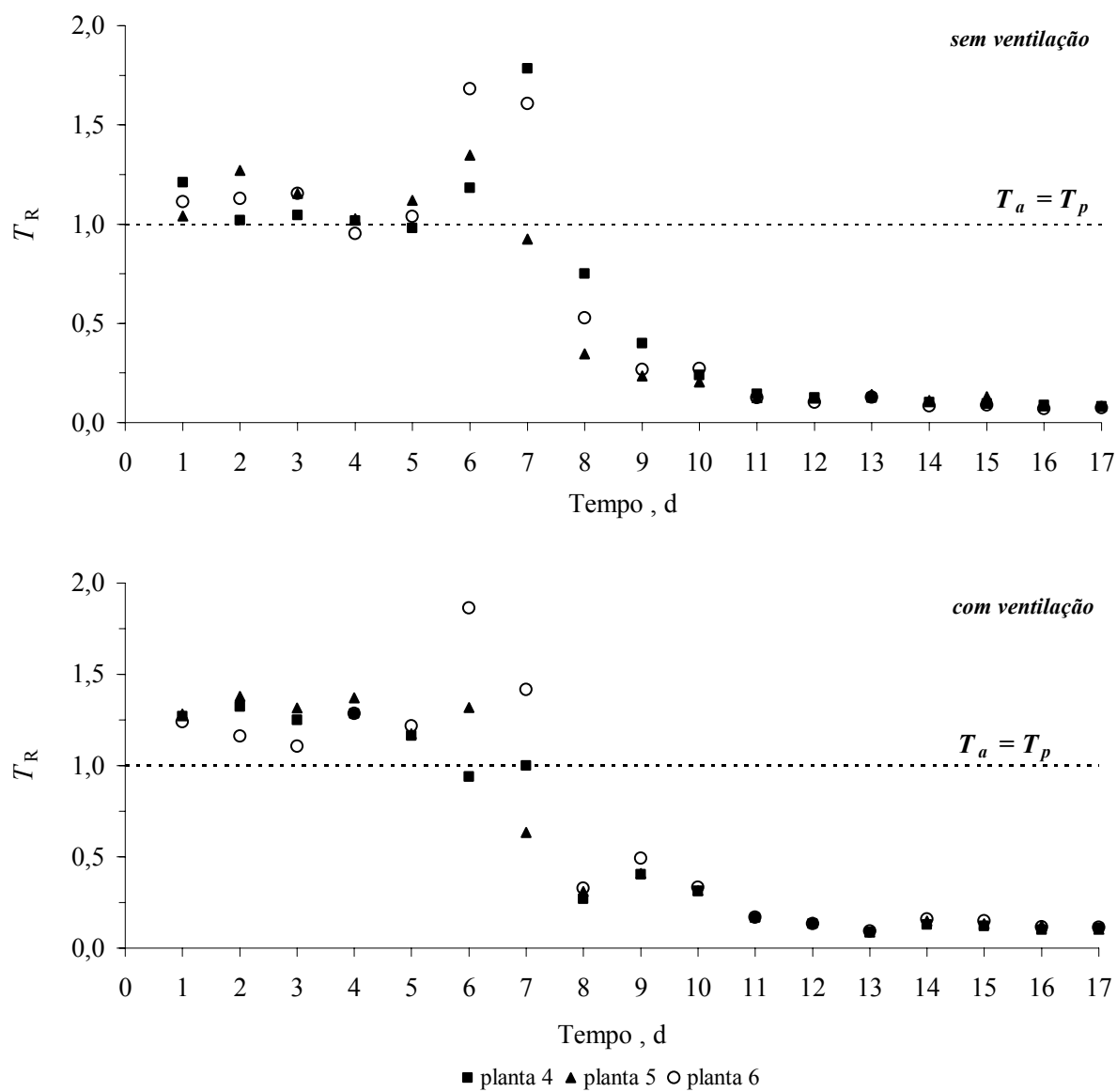


Figura 15 - Transpiração relativa (T_R) em função do tempo, das plantas cultivadas no solo com textura argilosa (AG), para o sistema sem ventilação forçada ou com ventilação, com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), no 2º experimento

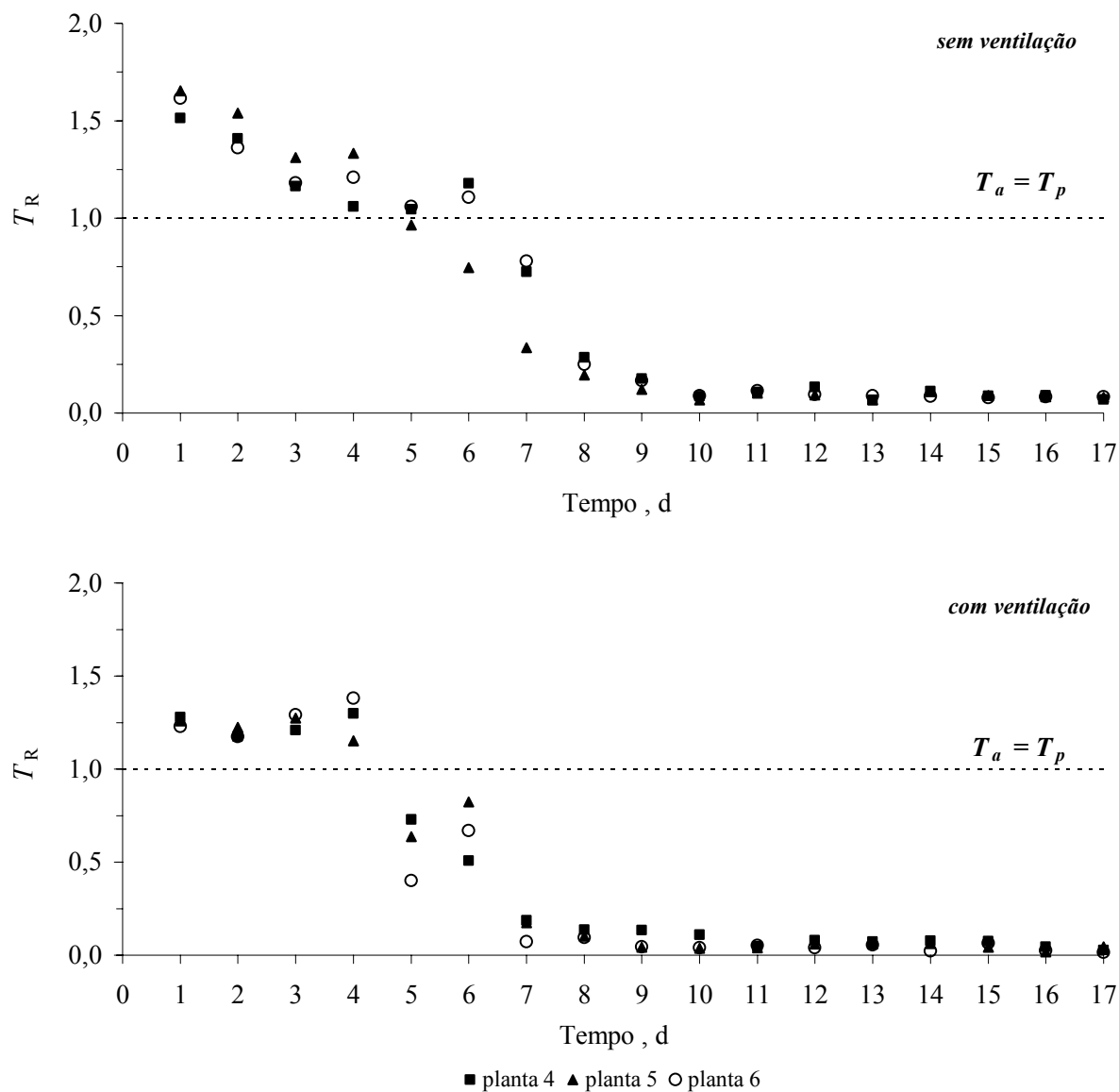


Figura 16 - Transpiração relativa (T_R) em função do tempo, das plantas cultivadas no solo com textura argilosa (AR), para o sistema sem ventilação forçada ou com ventilação, com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), no 2º experimento

Os resultados experimentais completos das taxas de transpiração, θ , h , K , M e T_R tanto para o primeiro (Tabelas 28, 29 e 34) quanto para o segundo experimento (Tabelas 30 a 33; 35 e 36) estão apresentados no ANEXO K.

O ponto crítico foi estimado a partir do critério $T_R < 1$, conforme descrito no item 2.2.15. No primeiro experimento esse ponto foi identificado no quarto dia para o solo AG e no quarto (planta 5) e quinto (plantas 4 e 6) dia para o solo AR (Figuras 14). Para o segundo experimento o ponto crítico no solo AG foi detectado no sétimo dia de avaliação para as plantas 4 e 6 e no sexto dia para a planta 5, tanto para o tratamento sem ventilação forçada quanto para o tratamento com ventilação (Figuras 15). No solo AR, para o tratamento sem ventilação, o ponto crítico foi encontrado no sexto dia para as plantas 4 e 6, e no quarto dia para a planta 5. No entanto, para o tratamento com ventilação esse ponto foi encontrado no quarto dia em todas as plantas (Figura 16).

No segundo experimento era esperado que o ponto crítico fosse atingido primeiro nos tratamentos com ventilação forçada, pois nesse tratamento esperava-se uma maior demanda atmosférica devido a uma menor resistência na camada limite (interface folha/ar). Isso ocorre por haver uma retirada do ar saturado da região próxima às folhas, provocando uma diminuição do potencial do vapor de água nessa região, favorecendo o transporte de massa (vapor de água) das folhas para a atmosfera. No entanto, o fato disso não ter sido observado pode ter sua explicação no estresse mecânico nas folhas provocado pela ventilação forçada, inferindo em um fechamento temporário dos estômatos. Pois, não se verificou menores taxas de transpiração nas plantas submetidas ao sistema ventilado. Entretanto, para o solo AR, conforme visto anteriormente, ocorreu maior taxa de transpiração média nas plantas submetidas ao tratamento de ventilação em relação ao não ventilado, até atingir o ponto crítico. Neste caso, a ventilação pode ter aumentado a demanda atmosférica ao invés de ocasionar estresse mecânico nas folhas, com conseqüente fechamento estomático.

O fechamento dos estômatos, além de um processo mecânico (fluxo de massa) devido à falta de água na região da rizosfera ou baixa demanda atmosférica, pode também ocorrer por um processo fisiológico caracterizando um mecanismo de defesa da planta contra a falta de água. Esse processo se dá pela formação do hormônio Ácido Abscísico nas raízes, o qual migra para as folhas provocando o fechamento estomático, evitando que a planta perca água (TAIZ; ZIEGER, 2004). Esse efeito já foi relatado em plantas de *Phaseolus vulgaris* L. (PARDOSSI; VERNIERI; TOGNONI, 1992).

A partir destes dois processos de fechamento estomático (mecânico e fisiológico) pode-se explicar a queda abrupta na transpiração das plantas após um determinado instante, chegando a

reduzir até mais de 50% da transpiração potencial, no dia subsequente ao dia em que foi observado o ponto crítico.

2.3.1.1 Fotossíntese

A curva de luz é a resposta da planta, em relação à fotossíntese, a diferentes intensidades luminosas (Figura 17). Os resultados observados (Tabela 37 do ANEXO K) corroboraram aos dados já registrados em literatura, os quais mostraram valores máximos no estágio de pré-floração em torno de $14 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (PIMENTEL, 1998; SIEBENEICHLER et al., 1998).

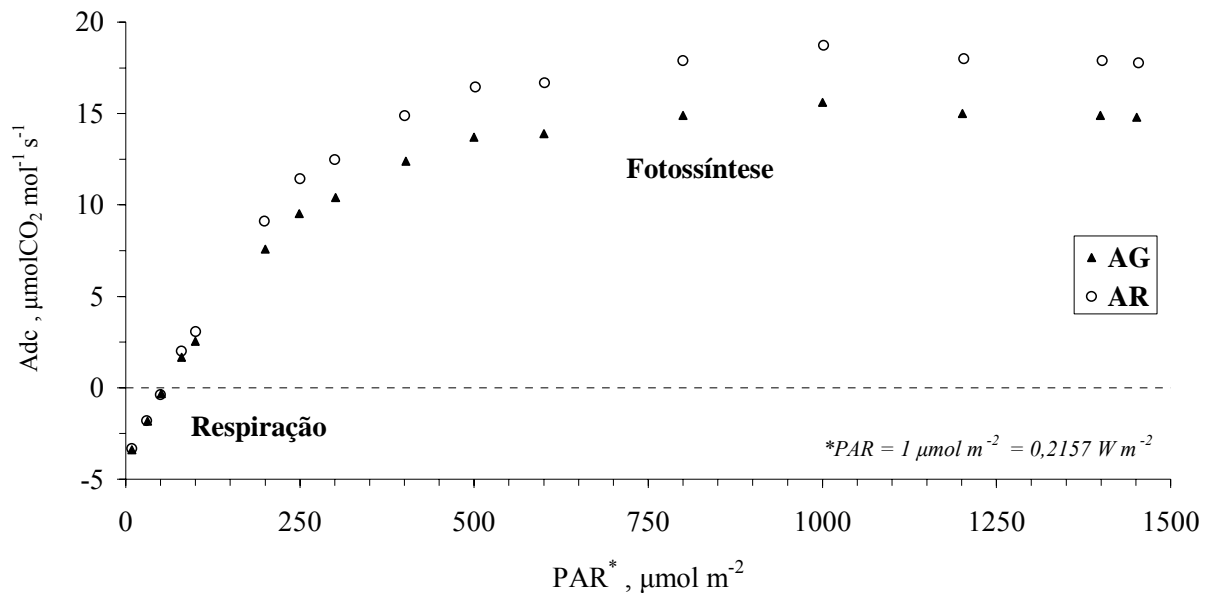


Figura 17 - Assimilação de dióxido de carbono (Ade) em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Curva de luz (fotossíntese > 0 e respiração < 0) das plantas cultivadas nos solos com textura argilosa (AG) e arenosa (AR), antes da aplicação dos tratamentos de deficiência hídrica e ventilação forçada, no 2º experimento

A fotossíntese líquida foi analisada nas plantas de número 4 submetidas ao tratamento de deficiência hídrica, nos solos AG e AR e nos tratamentos sem ou com ventilação. Desta forma, observou-se nas plantas cultivadas no solo AG, que o decréscimo da fotossíntese iniciou após atingir o seu valor de máxima; correspondente ao sétimo dia após o início dos tratamentos de déficit e de ventilação (Tabela 37 do ANEXO K e Figura 18). Esses resultados corroboraram aos encontrados a partir do critério $T_R < 1$ para as mesmas plantas. No entanto, as plantas de número 5,

dos tratamentos sem e com ventilação forçada, foram as únicas que registraram o ponto crítico no dia anterior (sexto dia de avaliação) ao início do decréscimo da fotossíntese.

Para o solo AR, as plantas apresentaram decréscimo da fotossíntese a partir do quinto dia de avaliação (Tabela 37 do ANEXO K e Figura 19). As mesmas plantas apresentaram o ponto crítico, a partir do critério $T_R < 1$, um dia após o início do decréscimo da fotossíntese, para o tratamento sem ventilação, e no dia anterior para o tratamento com ventilação. As demais plantas seguiram a mesma tendência, exceto a planta 5 do tratamento sem ventilação, que registrou o ponto crítico no dia anterior. Essas diferenças podem ter ocorrido devido às medidas de fotossíntese serem obtidas em um único horário durante o dia, no qual, pode ter correspondido a máxima transpiração diária.

Embora tenham ocorrido algumas diferenças, ainda pode-se dizer que o critério de $T_R < 1$, conforme aplicado, mostrou-se adequado para se determinar as condições hidráulicas críticas ou ponto crítico para ambos os solos, em comparação com as medidas de fotossíntese.

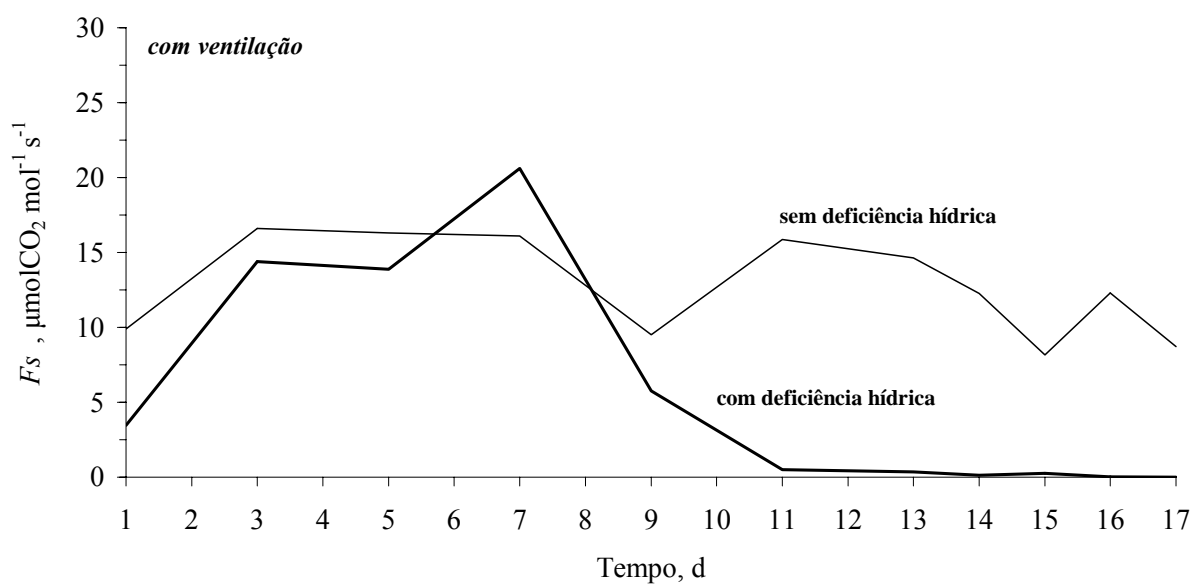
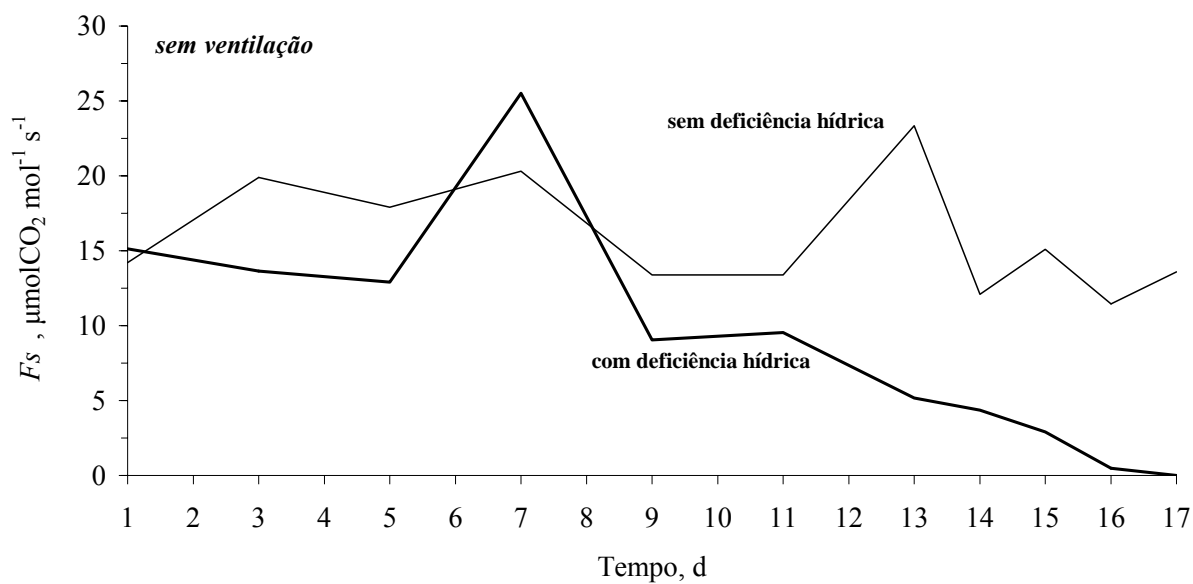


Figura 18 - Fotossíntese líquida (F_s) em função do tempo, das plantas cultivadas no solo com textura argilosa (AG), sem ou com deficiência hídrica e, sem ou com ventilação forçada

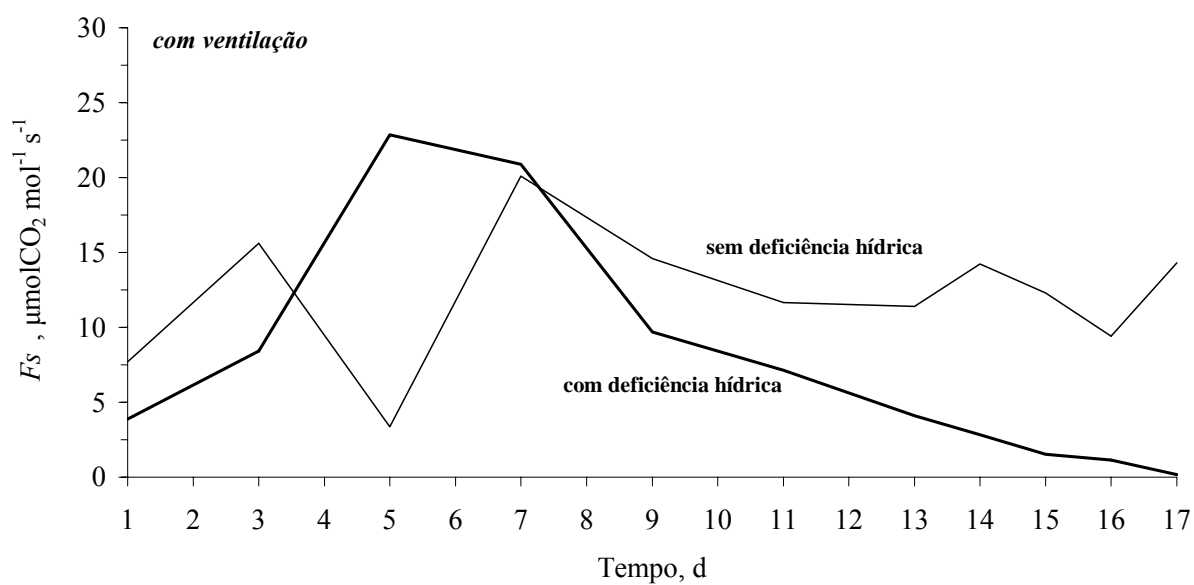
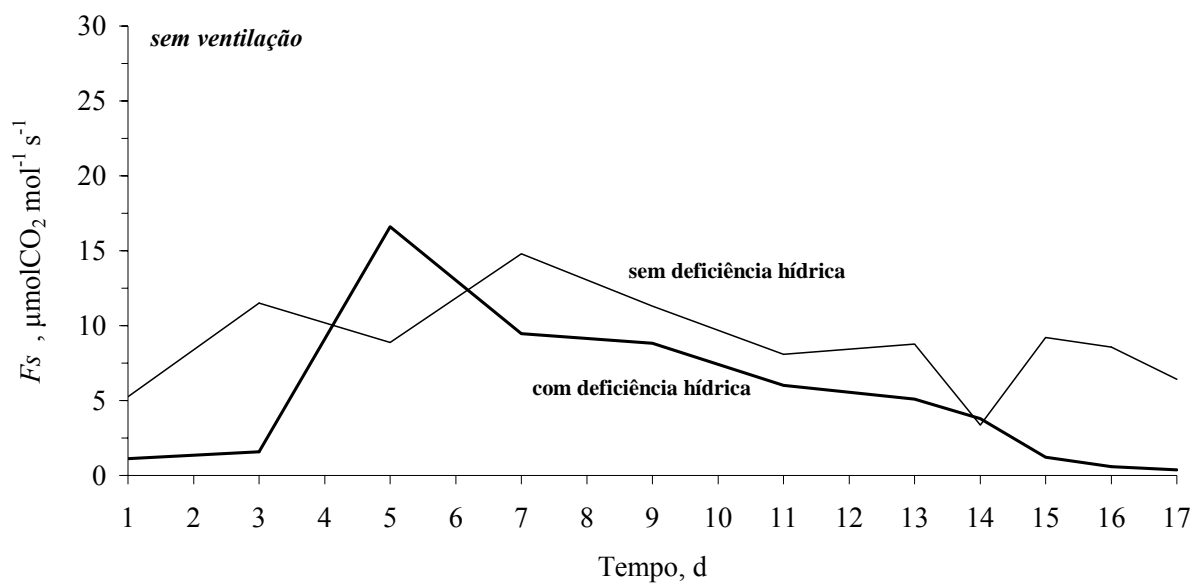


Figura 19 - Fotossíntese líquida (F_s , $\mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$) em função do tempo, das plantas cultivadas no solo com textura arenosa (AR), sem ou com deficiência hídrica e, sem ou com ventilação forçada

2.3.2 Características das plantas relacionadas à extração de água do solo

As Tabelas 7 e 8 (1º experimento) e as Tabelas 9 e 10 (2º experimento) apresentam os valores experimentais, das variáveis que caracterizam as plantas e que estão relacionadas à extração de água do solo e, logo, definem o movimento da água no solo em direção as raízes. Para efeito de análise de variância analisaram-se os seguintes fatores: A (Solos), C (ventilação) e D (regime hídrico).

Tabela 7 - Área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz das plantas cultivadas no solo de textura argilosa (AG), sem (SD) ou com (CD) deficiência hídrica, no 1º experimento

Planta	Área foliar (m²)	Comprimento de raiz (m)	Densidade radicular (m m⁻³)	Área de raiz (m²)
<i>SD</i>				
1	0,0451	46,17	11541	0,0130
2	0,0395	59,21	14801	0,0154
3	0,0323	51,80	12950	0,0141
<i>CD</i>				
4	0,0607	41,09	10273	0,0118
5	0,0697	53,68	13419	0,0155
6	0,0651	55,84	13959	0,0140

Tabela 8 - Área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz das plantas cultivadas no solo de textura arenosa (AR), sem (SD) ou com (CD) deficiência hídrica, no 1º experimento

Planta	Área foliar (m²)	Comprimento de raiz (m)	Densidade radicular (m m⁻³)	Área de raiz (m²)
<i>SD</i>				
1	0,0431	66,35	16588	0,0192
2	0,0422	64,75	16188	0,0198
3	0,0421	63,70	15924	0,0178
<i>CD</i>				
4	0,0745	44,58	11145	0,0130
5	0,0833	52,30	13074	0,0081
6	0,0789	46,37	11592	0,0109

Tabela 9 - Área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz das plantas cultivadas no solo de textura argilosa (AG), sem (SD) ou com (CD) deficiência hídrica, no 2º experimento

Plantas	Área foliar (m ²)	Comprimento de raiz (m)	Densidade radicular (m m ⁻³)	Área de raiz (m ²)
<i>sem ventilação</i>				
<i>SD</i>				
1	0,01556	58,01	14502	0,01908
2	0,01708	56,87	14217	0,01503
3	0,01664	68,49	17122	0,02102
<i>CD</i>				
4	0,03359	21,71	5427	0,00575
5	0,02948	12,61	3152	0,00373
6	0,03217	23,93	5981	0,00779
<i>com ventilação</i>				
<i>SD</i>				
1	0,01854	64,01	16003	0,01543
2	0,03307	47,01	11751	0,01496
3	0,02632	44,24	11059	0,01044
<i>CD</i>				
4	0,05091	46,98	11744	0,01419
5	0,07491	43,60	10899	0,01252
6	0,06417	36,78	13087	0,01241

Tabela 10 - Área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz das plantas cultivadas no solo de textura arenosa (AR), sem (SD) ou com (CD) deficiência hídrica, no 2º experimento

Plantas	Área foliar (m ²)	Comprimento de raiz (m)	Densidade radicular (m m ⁻³)	Área de raiz (m ²)
<i>sem ventilação</i>				
<i>Irrigadas</i>				
1	0,00615	60,97	15242	0,01914
2	0,00473	38,59	9647	0,01102
3	0,00555	54,93	13733	0,01767
<i>Déficit</i>				
4	0,01728	35,71	8927	0,00912
5	0,01841	41,33	10332	0,01157
6	0,01497	38,58	9645	0,01209
<i>com ventilação</i>				
<i>Irrigadas</i>				
1	0,01297	58,39	14597	0,01544
2	0,02453	46,16	11541	0,01399
3	0,01912	44,66	11165	0,01375
<i>Déficit</i>				
4	0,01447	35,92	8980	0,01175
5	0,01602	44,74	11185	0,01116
6	0,01555	37,92	9480	0,01125

Não houve interação significativa entre os níveis dos Fatores A (solos AG e AR) e D (plantas sem ou com deficiência hídrica) para o primeiro experimento. No segundo experimento houve significância para as seguintes interações: AxC e AxD para a variável área foliar; AxD e CxD para comprimento de raiz; CxD para densidade radicular; CxD para área de raiz. Os valores médios dessas características estão apresentados nas Tabelas 11 (1º experimento) e 12 (2º experimento).

No primeiro experimento, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as variáveis dos solos AG e AR (Tabela 11). Entretanto, tanto no solo AG quanto no solo AR observou-se que as plantas submetidas à deficiência hídrica obtiveram, para todas as variáveis, valores médios maiores em relação às plantas irrigadas, diferenciando-se significativamente pelo teste de Tukey. Isso pode explicar o fato das plantas em déficit terem transpirado mais que as irrigadas (AG = 70% e AR = 20%), até atingirem o ponto crítico (Tabela 28 e 29 do ANEXO K).

Não há explicação causal para essa diferença, devendo-se simplesmente ao acaso, uma vez que as plantas tiveram o mesmo tratamento até o início da aplicação dos tratamentos de deficiência hídrica e ventilação forçada.

Para o segundo experimento a maior média de área foliar foi observada nas plantas cultivadas no solo AG, porém, não mostrou diferença significativa em relação às médias obtidas nos tratamentos com ventilação e de plantas irrigadas. Para a variável comprimento de raiz observou-se a maior média nas plantas mantidas irrigadas. A maior média de densidade radicular e de área de raiz também foi obtida pelas plantas mantidas irrigadas. Entretanto, aquela variável não mostrou diferença em relação às plantas com ventilação e essa não se diferiu em relação às plantas sem ou com ventilação (Tabela 12).

Com isso, pode-se explicar também, nesse segundo experimento, a superioridade da taxa de transpiração das plantas submetidas à deficiência hídrica (Figuras 12 e 13).

Tabela 11 - Médias de área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz das plantas submetidas aos tratamentos de solos (Fator A): argilosa (AG) e arenosa (AR); e regime hídrico (Fator D): sem (SD) ou com (CD) deficiência hídrica, no 1º experimento

Tratamentos	Área foliar (m ²)	Comprimento de raiz (m)	Densidade radicular (m m ⁻³)	Área de raiz (m ²)
Fator A				
AG	0,0521 a*	51,29 a	12824 a	0,01397 a
AR	0,0571 a	58,33 a	14584 a	0,01558 a
Fator D				
SD	0,0407 b	58,66 a	14665 a	0,01655 a
CD	0,0707 a	49,49 b	12374 b	0,01248 b
CV(%)	8,85	10,87	10,84	12,57

*Tratamentos com médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 12 - Médias de área foliar, comprimento de raiz, densidade radicular e área de raiz das plantas submetidas aos tratamentos de solos (Fator A): argilosa (AG) e arenosa (AR); demanda atmosférica (Fator B): sem (S/V) ou com (C/V) ventilação forçada; e regime hídrico (Fator D): sem (SD) ou com (CD) deficiência hídrica; no 2º experimento

Área foliar (m²): CV = 22,58%					
<i>Fator A</i>		<i>Fator C</i>		<i>Fator D</i>	
AG	0,0344 aA*	S/V	0,0176 bB	SD	0,0318 aA
AR	0,0141 bB	C/V	0,0309 aA	CD	0,0167 bB
Comprimento de raiz (m): CV = 16,73%					
AG	43,69 aB	S/V	45,87 aB	SD	53,53 aA
AR	44,82 aB	C/V	42,64 aB	CD	34,98 bC
Densidade radicular (m m⁻³): CV = 16,35%					
AG	11245 a	S/V	10660 aB	SD	13381 aA
AR	11206 a	C/V	11790 aA	CD	9069 bB
Área de raiz (m²): CV = 18,17%					
AG	0,01269 a	S/V	0,01311 aA	SD	0,01558 aA
AR	0,01316 a	C/V	0,01275 aA	CD	0,01028 bB

*Tratamentos com médias não seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro. Interações significativas ocorreram entre os tratamentos: A x C e A x D (área foliar); A x D e C x D (comprimento de raiz); C x D (densidade radicular); C x D e A x D (área de raiz).

2.3.2 Condições hidráulicas no ponto crítico

O conjunto completo dos valores observados de teor de água (θ), potencial matricial (h), condutividade hidráulica (K) e potencial de fluxo matricial (M) tanto para o primeiro (Tabelas 28 e 29) quanto para o segundo experimento (Tabelas 30 a 33) estão apresentados no ANEXO K. As médias desses valores, correspondentes ao ponto crítico, estão apresentadas nas Tabelas 13 (1º experimento) e 14 (2º experimento). A análise da variância não detectou interações significativas entre os Fatores A (solos) e D (demanda atmosférica), para o segundo experimento. Ainda, nesse experimento não foram detectadas diferenças significativas em nenhuma variável hidráulica entre os tratamentos sem ou com ventilação forçada, o que pode ser explicado pelo estresse mecânico provocado nas folhas, conforme discutido anteriormente.

Tabela 13 - Médias dos valores de teor de água (θ_{crit} , $m^3 m^{-3}$), potencial matricial (h_{crit} , m), condutividade hidráulica (K_{crit} , $m d^{-1}$), potencial de fluxo matricial (M_{crit} , $m^2 d^{-1}$) no ponto crítico, para os tratamentos de tipos de solos: argiloso (AG) e arenoso (AR), no 1º experimento

Tratamento	Variáveis hidráulicas			
	θ_{crit}	h_{crit}	K_{crit}	M_{crit}
Solo AG	0,2513 a*	-18,51 a	$0,61 \cdot 10^{-6}$ a	$5,08 \cdot 10^{-6}$ a
Solo AR	0,1276 b	-15,16 a	$1,02 \cdot 10^{-6}$ a	$6,54 \cdot 10^{-6}$ a
CV(%)	1,88	11,52	51,31	31,72

*Tratamentos com médias não seguidas pela mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 14 - Médias dos valores de teor de água (θ_{crit} , $m^3 m^{-3}$), potencial matricial (h_{crit} , m), condutividade hidráulica (K_{crit} , $m d^{-1}$), potencial de fluxo matricial (M_{crit} , $m^2 d^{-1}$) no ponto crítico, para os tratamentos de tipos de solos: argiloso (AG) e arenoso (AR); e demanda atmosférica: sem ou com ventilação forçada; no 2º experimento

Tratamento	Variáveis hidráulicas			
	θ_{crit}	h_{crit}	K_{crit}	M_{crit}
Solo AG	0,2303 a	-14,40 a	$0,91 \cdot 10^{-6}$ b	$5,27 \cdot 10^{-6}$ a
Solo AR	0,1743 b	-7,33 b	$2,96 \cdot 10^{-6}$ a	$8,08 \cdot 10^{-6}$ a
Sem ventilação	0,2027 a	-10,52 a	$2,01 \cdot 10^{-6}$ a	$7,05 \cdot 10^{-6}$ a
Com ventilação	0,2074 a	-11,98 a	$1,86 \cdot 10^{-6}$ a	$6,29 \cdot 10^{-6}$ a
CV(%)	1,81	12,35	80,77	47,05

*Tratamentos com médias não seguidas pela mesma letra minúscula e maiúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade de erro.

As Figuras 20 (1º experimento), 21 e 22 (2º experimento) mostram a variação média do teor de água no solo (θ) ao longo do tempo, observando seu decréscimo e seu respectivo ponto crítico no tratamento em que as plantas foram submetidas à deficiência hídrica.

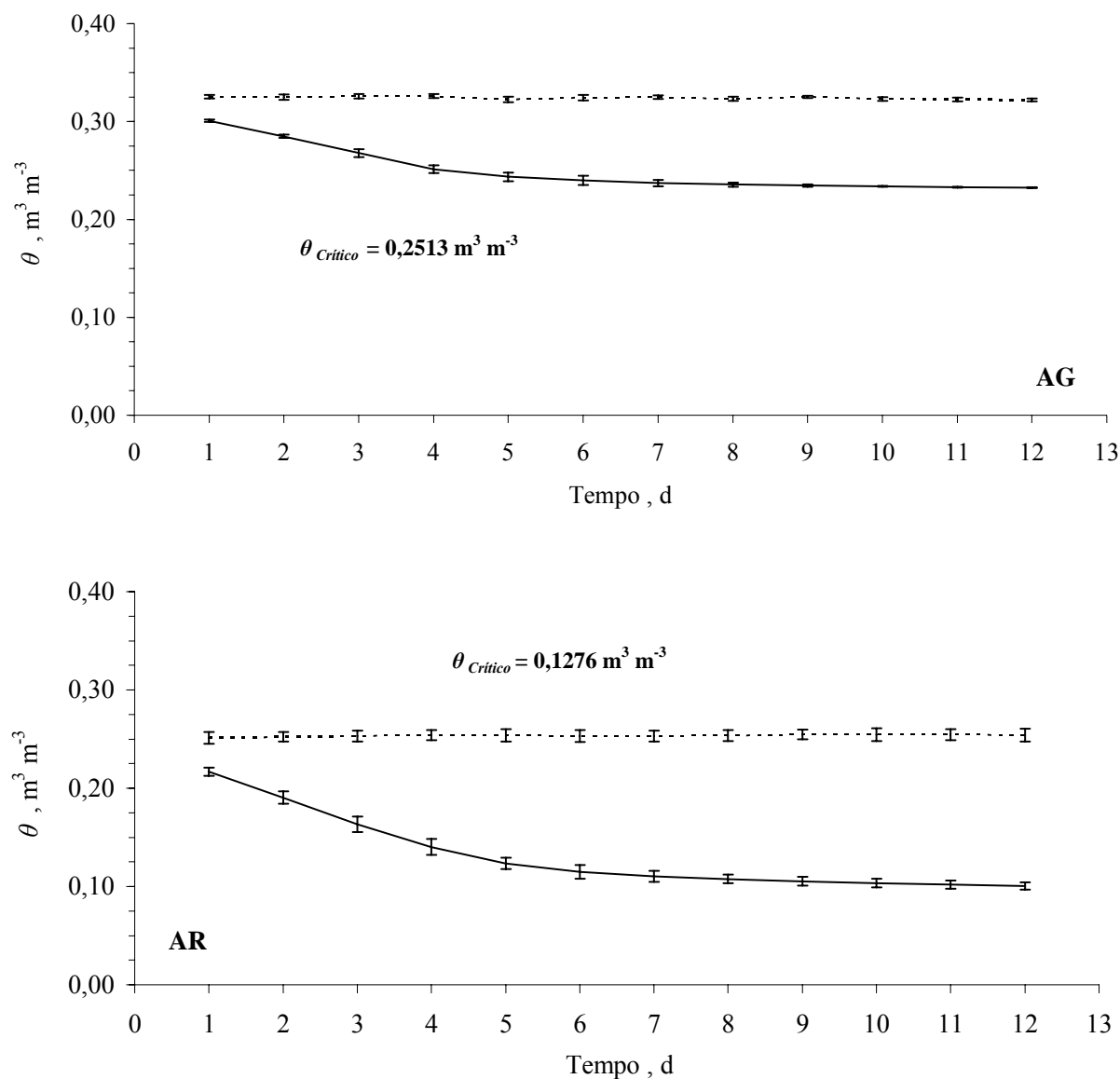


Figura 20 - Médias do teor de água (θ) em função do tempo, nos solos de textura argilosa (AG) e arenosa (AR) do 1º experimento, mantida a irrigação (linha pontilhada, plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (linha cheia, plantas 4, 5 e 6). Barras verticais indicam o intervalo do valor mais ou menos um desvio padrão

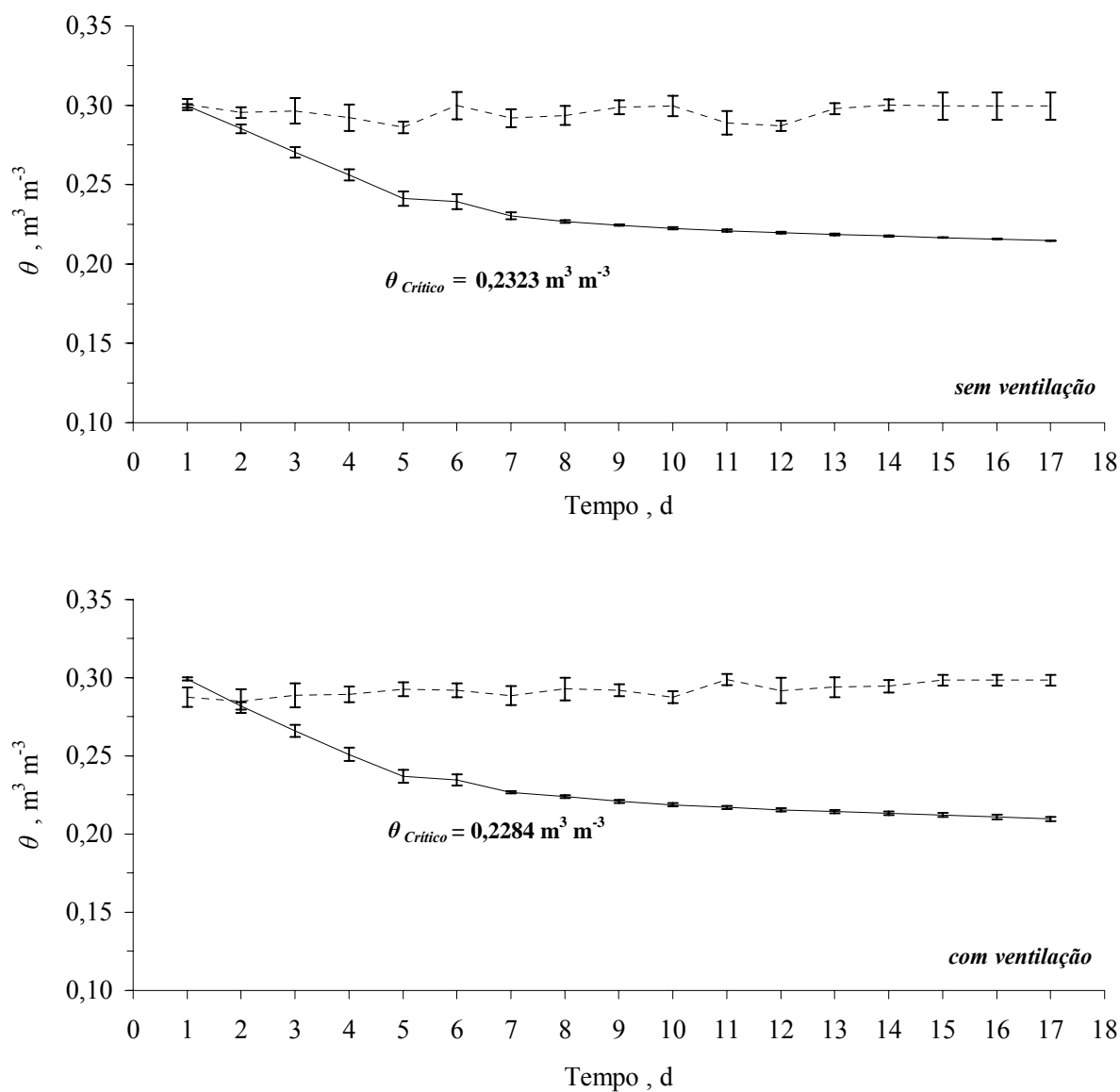


Figura 21 - Médias do teor de água (θ) em função do tempo, no solo de textura argilosa (AG) do 2º experimento, mantida a irrigação (linha pontilhada, plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (linha cheia, plantas 4, 5 e 6), sem ou com ventilação forçada. Barras verticais indicam o intervalo do valor mais ou menos um desvio padrão

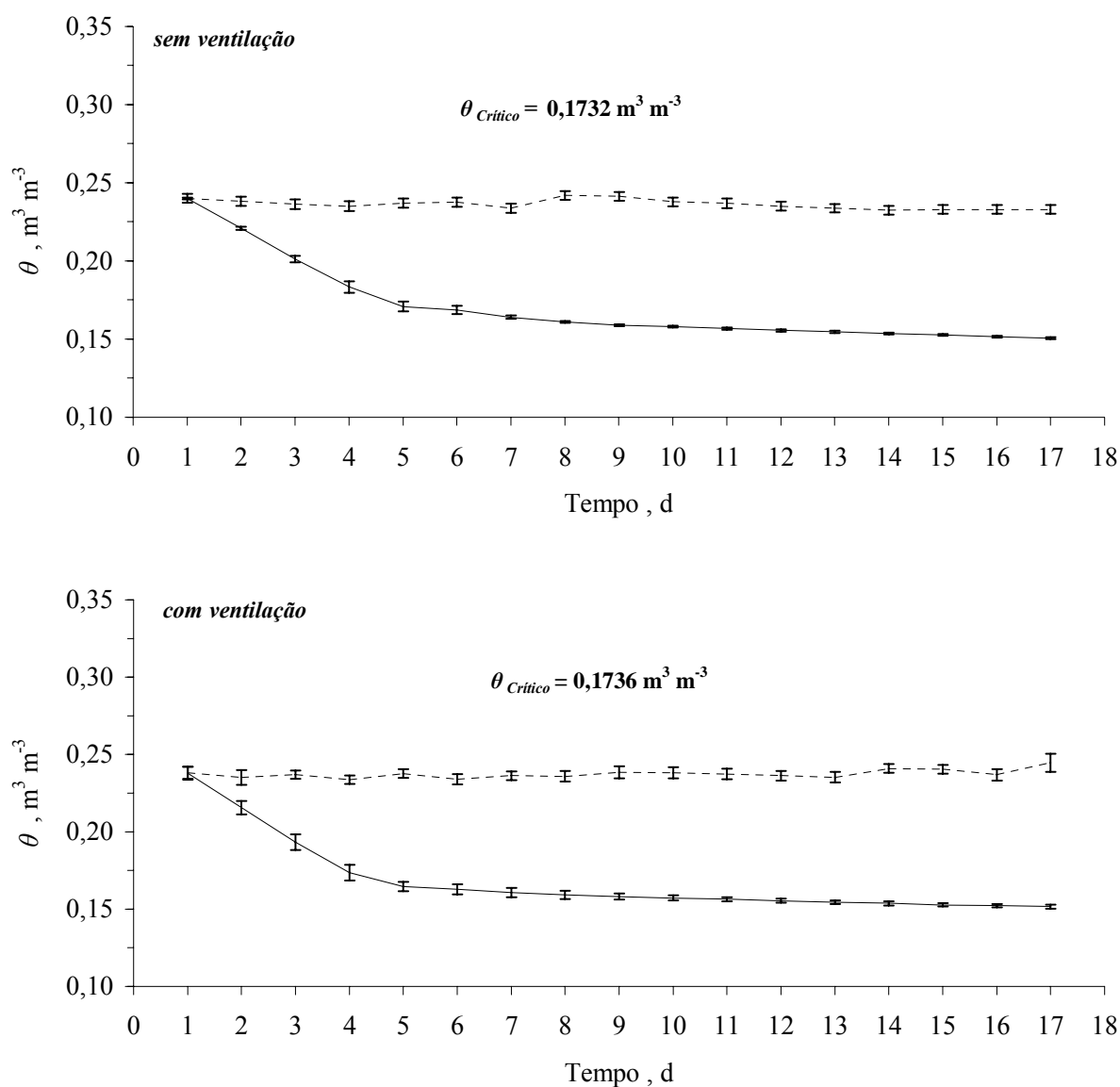


Figura 22 - Médias do teor de água (θ) em função do tempo, no solo de textura arenosa (AR) do 2º experimento, mantida a irrigação (linha pontilhada, plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (linha cheia, plantas 4, 5 e 6), sem ou com ventilação forçada. Barras verticais indicam o intervalo do valor mais ou menos um desvio padrão

Os valores de teor de água crítico (θ_{crit}) para os solos AG e AR do primeiro experimento diferiram significativamente, obtendo médias de $0,2513$ e $0,1276 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente (Tabela 13). Essas diferenças também ocorreram no segundo experimento entre as médias AG = $0,2303$ e AR = $0,1743 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 14).

Por se tratar de um sistema dinâmico, é interessante observar as variações na taxa de decréscimo do θ ($d\theta/dt$). No ponto crítico, do primeiro experimento, foi registrada uma $d\theta/dt$ em torno de $0,004 \text{ d}^{-1}$ para ambos os solos. Essa semelhança de valores pode ser esperada, pois a transpiração até atingir o ponto crítico está na fase de taxa constante em que $T_a = T_p$. Nessa fase, a quantidade de água presente no solo é suficiente para suprir as necessidades de demanda da planta.

Entretanto, para o segundo experimento, os valores de $d\theta/dt$ foram distintos no ponto crítico para os solos AG ($\approx 0,0010 \text{ d}^{-1}$, tanto sem quanto com ventilação) e AR ($0,0019 \text{ d}^{-1}$ e $0,0049 \text{ d}^{-1}$; sem ou com ventilação, respectivamente). Essas diferenças se devem principalmente ao fato de que os valores das taxas de transpiração das plantas cultivadas no solo AR foram maiores que das plantas do solo AG, até atingirem o ponto crítico (Tabelas 30 a 33 do ANEXO K). Esse fato não pode ser explicado pela área foliar, pois, em média, as plantas do solo AG obtiveram maior área foliar que as plantas do solo AR (Tabela 12). Uma possível explicação pode ser devido às variações micrometeorológicas (ANEXOS de F até J) nesse segundo experimento, fazendo com que houvesse maiores variações na taxa de transpiração.

Os valores de θ_{crit} foram transformados em potenciais matriciais críticos (h_{crit}) a partir da eq. (5). Para os solos AG e AR, do primeiro experimento, foram encontrados valores médios de h_{crit} iguais a $-18,51 \text{ m}$ e $-15,16 \text{ m}$, respectivamente; sem diferenças significativas (Tabela 13). As diferenças significativas foram observadas apenas entre os valores de h_{crit} do segundo experimento, que obtiveram médias de AG = $-14,40 \text{ m}$ e AR = $-7,33 \text{ m}$ (Tabela 14).

Alguns trabalhos evidenciaram uma elevada variabilidade e heterogeneidade de h . Essa variabilidade provavelmente seja mais crítica em situações em que h é usado diretamente como, por exemplo, no cálculo do gradiente de potencial, utilizado em equações de fluxo (HENDRICKX; WIERENGA; NASH, 1990; MARCIANO et al., 1998).

Utilizou-se a eq. (6) para estimar os valores de condutividade hidráulica crítica (K_{crit}). As médias encontrados no primeiro experimento não mostraram diferenças significativas no ponto crítico para os solos AG ($0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m d}^{-1}$) e AR ($1 \cdot 10^{-6} \text{ m d}^{-1}$), mesmo com valores de K_{crit} quase duas vezes maiores no solo AR. A falta de diferença estatística significativa pode ter ocorrido devido à alta variabilidade entre os valores observados, pois apresentaram um coeficiente de variação superior a 50% (Tabela 13). Entretanto, no segundo experimento foi verificada diferença significativa entre as médias de K_{crit} dos solos AG e AR, que apresentaram valores de $0,91 \cdot 10^{-6}$ e

$2,96 \cdot 10^{-6} \text{ m d}^{-1}$, respectivamente (Tabela 14). Essa variável hidráulica é muito sensível às mudanças no teor de água no solo e, conseqüentemente, no gradiente hidráulico, os quais se mostraram distintos nas diferentes texturas de solo; exceto para os valores de h_{crit} no primeiro experimento.

Para uma faixa de potencial matricial (h) variando entre -0,5 e -1,0 m, Hurtado e Jong Van Lier (2005) encontraram uma variabilidade, expressa pelo coeficiente de variação (CV%) médio, em situação de campo, de aproximadamente 60% para os valores de $K(h)$. Esses valores são maiores que os obtidos no presente trabalho. Os mesmos autores evidenciaram uma menor variabilidade nos valores de $K(h)$ em relação aos valores de $K(\theta)$.

Li, Wallach e Cohen (2001), obtiveram valores de condutividade hidráulica relativa ($K_r = \frac{K}{K_s}$) no ponto crítico iguais a 0,002 e, Polak e Wallach (2001) K_r de 0,0005; os quais foram maiores aos encontrados neste trabalho, pois K_r para os solos AG e AR estão na ordem de $0,8 \cdot 10^{-8}$ e $1 \cdot 10^{-8}$, respectivamente. Intervalos de magnitude para a condutividade do solo saturado (K_s) são encontrados de $0,12 \text{ m d}^{-1}$ a $0,49 \text{ m d}^{-1}$ (BENTLEY; SKAGGS; PARSONS, 1989). No presente trabalho observou-se valores médios entre os dois experimentos de K_s de $0,62 \text{ m d}^{-1}$ para o solo AG e de $1,31 \text{ m d}^{-1}$ para o solo AR (Tabela 6). Deve-se ressaltar que nesse trabalho o material de solo utilizado foi previamente peneirado, o que mudou sua estrutura inicial em relação à situação de “campo”.

Neste contexto, trabalhando com simulações numéricas, Jong Van Lier, Metselaar e Van Dam (2006) observaram que tanto θ_{crit} quanto h_{crit} e K_{crit} são muito dependentes do tipo de solo para uma mesma taxa de transpiração potencial e mesma densidade radicular.

A partir dos dados de M , esperava-se encontrar uma independência do tipo de solo, dado $T_R = M/M_1$ (item 2.2.17). Pois, mesmo que M esteja diretamente ligado ao movimento da água no solo, suas variações se devem principalmente as características das raízes e a demanda atmosférica do que dos parâmetros do solo (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006; METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007).

Os valores de M_{crit} (eq. 8) obtidos no primeiro (AG = $5,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ e AR = $6,54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$) e no segundo experimento (AG = $5,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ e AR = $8,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$) não diferiram significativamente entre os solos AG e AR (Tabelas 13 e 14). Esses resultados experimentais serviram para comprovar a teoria pressuposta neste estudo. Isso já havia sido

comprovado apenas numericamente para uma condição definida de densidade radicular e de taxa de transpiração, em que, M_{crit} correspondeu a um valor que independe das propriedades hidráulicas do solo (JONG VAN LIER; METSELAAR; VAN DAM, 2006; METSELAAR; JONG VAN LIER, 2007).

Portanto, as variações encontradas nos valores de M_{crit} obtidos nos experimentos deste trabalho devem-se a variações na taxa de transpiração e na densidade radicular.

As Figuras de 23 a 26 apresentam os valores de θ_{crit} , h_{crit} , K_{crit} e M_{crit} em função da distância média entre raízes (r_m). Nas variáveis K e M , por não terem apresentado uma distribuição normal até o ponto crítico, aplicou-se o logaritmo em seus valores de K_{crit} e M_{crit} , o que tornou normais suas distribuições. Para θ_{crit} e h_{crit} observou-se que 100% dos valores estão a uma distância menor que duas vezes seus desvios padrão (Figuras 23 e 24). Entretanto, para as variáveis K_{crit} e M_{crit} , 95% de seus valores estão a uma distância equivalente a dois desvios padrão (Figuras 25 e 26). Embora os valores de θ_{crit} e h_{crit} estejam mais próximos de suas médias, verificou-se que existe uma separação entre esses valores em relação ao tipo de solo (AG ou AR), pois, em média, os valores referentes ao solo AG se encontram a mais de um desvio padrão de distância da média geral e os valores de AR a menos um desvio (Figuras 23 e 24).

Esse fato não ocorreu com os valores de K_{crit} e M_{crit} , os quais estão distribuídos em torno de suas médias sem qualquer separação entre solos AG ou AR. Observou-se também que os valores de K_{crit} obtiveram uma maior variação de seu valor logarítmico (CV = 5,36%) em relação aos valores de M_{crit} (CV = 3,13%) (Figuras 25 e 26).

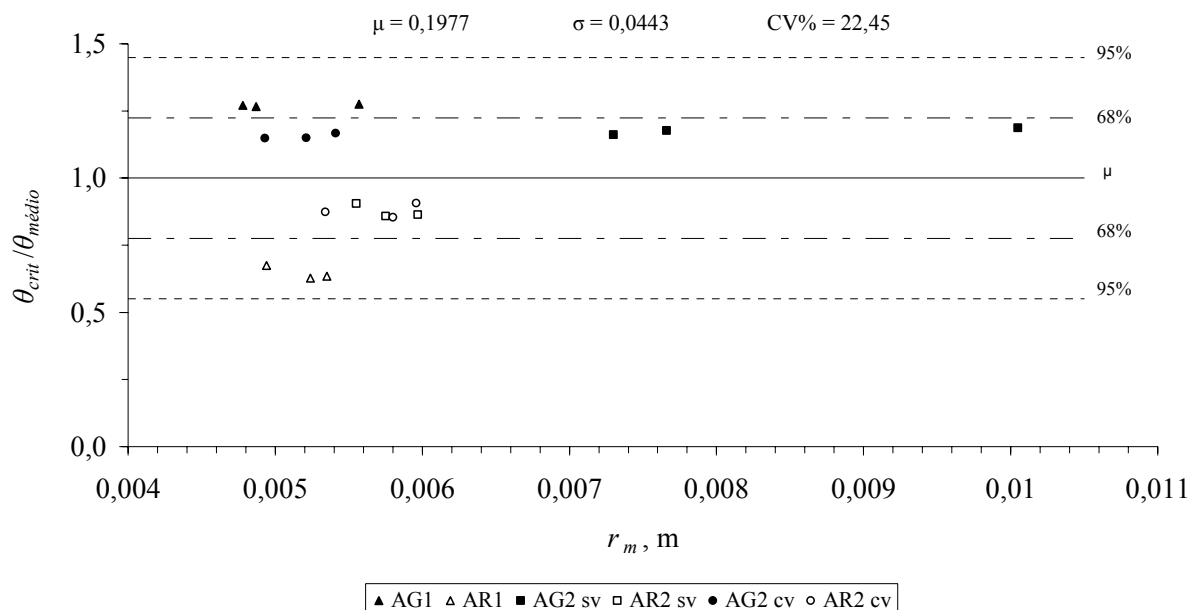


Figura 23 - Teor de água relativa ($\theta_{crit}/\theta_{médio}$) em função da distância média entre raízes (r_m) nos solos de textura arenosa (AR) e argilosa (AG) no primeiro (1) e segundo (2) experimento, e para os tratamentos sem (sv) ou com ventilação forçada (cv). Acima estão apresentados os valores da média (μ), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV%). A direita estão os valores percentuais referentes a 1σ (68%) e 2σ (95%)

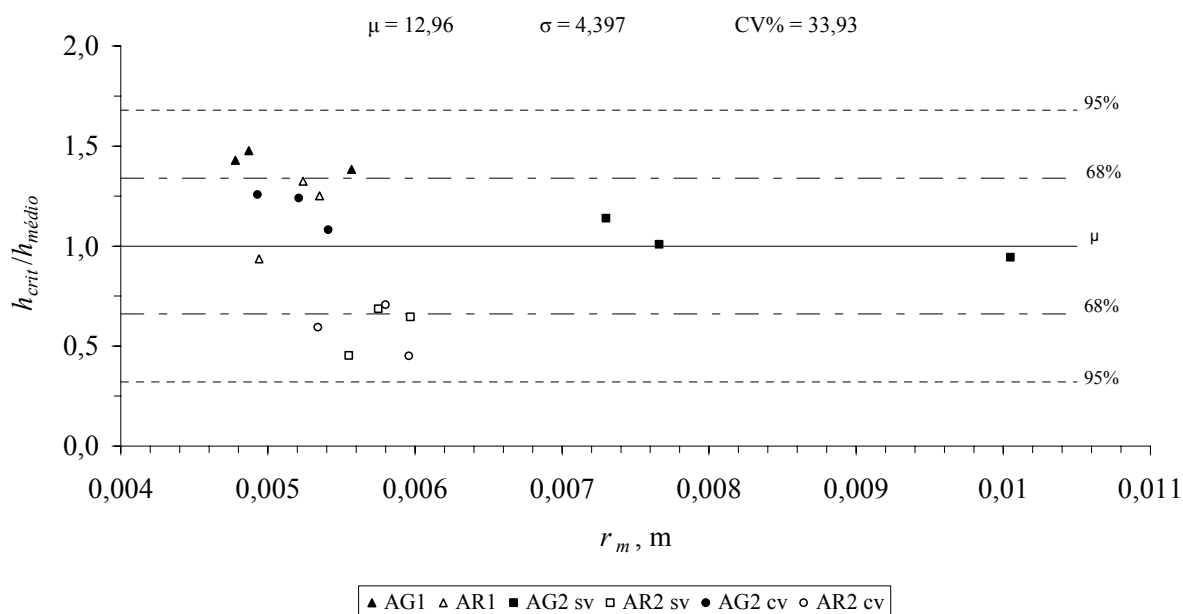


Figura 24 - Potencial matricial relativo ($h_{crit}/h_{médio}$) em função da distância média entre raízes (r_m) nos solos de textura arenosa (AR) e argilosa (AG) no primeiro (1) e segundo (2) experimento, e para os tratamentos sem (sv) ou com ventilação forçada (cv). Acima estão apresentados os valores da média (μ), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV%). A direita estão os valores percentuais referentes a 1σ (68%) e 2σ (95%)

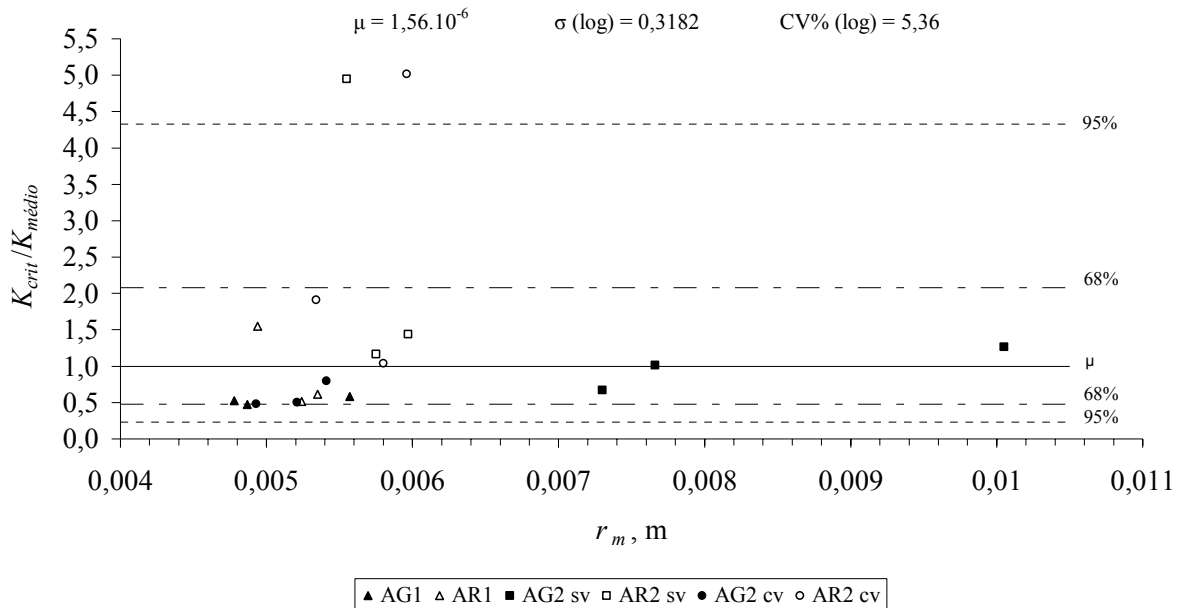


Figura 25 - Condutividade hidráulica relativa ($K_{crit}/K_{médio}$) em função da distância média entre raízes (r_m) nos solos de textura arenosa (AR) e argilosa (AG) no primeiro (1) e segundo (2) experimento, e para os tratamentos sem (sv) ou com ventilação forçada (cv). Acima estão apresentados os valores da média (μ), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV%). A direita estão os valores percentuais referentes a 1σ (68%) e 2σ (95%)

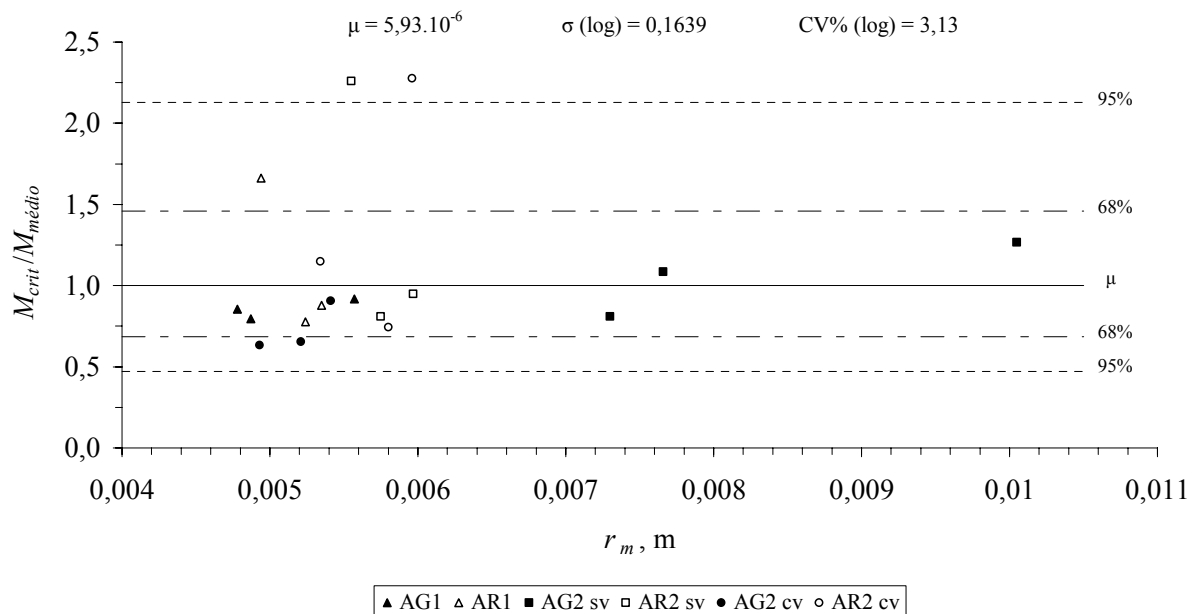


Figura 26 - Potencial de fluxo matricial relativo ($M_{crit}/M_{médio}$) em função da distância média entre raízes (r_m) nos solos de textura arenosa (AR) e argilosa (AG) no primeiro (1) e segundo (2) experimento, e para os tratamentos sem (sv) ou com ventilação forçada (cv). Acima estão apresentados os valores da média (μ), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV%). A direita estão os valores percentuais referentes a 1σ (68%) e 2σ (95%)

Hipoteticamente, a igualdade $T_R = T_a/T_p = M/M_1$ deveria resultar em um ajuste linear 1:1, para a função $T_R(M/M_1)$. No primeiro experimento observou-se que os dados seguiram a tendência desse modelo, obtendo coeficiente angular de 0,81; para um coeficiente linear zero. O coeficiente de determinação encontrado para esse ajuste foi de 0,3216; o que demonstra uma alta dispersão dos pontos (Figura 27). Também foram analisados os limites de confiança a 95% para o valor de coeficiente angular, o qual não foi significativo em relação à reta 1:1 (Tabela 15).

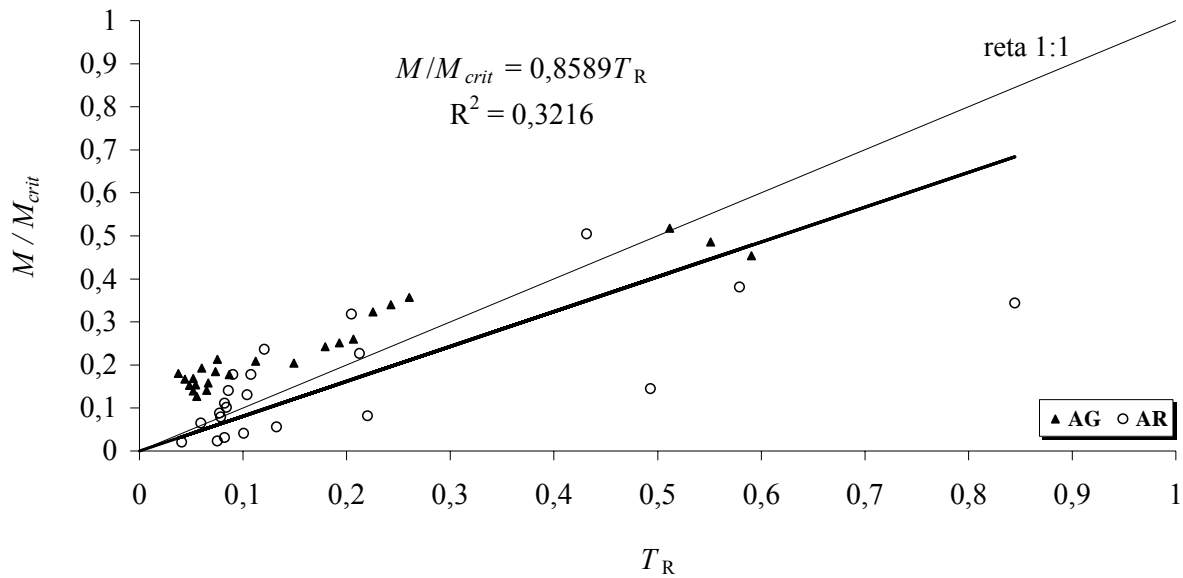


Figura 27 - Relação entre o potencial de fluxo matricial em um dado momento e no ponto crítico (M/M_{crit}) em função da transpiração relativa (T_R), para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR) no 1º experimento

Tabela 15 - Coeficientes angulares e seus respectivos limites de confiança a 95%, para os valores de $M/M_{crit}(T_R)$ no primeiro e segundo experimentos

	coeficiente angular	Limites de confiança 95%	
		inferior	superior
1º exp.	0,8589	0,7223	0,9958
1º exp. sem planta 5	1,0585	0,9225	1,1944
2º exp. sem ventilação	0,8913	0,7656	1,0233
2º exp. com ventilação	0,9244	0,7789	1,0698

Uma melhor aproximação dessa condição houve quando foram retirados os valores de $M/M_{crit}(T_R)$ observados na planta 5, cultivada no solo AR. Desta forma, obteve-se um coeficiente

angular bem próximo a 1, com seus limites de confiança significativos em relação a reta 1:1. Ainda, esse ajuste demonstrou uma menor dispersão a partir do valor de $R^2 = 0,6676$ (Figura 28).

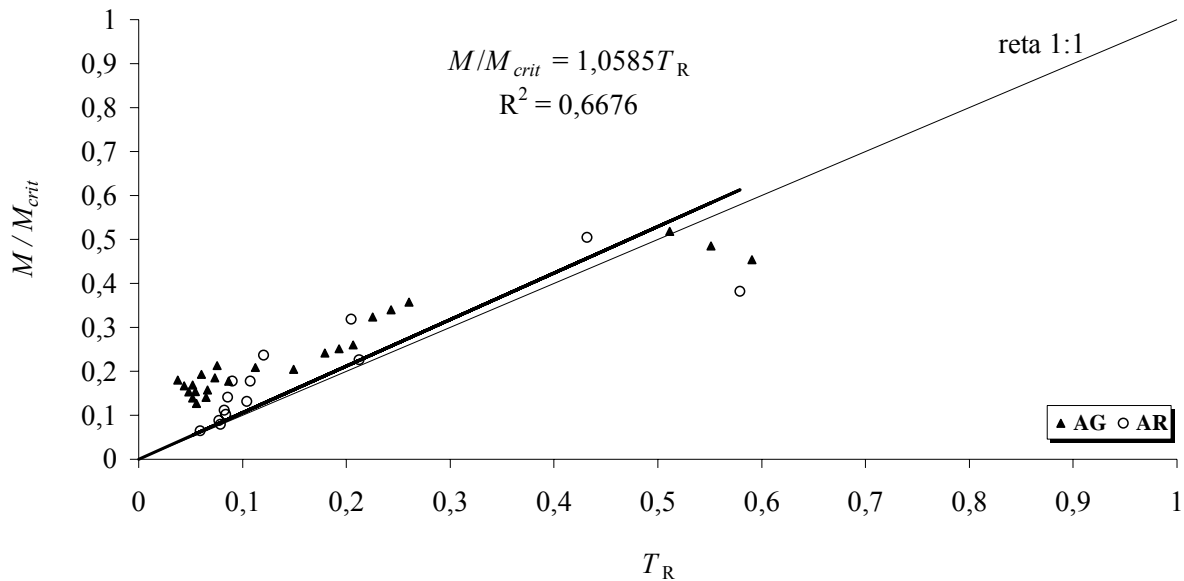


Figura 28 - Relação o potencial de fluxo matricial em um dado momento e no ponto crítico (M/M_{crit}) em função da transpiração relativa (T_R), para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR), sem os valores observados na planta 5 cultivada no solo AR, no 1º experimento

Esta dispersão ou variabilidade entre os pontos é devido, principalmente, às incertezas experimentais: diferenças de área foliar e de área de absorção radicular; escala temporal (diária); e demanda atmosférica.

Verificou-se também que existiu uma alta sensibilidade à escala temporal, dada pela avaliação no efeito do atraso na identificação do M_{crit} para a planta 5 do solo AR, a qual obteve valores mais distantes da reta 1:1. Compararam-se os valores M/M_{crit} observados aos que seriam obtidos atrasando-se o ponto crítico em um dia (M/M_{crit}'); assim, ajustou-se uma linha de tendência (passando pela origem) para os valores de M/M_{crit}' em função de T_R bem próxima da reta 1:1, com valor de coeficiente angular de 0,9265 (Figura 29).

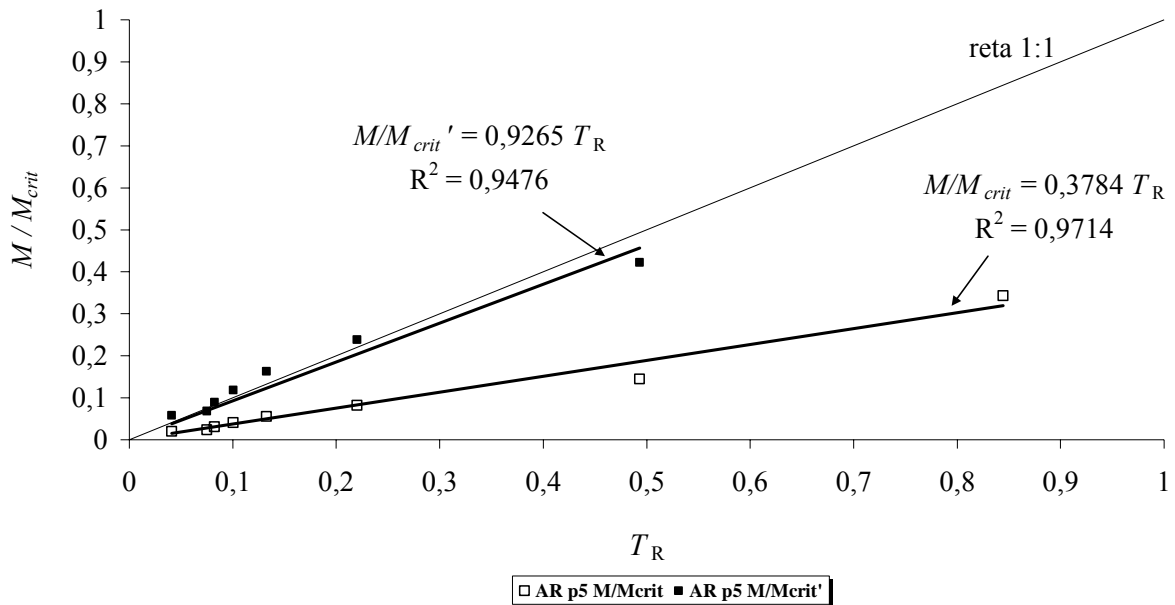


Figura 29 - Valores de M/M_{crit} (M_{crit} obtido no 1º dia anterior a $T_R < 1$) e M/M_{crit}' (M_{crit}' obtido no 1º dia de $T_R < 1$), na planta 5 do solo AR; e reta 1:1 ($M/M_{crit} = T_R$), no 1º experimento

Esse mau ajuste para a planta 5 do solo AR, do primeiro experimento, se deve, analisando-se em termos numéricos, a sua taxa de transpiração atual no primeiro dia após o ponto crítico (ponto crítico = 4º dia). Pois, essa foi muito próxima da taxa de transpiração potencial, gerando um valor de $T_R = 0,84$ (Tabela 34 do ANEXO K). Essa maior taxa de transpiração em relação às demais plantas ocasionou uma maior secagem do solo nesse instante, diminuindo θ , que por sua vez diminuiu M ; e assim, resultou em um valor de M/M_{crit} menor do que seria se, por exemplo, logo após atingir o ponto crítico tivesse uma $T_R = 0,50$; seguindo a tendência das demais plantas (Tabela 34 do ANEXO K).

Para o segundo experimento (Tabelas 39 e 40 do ANEXO K; Figura 30) os valores de $M/M_{crit}(T_R)$ também obtiveram uma alta dispersão para os tratamentos sem e com ventilação ($R^2 = 0,50$ e $R^2 = 0,34$; respectivamente). Embora com alta dispersão, verificou-se que as equações ajustadas corresponderam a retas bem próximas à reta 1:1; obtendo coeficientes angulares de 0,8913 (sem ventilação) e 0,9244 (com ventilação), com seus limites de confiança significativos em relação à reta 1:1 (Tabela 15). No entanto, ao contrário do primeiro experimento, essa dispersão não ocorreu devido à apenas uma unidade experimental (planta).

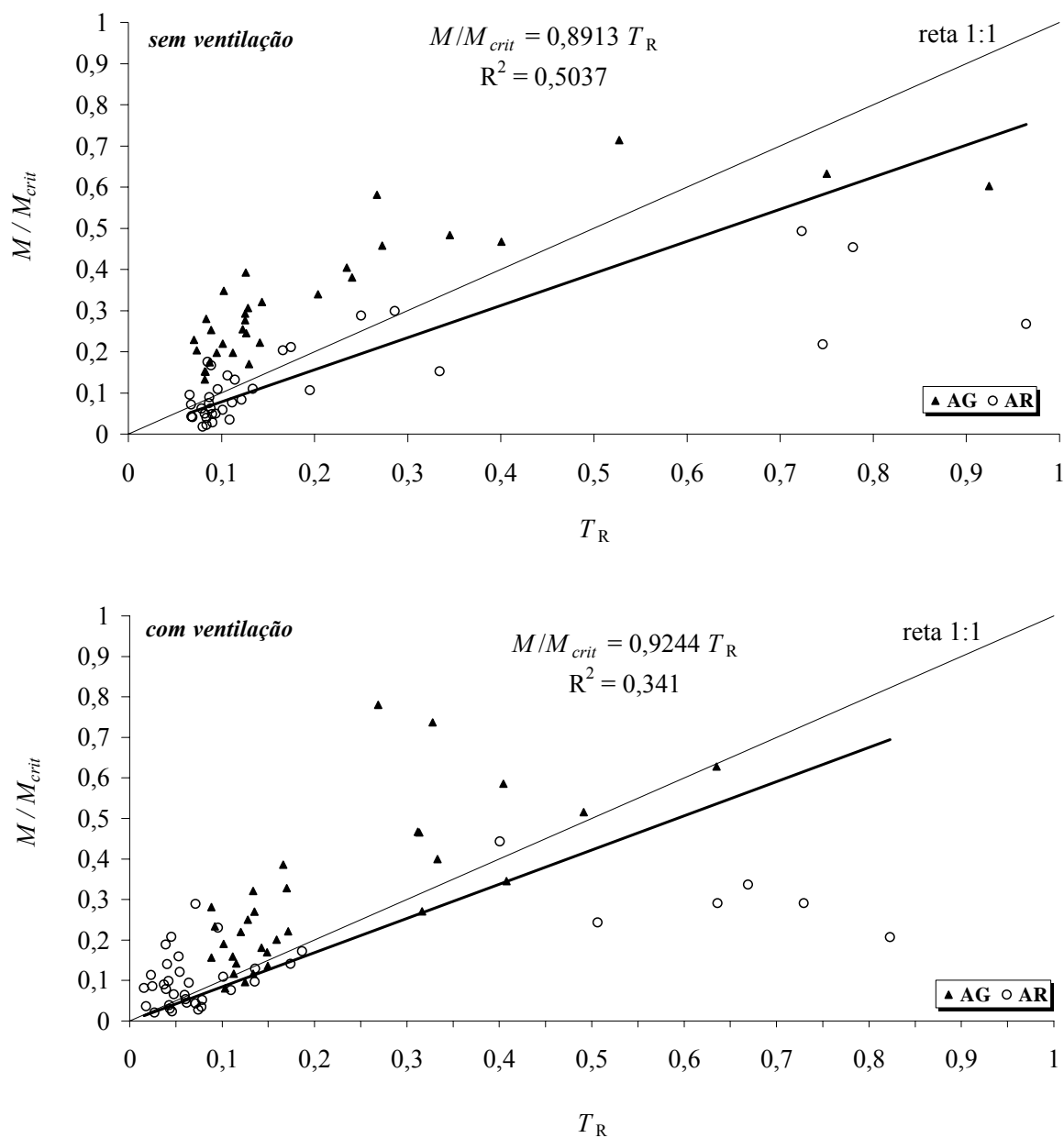


Figura 30 - Equação de ajuste do potencial de fluxo matricial em um dado momento e no ponto crítico (M/M_{crit}) dos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), em função da transpiração relativa (T_R), a partir do ponto crítico, sem ou com ventilação forçada, no 2º experimento

2.3.4 Transpiração relativa em função das variáveis hidráulicas do solo

2.3.4.1 Experimento versus previsão teórica

Com base nos valores das variáveis: teor de água (θ), potencial matricial (h), condutividade hidráulica (K) e potencial de fluxo matricial (M), obtidas no experimento, estimaram-se respectivos valores teóricos de transpiração relativa (T_R). Os valores experimentais e teóricos foram avaliados a partir dos índices RMSE, MAE e “d”. Quanto menores os valores de RMSE e MAE e maiores os valores do índice “d”, maior é a semelhança entre os dados experimentais e de previsão teórica.

Para o solo AG os melhores resultados para as variáveis θ e h foram observados no segundo experimento no tratamento com ventilação forçada (Figuras 35 e 36). No entanto, para as variáveis K e M , destacaram-se os índices do primeiro experimento (Figuras 33 e 34, respectivamente); exceto para o índice MAE da variável M , que foi menor no segundo experimento no tratamento com ventilação (Figura 38).

O primeiro experimento obteve os melhores resultados nos três índices, para todas as variáveis observadas no solo AR (Figuras 31, 32, 33 e 34); exceto para os valores dos índices RMSE e MAE, que foram menores no segundo experimento no tratamento sem ventilação forçada (Figura 40).

As comparações entre os valores experimentais e teóricos mostraram bom ajuste tanto para o primeiro quanto para o segundo experimento, obtendo valores de índice “d” superiores a 0,87 e 0,84, respectivamente. Com exceção da variável h no solo AG do primeiro experimento, que obteve valor de “d” igual a 0,6846 (Figura 32) e no solo AG sem ventilação do segundo experimento, que obteve valor igual a 0,7160 (Figura 36).

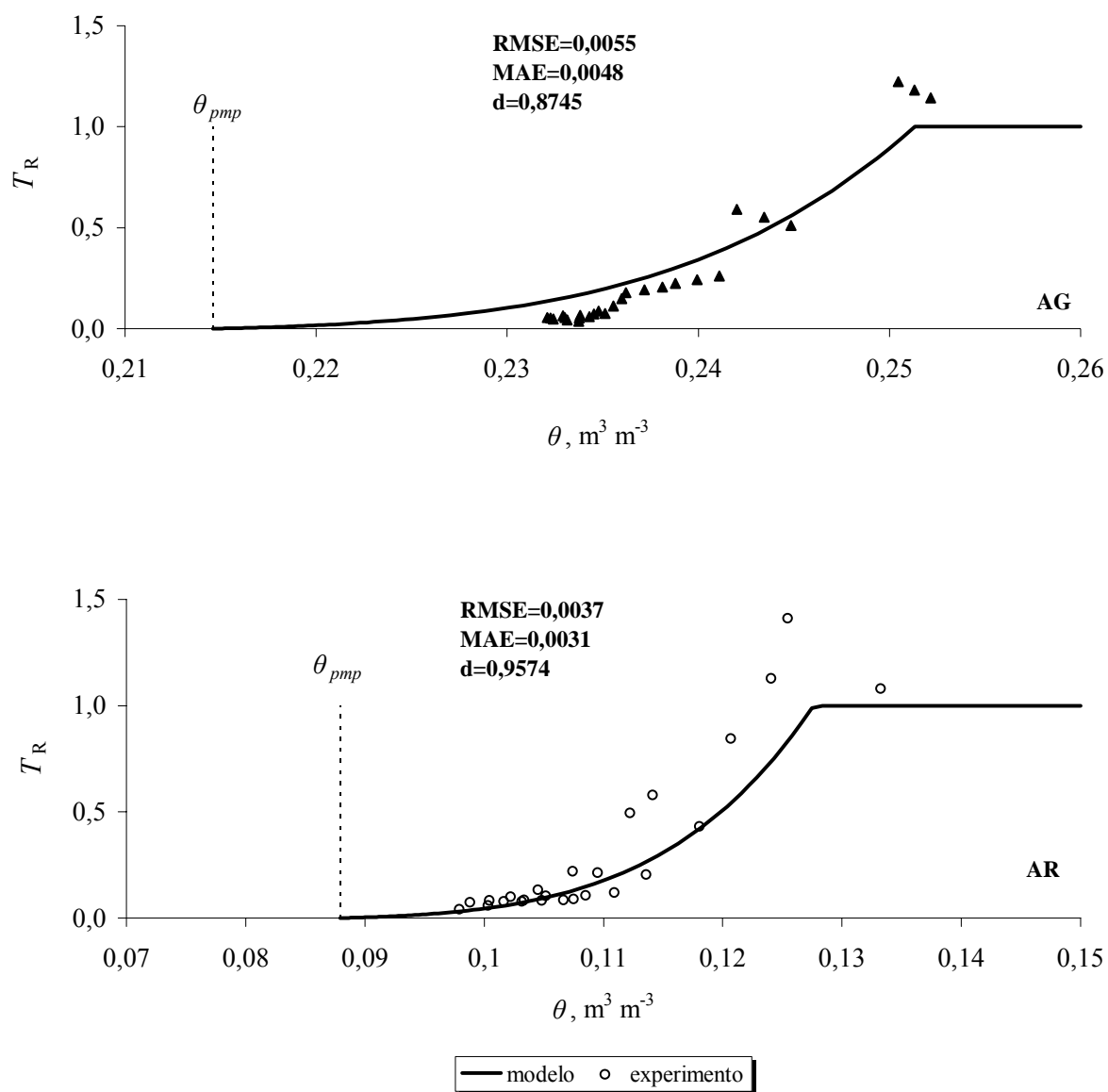


Figura 31 - Transpiração relativa (T_R) em função do teor de água no solo (θ), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 1º experimento para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR)

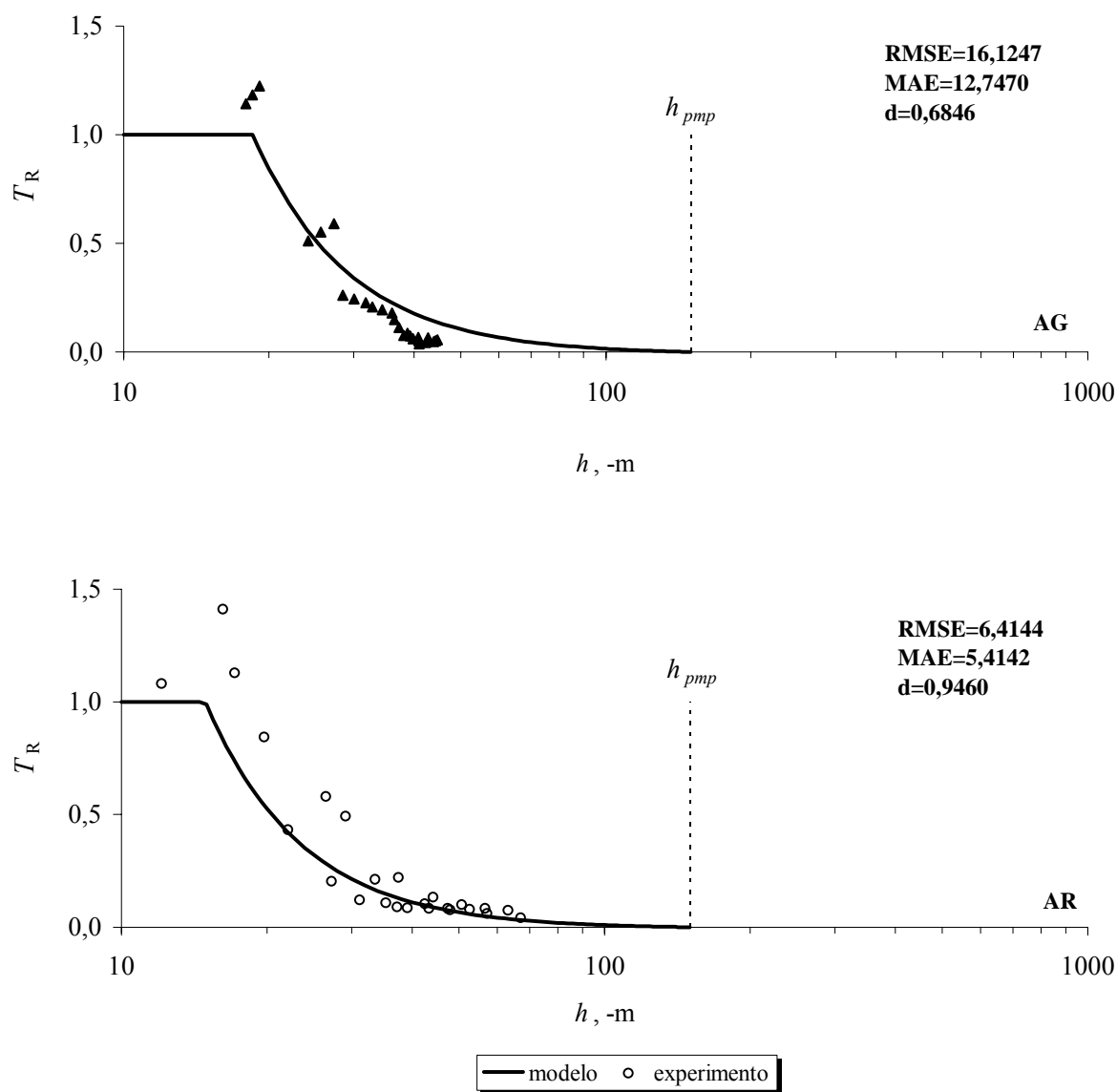


Figura 32 - Transpiração relativa (T_R) em função do potencial matricial do solo (h), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 1º experimento para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR)

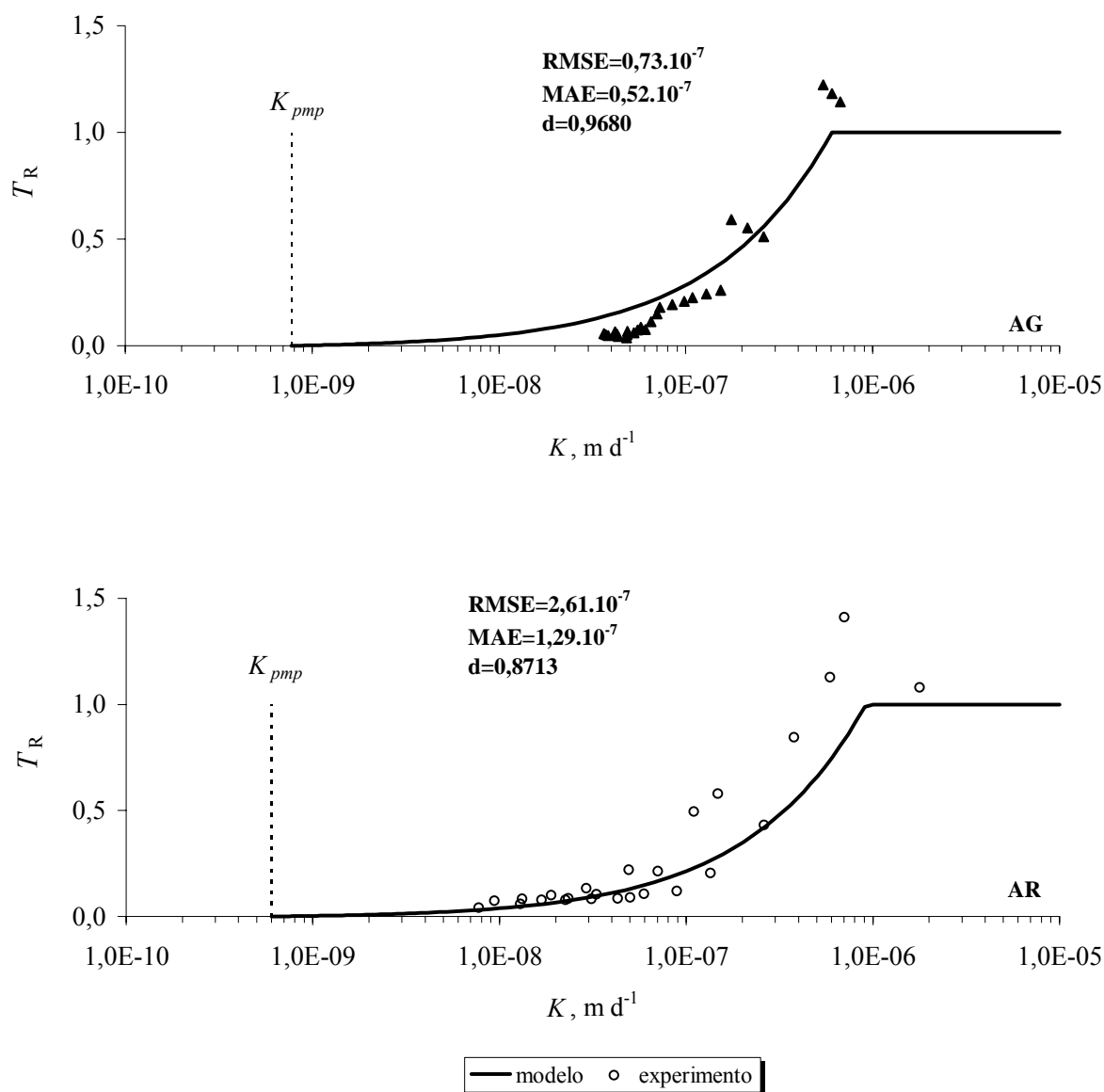


Figura 33 - Transpiração relativa (T_R) em função da condutividade hidráulica do solo (K), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 1º experimento para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR)

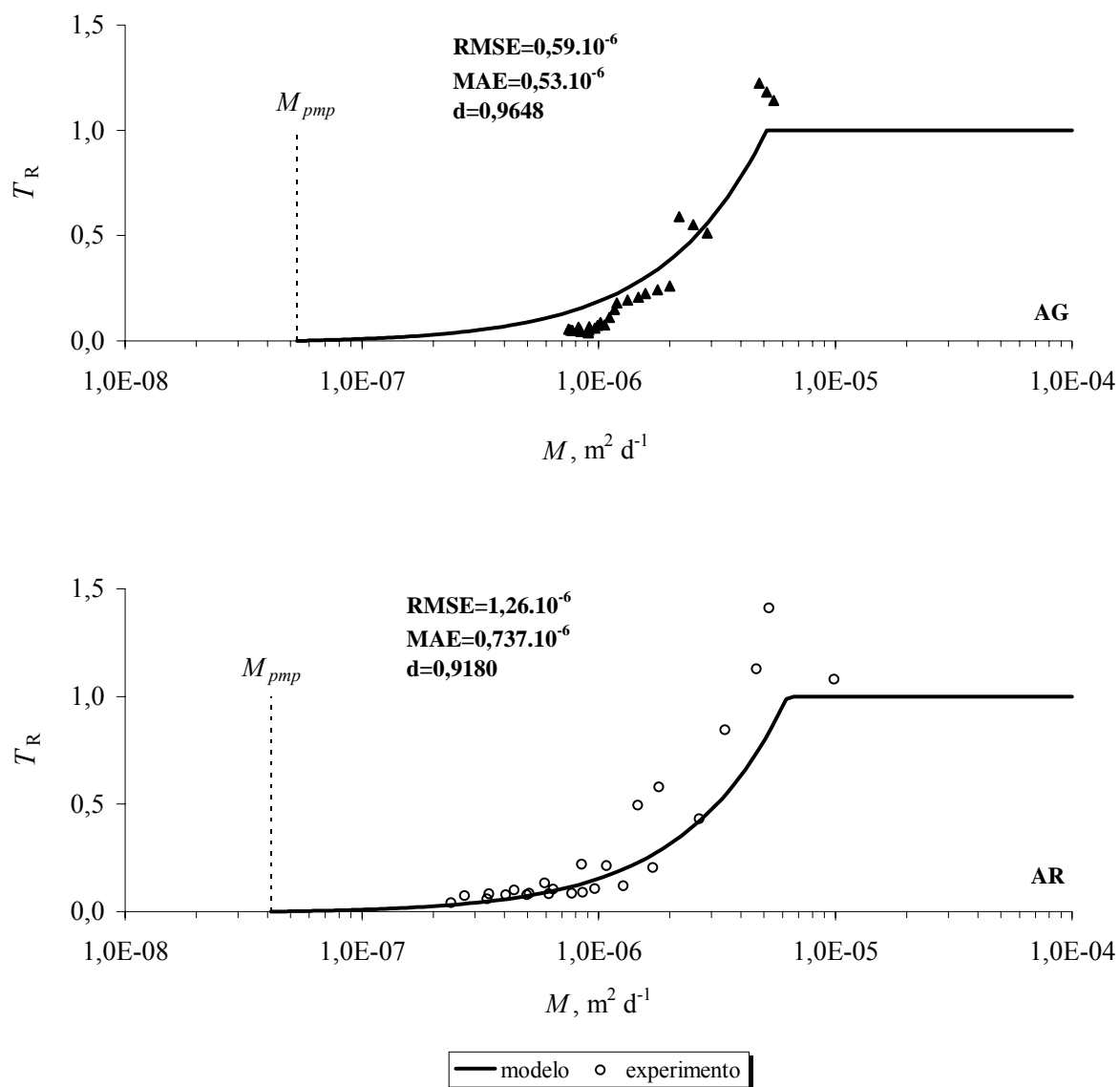


Figura 34 - Transpiração relativa (T_R) em função do potencial de fluxo matricial (M), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 1º experimento para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR)

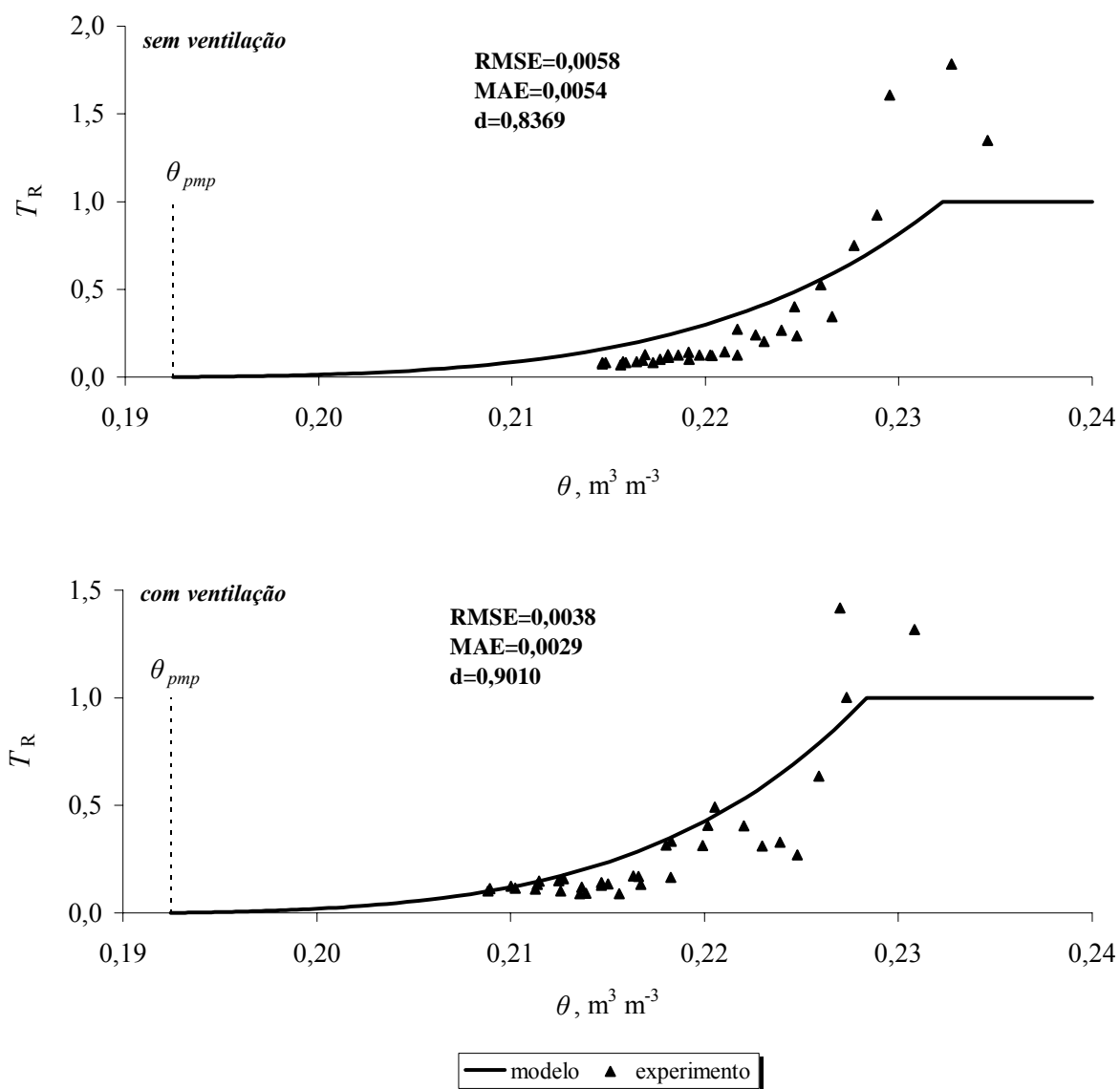


Figura 35 - Transpiração relativa (T_R) em função do teor de água no solo (θ), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AG), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

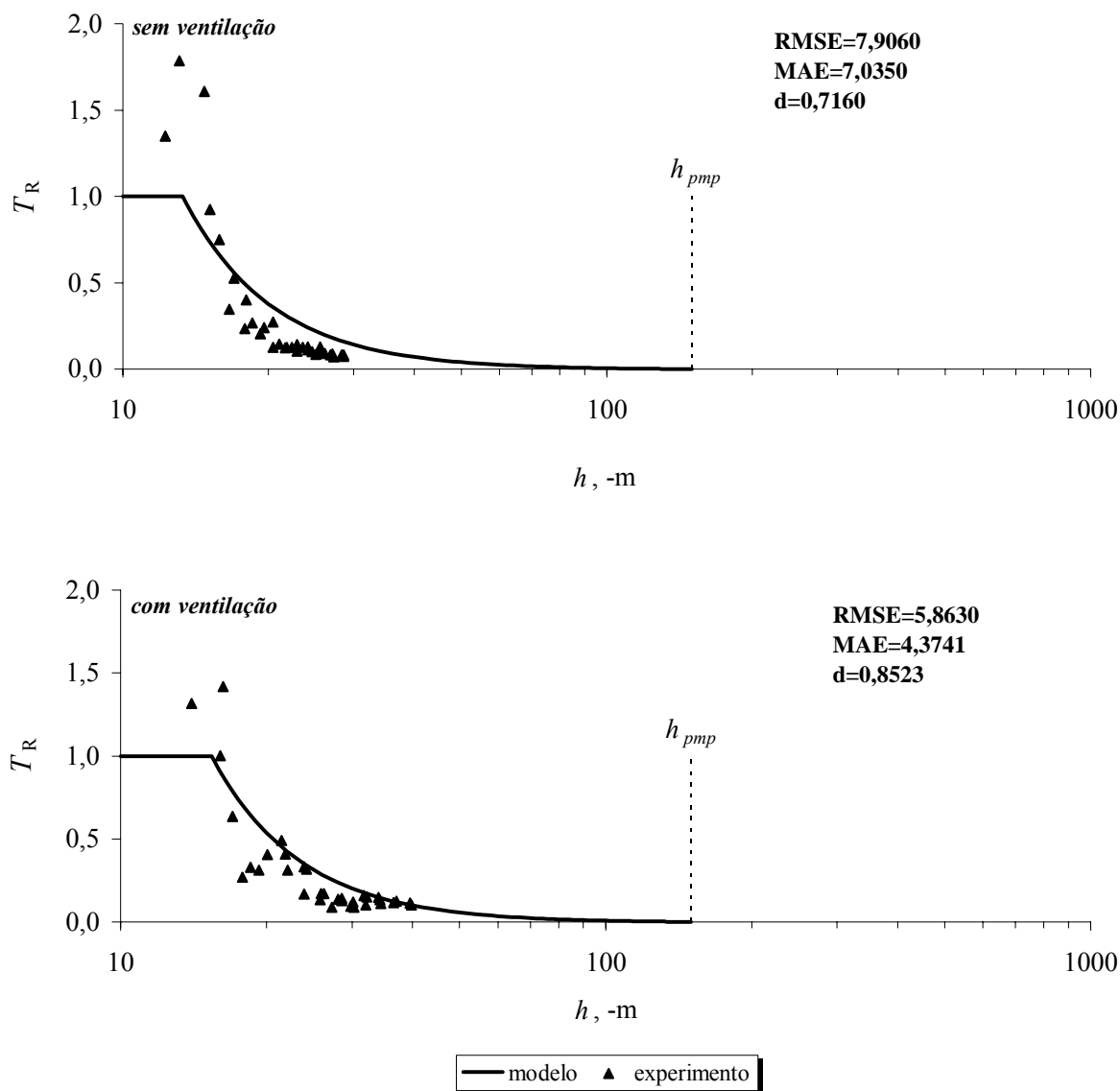


Figura 36 - Transpiração relativa (T_R) em função do potencial matricial do solo (h), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AG), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

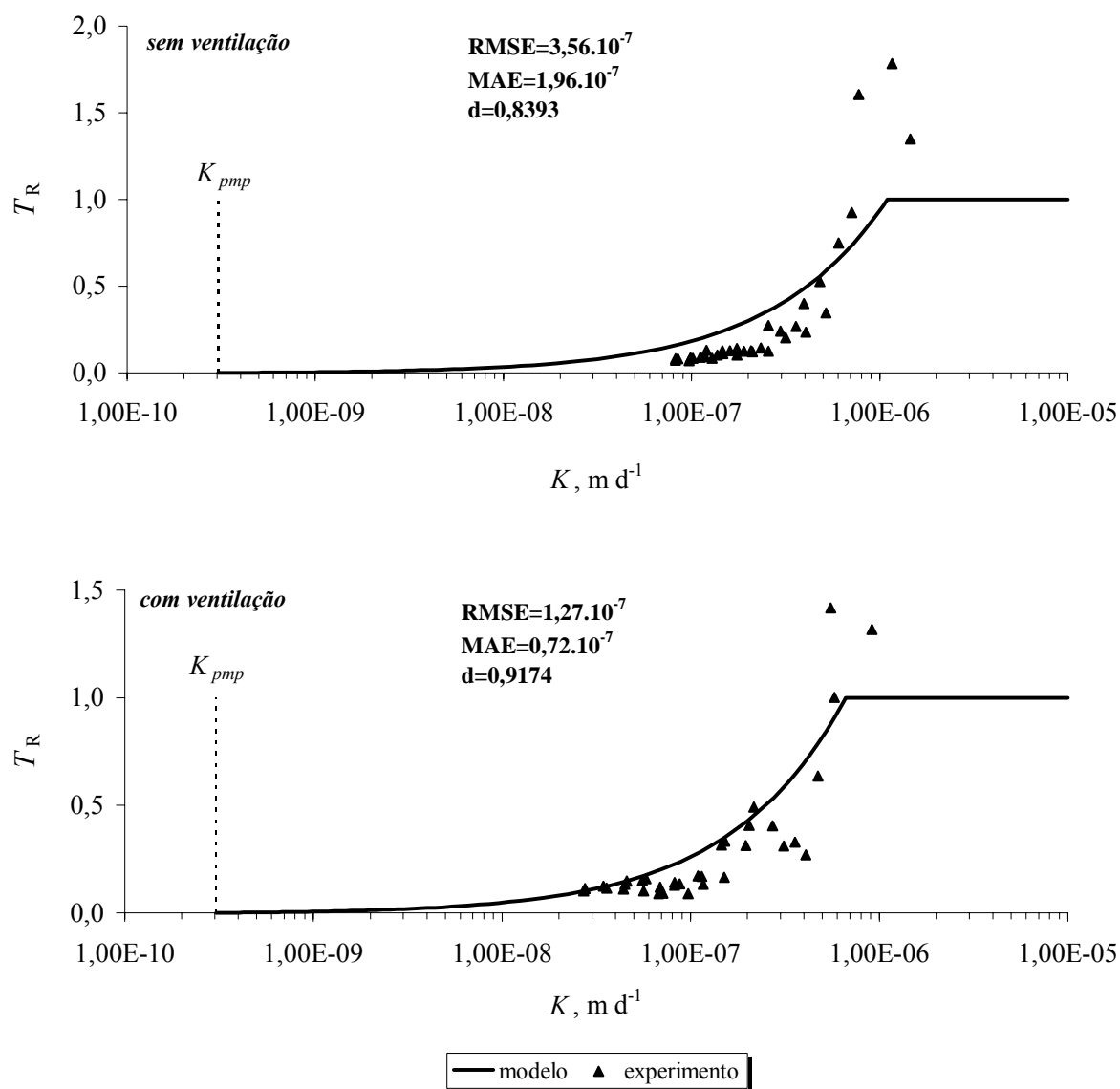


Figura 37 - Transpiração relativa (T_R) em função da condutividade hidráulica do solo (K), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AG), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

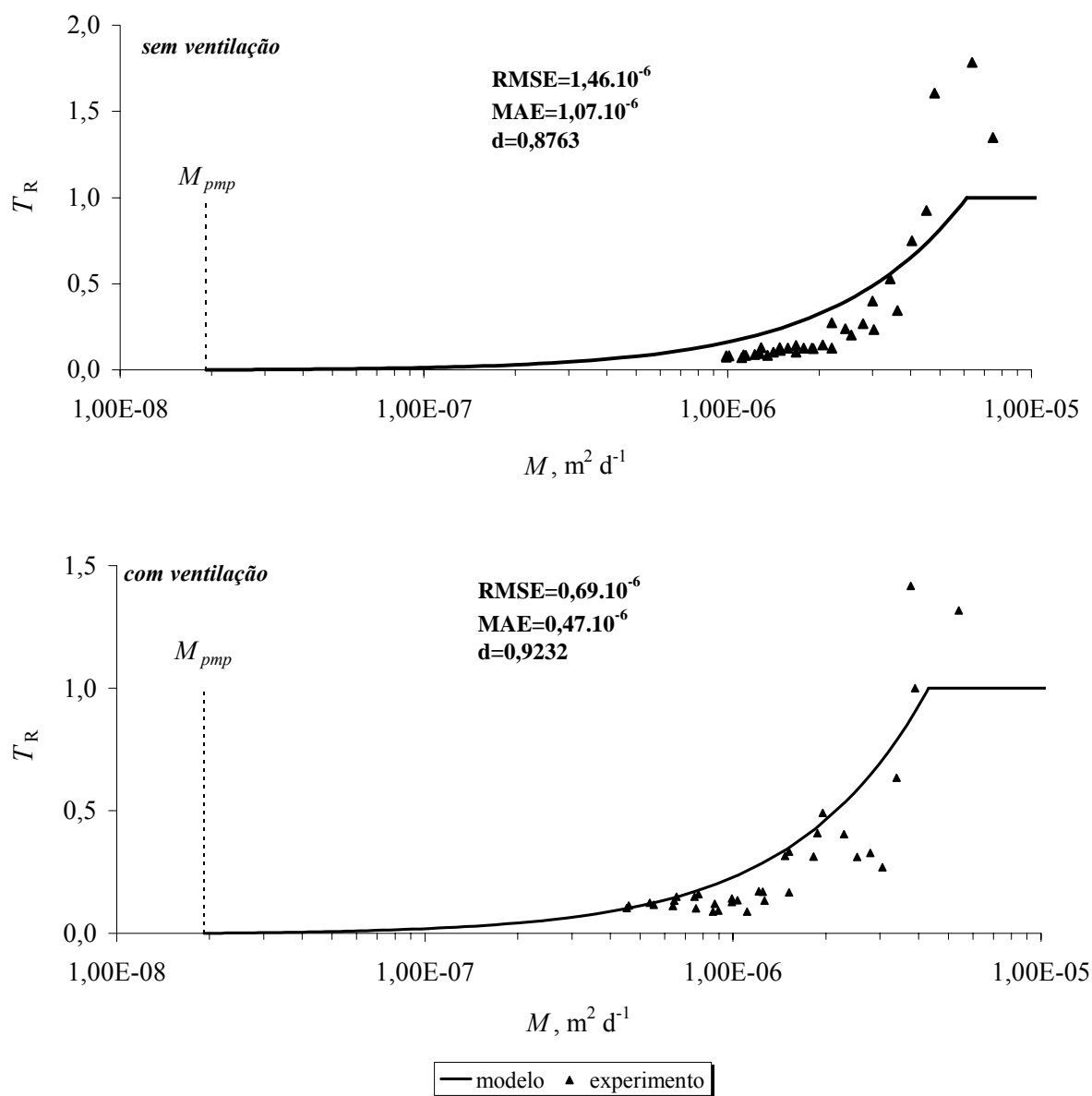


Figura 38 - Transpiração relativa (T_R) em função do potencial de fluxo matricial do solo (M), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AG), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

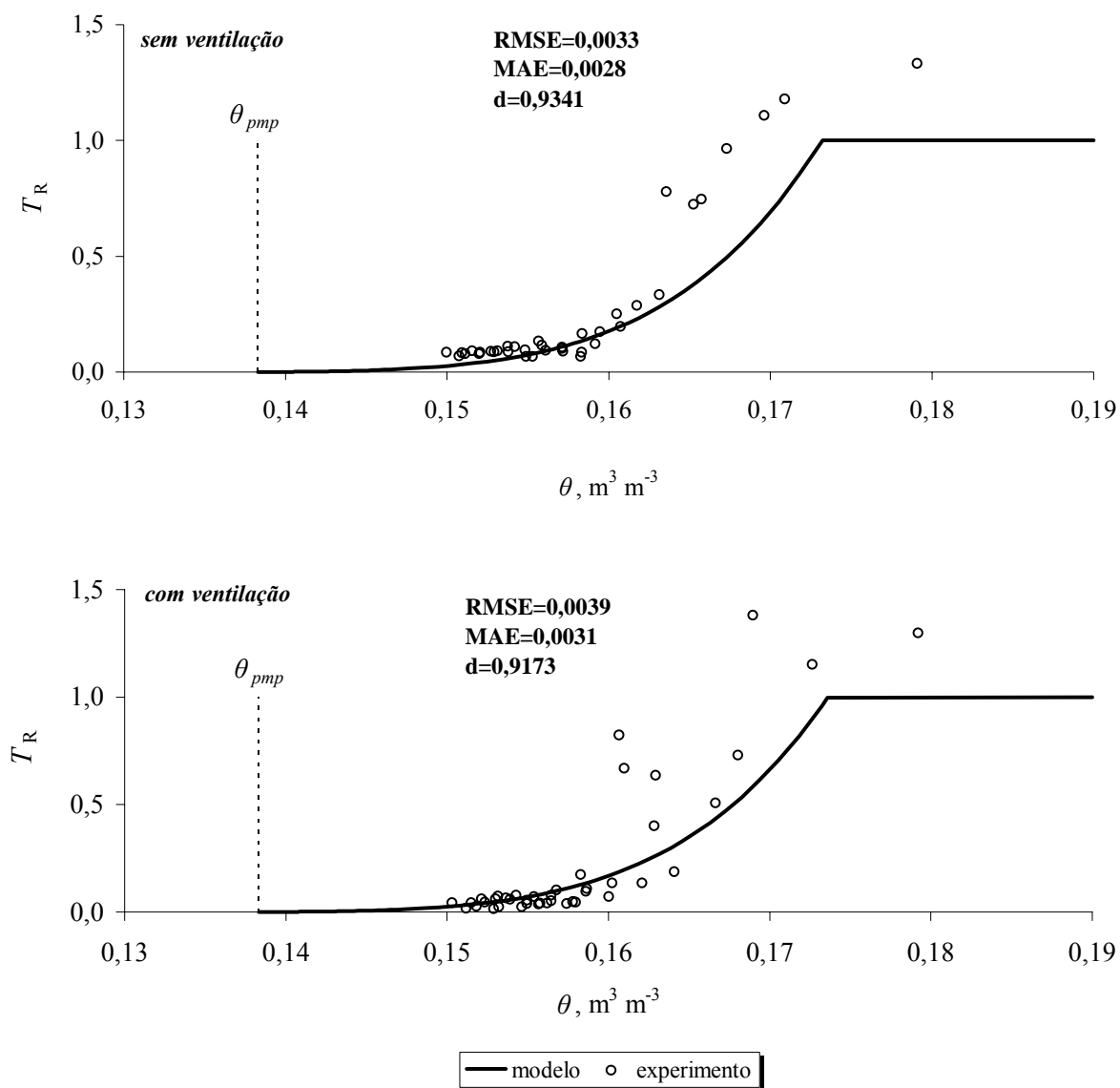


Figura 39 - Transpiração relativa (T_R) em função do teor de água no solo (θ), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AR), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

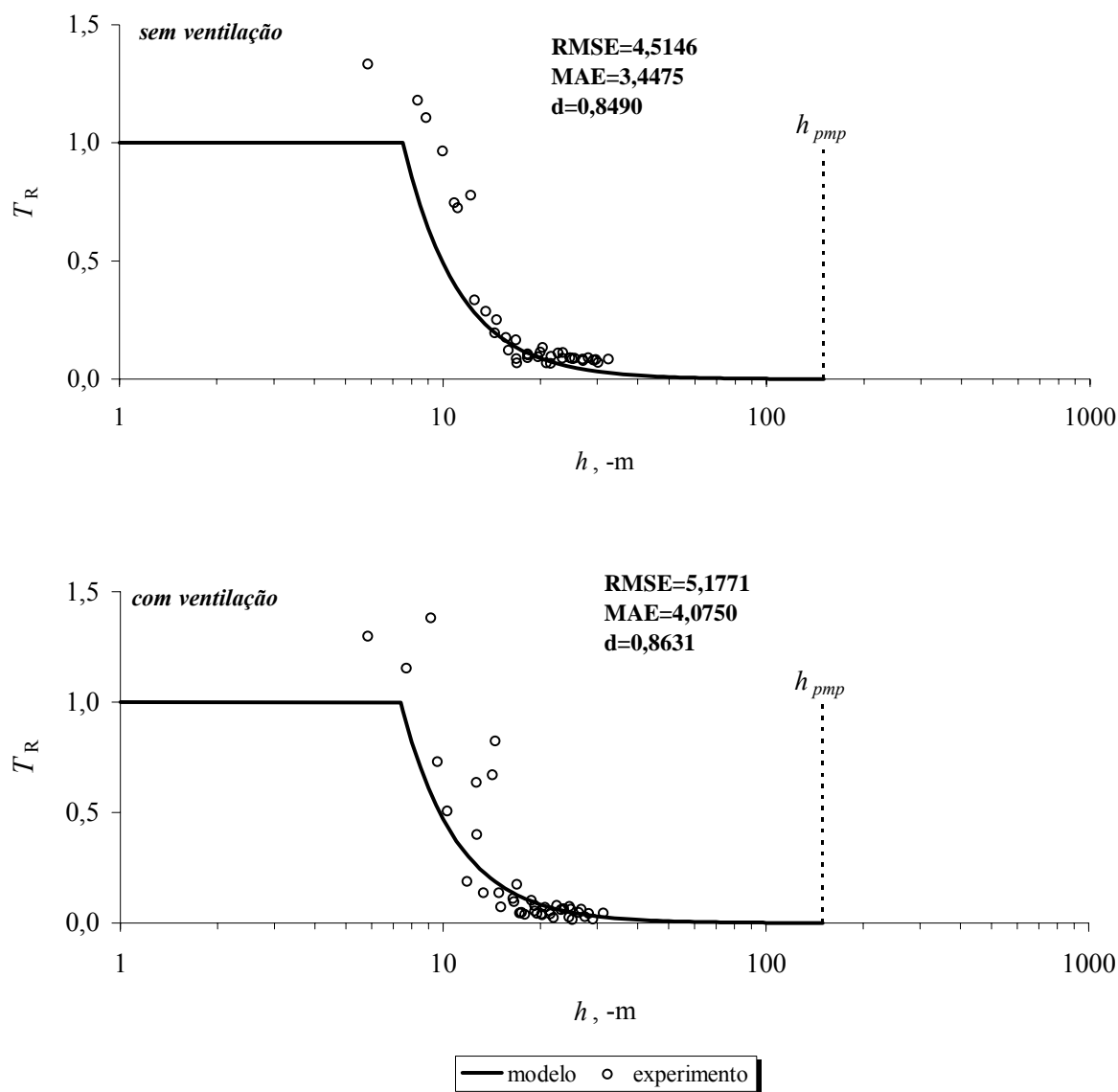


Figura 40 - Transpiração relativa (T_R) em função do potencial matricial do solo (h), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AR), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

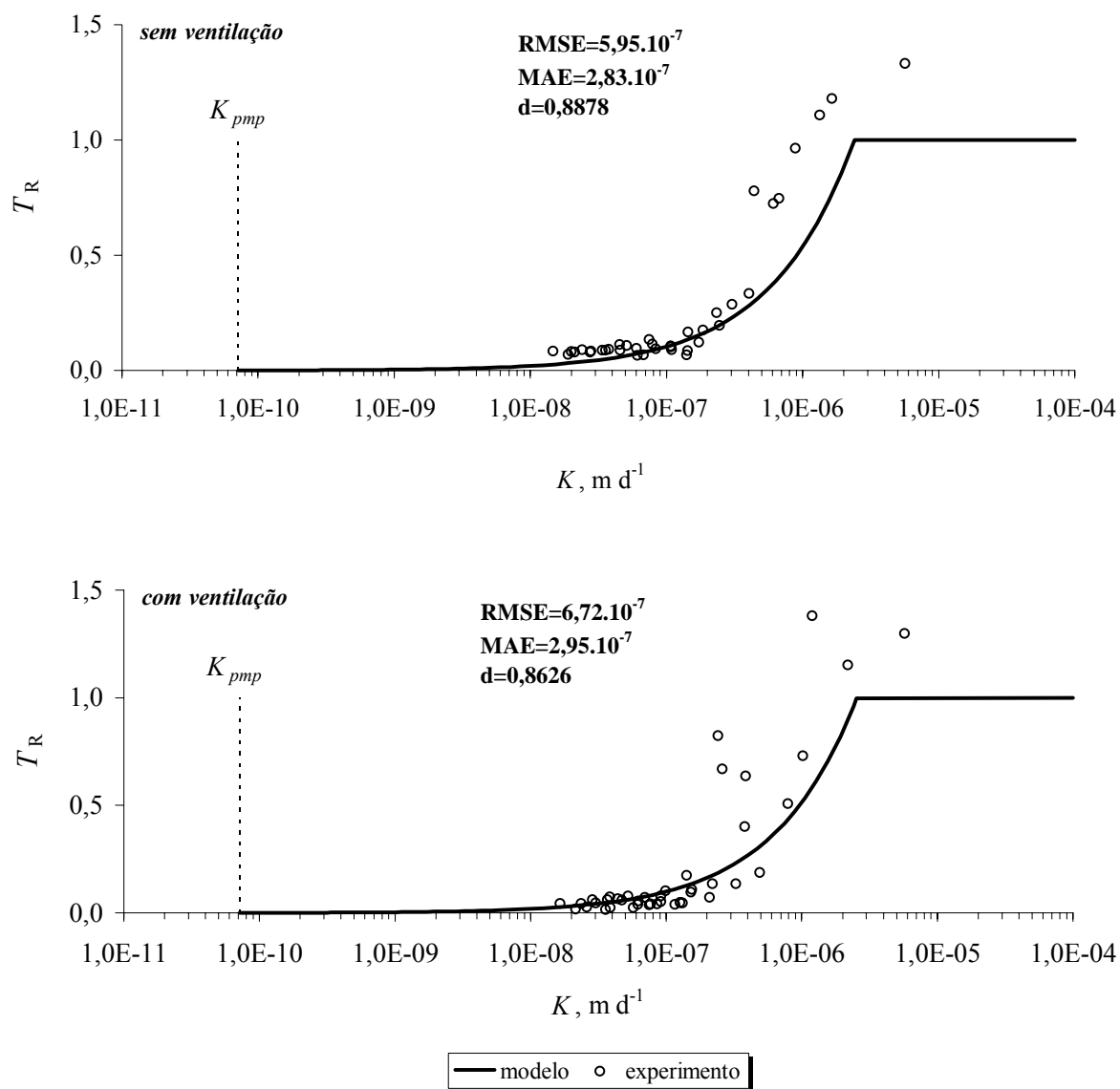


Figura 41 - Transpiração relativa (T_R) em função da condutividade hidráulica do solo (K), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AR), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

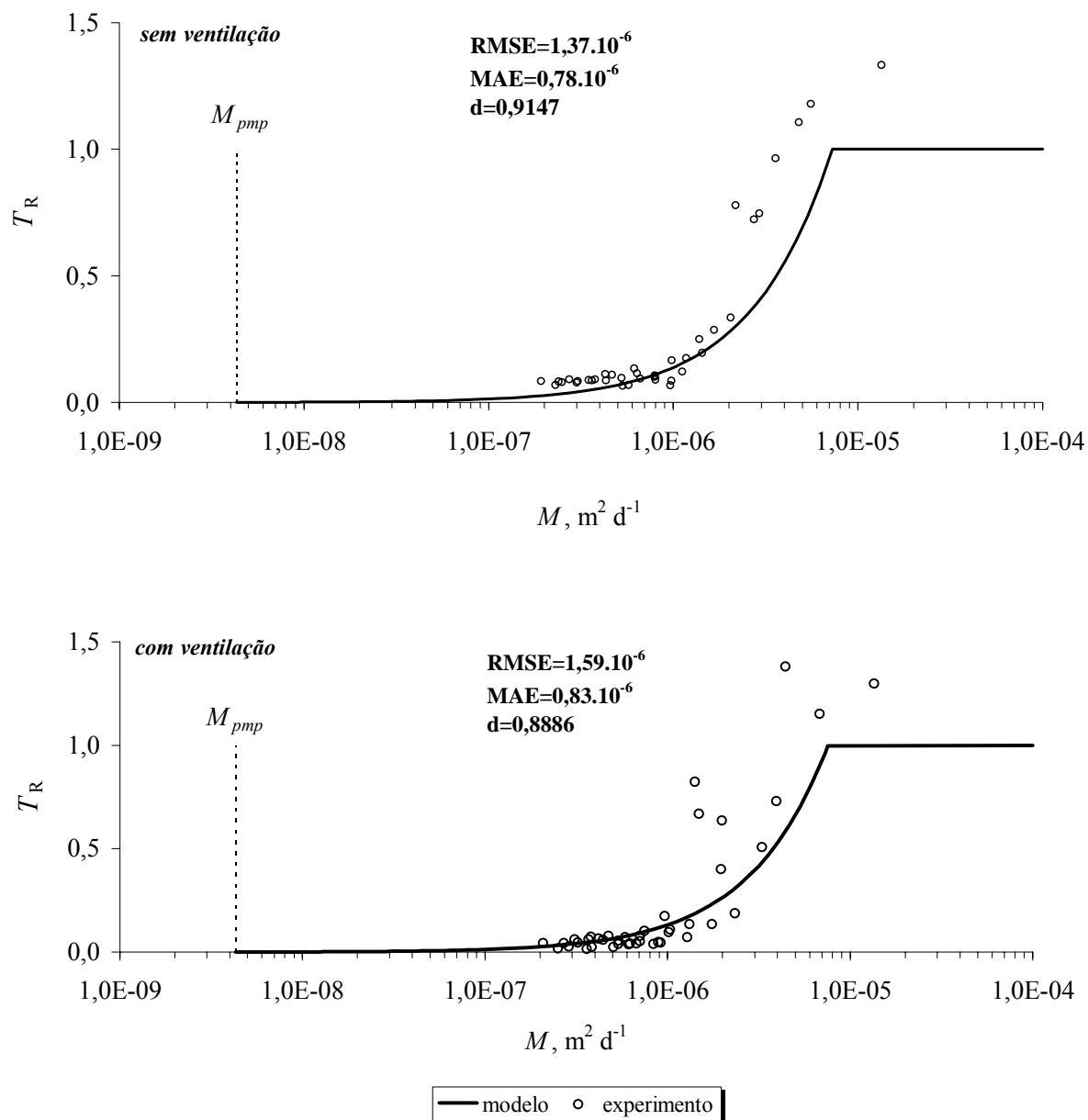


Figura 42 - Transpiração relativa (T_R) em função do potencial de fluxo matricial do solo (M), estimado pelo modelo (linha contínua) e observado experimentalmente (pontos) durante o 2º experimento para o solo argiloso (AR), nos tratamentos sem e com ventilação forçada

2.3.5 Potencial de fluxo matricial observado no experimento e simulado por modelo

Em ambos os experimentos observaram-se diferenças na ordem de grandeza para os valores de potencial de fluxo matricial, no ponto crítico, observados no experimento (M_{crit}) em relação aos estimados (M_{crit}^*) pela eq. (9). Os valores obtidos pelo modelo proposto por Jong Van Lier, Metselaar e Van Dam (2006) se mostraram em torno de 10 vezes menores que os valores observados no experimento (Tabelas 16, 17 e 18). Uma possível explicação para esse fato é a heterogeneidade na distribuição do sistema radicular no volume de solo dos vasos. Isso ocorre, principalmente, pelo crescimento preferencial das raízes em rachaduras e em macroporos do solo, que ocasiona um acúmulo de raízes em determinados pontos no solo (PASSIOURA, 1988). Essa maior densidade radicular, em certos pontos, gerou uma menor distância média entre raízes (r_m) em comparação ao valor médio estimado pelo modelo (r_m^*), o qual considera uma distribuição homogênea das raízes (Tabelas 16, 17 e 18).

O cálculo de M_{crit}^* considera que as raízes estão distribuídas uniformemente no solo, o que promove uma máxima eficiência na extração de água. Isso explica a diferença na ordem de grandeza entre M_{crit} e M_{crit}^* , pois no solo que for mais bem explorado pelas raízes (distribuição uniforme) o ponto crítico será alcançado em um teor de água menor, um potencial matricial mais negativo e, conseqüentemente, um M menor (Tabelas 16, 17 e 18).

Nos dois experimentos verificou-se que a distância média entre raízes (r_m), calculada em função da densidade radicular obtida no experimento, supondo uma distribuição homogênea (eq. 10), foi menor que r_m^* estimada a partir do potencial de fluxo matricial observado no experimento M_{crit} (eq. 11). Sendo $r_m < r_m^*$ observa-se que, na realidade, a eficiência de extração de água pelas raízes é menor, pois sua distribuição radicular é desigual.

Foram obtidos coeficientes de heterogeneidade da distribuição radicular a partir da razão entre r_m/r_m^* , o qual indica quantas vezes a distância r_m deveria aumentar para que uma determinada densidade de raízes tivesse uma distribuição uniforme no solo. Foram determinados os desvios padrão e os coeficientes de variação para quantificar a variabilidade dessa relação. Observou-se uma maior variação nesses coeficientes no segundo experimento (Tabelas 16, 17 e 18). Os valores de heterogeneidade apresentaram-se em torno de 0,30; indicando que, com um terço da massa radicular, se distribuída uniformemente, a mesma eficiência de extração radicular poderia ser obtida.

Tabela 16 - Distância média entre raízes observada (r_m , m), potencial de fluxo matricial no ponto crítico observado (M_{crit} , $m^2 d^{-1}$), transpiração potencial (T_p , $m d^{-1}$), potencial de fluxo matricial no ponto crítico estimado (M_{crit}^* , $m^2 d^{-1}$), distância média entre raízes estimada (r_m^* , m) e coeficiente de heterogeneidade (r_m/r_m^*), para o 1º experimento

Planta	r_m	M_{crit}	T_p	M_{crit}^*	r_m^*	r_m/r_m^*
<i>solo Argiloso</i>						
4	0,00557	$5,45 \cdot 10^{-6}$	0,00226	$2,22 \cdot 10^{-7}$	0,0206	0,2696
5	0,00487	$4,72 \cdot 10^{-6}$	0,00217	$1,77 \cdot 10^{-7}$	0,0198	0,2465
6	0,00478	$5,07 \cdot 10^{-6}$	0,00221	$2,08 \cdot 10^{-7}$	0,0202	0,2364
média						0,2508
DP ¹						0,0170
CV(%) ²						6,78
<i>solo Arenoso</i>						
4	0,00535	$5,20 \cdot 10^{-6}$	0,00313	$3,40 \cdot 10^{-7}$	0,0176	0,3033
5	0,00494	$9,85 \cdot 10^{-6}$	0,00373	$2,95 \cdot 10^{-7}$	0,0215	0,2300
6	0,00524	$4,60 \cdot 10^{-6}$	0,00321	$2,42 \cdot 10^{-7}$	0,0166	0,3162
média						0,2832
DP						0,0465
CV(%)						16,41

¹Desvio padrão; ²Coefficiente de variação.

Tabela 17 - Distância média entre raízes observada (r_m , m), potencial de fluxo matricial no ponto crítico observado (M_{crit} , $m^2 d^{-1}$), transpiração potencial média (T_p , $m d^{-1}$), potencial de fluxo matricial no ponto crítico estimado (M_{crit}^* , $m^2 d^{-1}$), distância média entre raízes estimada (r_m^* , m) e coeficiente de heterogeneidade (r_m/r_m^*), para o tratamento sem ventilação forçada, no 2º experimento

Planta	r_m	M_{crit}	T_p	M_{crit}^*	r_m^*	r_m/r_m^*
<i>solo Argiloso</i>						
4	0,00766	$6,44 \cdot 10^{-6}$	0,00160	$3,70 \cdot 10^{-7}$	0,02549	0,3005
5	0,01005	$7,51 \cdot 10^{-6}$	0,00161	$7,07 \cdot 10^{-7}$	0,02719	0,3697
6	0,00730	$4,80 \cdot 10^{-6}$	0,00162	$3,33 \cdot 10^{-7}$	0,02247	0,3247
média						0,3316
DP ¹						0,0351
CV(%) ²						10,58
<i>solo Arenoso</i>						
4	0,00597	$5,62 \cdot 10^{-6}$	0,00203	$2,60 \cdot 10^{-7}$	0,02176	0,2745
5	0,00555	$13,40 \cdot 10^{-6}$	0,00239	$2,57 \cdot 10^{-7}$	0,02948	0,1883
6	0,00575	$4,80 \cdot 10^{-6}$	0,00211	$2,46 \cdot 10^{-7}$	0,02013	0,2855
média						0,2494
DP						0,0028
CV(%)						21,33

¹Desvio padrão; ²Coefficiente de variação.

Tabela 18 - Distância média entre raízes observada (r_m , m), potencial de fluxo matricial no ponto crítico observado (M_{crit} , $m^2 d^{-1}$), transpiração potencial (T_p , $m d^{-1}$), potencial de fluxo matricial no ponto crítico estimado (M_{crit}^* , $m^2 d^{-1}$), distância média entre raízes estimada (r_m^* , m) e coeficiente de homogeneidade (r_m/r_m^*), para o tratamento com ventilação forçada, no 2º experimento

Planta	r_m	M_{crit}	T_p	M_{crit}^*	r_m^*	r_m/r_m^*
..... <i>solo Argiloso</i>						
4	0,00521	$3,88.10^{-6}$	0,00171	$1,58.10^{-7}$	0,02013	0,2587
5	0,00541	$5,38.10^{-6}$	0,00182	$1,84.10^{-7}$	0,02249	0,2403
6	0,00493	$3,76.10^{-6}$	0,00173	$1,41.10^{-7}$	0,01976	0,2496
média						0,2495
DP ¹						0,0092
CV(%) ²						3,64
..... <i>solo Arenoso</i>						
4	0,00596	$1,35.10^{-5}$	0,00269	$3,42.10^{-7}$	0,02816	0,2115
5	0,00534	$6,81.10^{-6}$	0,00267	$2,62.10^{-7}$	0,02112	0,2527
6	0,00580	$4,41.10^{-6}$	0,00275	$3,28.10^{-7}$	0,01739	0,3333
média						0,2658
DP						0,0619
CV(%)						23,32

¹Desvio padrão; ²Coefficiente de variação.

2.3.6 Simulação da heterogeneidade na distribuição radicular

Os resultados foram obtidos a partir da metodologia apresentada no item 2.2.19. Os valores de densidade radicular e de frações do volume de solo obtidos no primeiro experimento estão apresentados na Tabela 19 e do segundo experimento nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 19 - Densidade radicular observada (R^* , $cm cm^{-3}$) e simulada (R_1 e R_2 , $cm cm^{-3}$) para duas frações do volume (f_1 e f_2) dos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), no 1º experimento

	<i>Solo AG</i>			<i>Solo AR</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
R^*	1,1145	1,3074	1,1592	1,0274	1,3419	1,3959
R_1	0,1504	0,2019	0,1790	0,3248	0,5344	0,5559
R_2	10,0029	9,3883	8,9524	7,9736	10,6044	9,9848
f_1	0,9021	0,8797	0,8883	0,9082	0,9198	0,9109
f_2	0,0979	0,1203	0,1117	0,0918	0,0802	0,0891

* R = densidade observada; R_1 = densidade simulada na fração 1; R_2 = densidade simulada na fração 2; f_1 = fração do volume 1; f_2 = fração do volume 2.

Tabela 20 - Densidade radicular observada (R^* , cm cm^{-3}) e simulada (R_1 e R_2 , cm cm^{-3}) para duas frações do volume (f_1 e f_2) dos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), nos tratamentos sem ou com ventilação forçada do 2º experimento

	<i>Sem ventilação</i>			<i>Com ventilação</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
R^*	0,5428	0,3153	0,5982	1,1745	1,0899	1,3087
R_1	0,0861	0,1076	0,0948	0,1174	0,1372	0,1726
R_2	5,9742	2,0317	5,8721	13,6806	12,4785	13,2497
f_1	0,9224	0,8922	0,9129	0,9221	0,9228	0,9131
f_2	0,0776	0,1078	0,0871	0,0779	0,0772	0,0869

* R = densidade observada; R_1 = densidade simulada na fração 1; R_2 = densidade simulada na fração 2; f_1 = fração do volume 1; f_2 = fração do volume 2

Tabela 21 - Densidade radicular observada (R^* , cm cm^{-3}) e simulada (R_1 e R_2 , cm cm^{-3}) para duas frações do volume (f_1 e f_2) dos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), nos tratamentos sem ou com ventilação forçada do 2º experimento

	<i>Sem ventilação</i>			<i>Com ventilação</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
R^*	0,8927	1,0332	0,9645	0,8980	1,1185	0,9480
R_1	0,2958	0,2595	0,3843	0,1174	0,1372	0,1726
R_2	7,1526	8,7034	7,0061	13,6806	12,4785	13,2497
f_1	0,9129	0,9084	0,9123	0,9221	0,9228	0,9131
f_2	0,0871	0,0916	0,0877	0,0779	0,0772	0,0869

* R = densidade observada; R_1 = densidade simulada na fração 1; R_2 = densidade simulada na fração 2; f_1 = fração do volume 1; f_2 = fração do volume 2

Nos dois experimentos observou-se tanto para o solo AG quanto para o solo AR uma relação entre as frações do volume (f_1 e f_2) em torno de 0,90 para 0,10; respectivamente (Tabelas 19, 20 e 21), sendo a menor fração referente à maior densidade radicular.

As Figuras 43 e 44 (1º experimento) e de 45 a 48 (2º experimento) apresentam os valores de teor de água no solo (θ_{sim}), potencial de fluxo matricial (M_{sim}) e potencial de fluxo matricial próximo à superfície radicular (M_r) simulados a partir do modelo Jong Van Lier et al. (2006); comparando-os com os dados experimentais (θ_{exp} e M_{exp}).

Obteve-se um bom ajuste para os valores de θ e de M simulados em relação aos valores experimentais, avaliados a partir do ponto crítico, os quais não se diferiram significativamente pelo teste t de Student ao nível de 1% de probabilidade, tanto para os valores obtidos no solo AG quanto no solo AR, em ambos os experimentos.

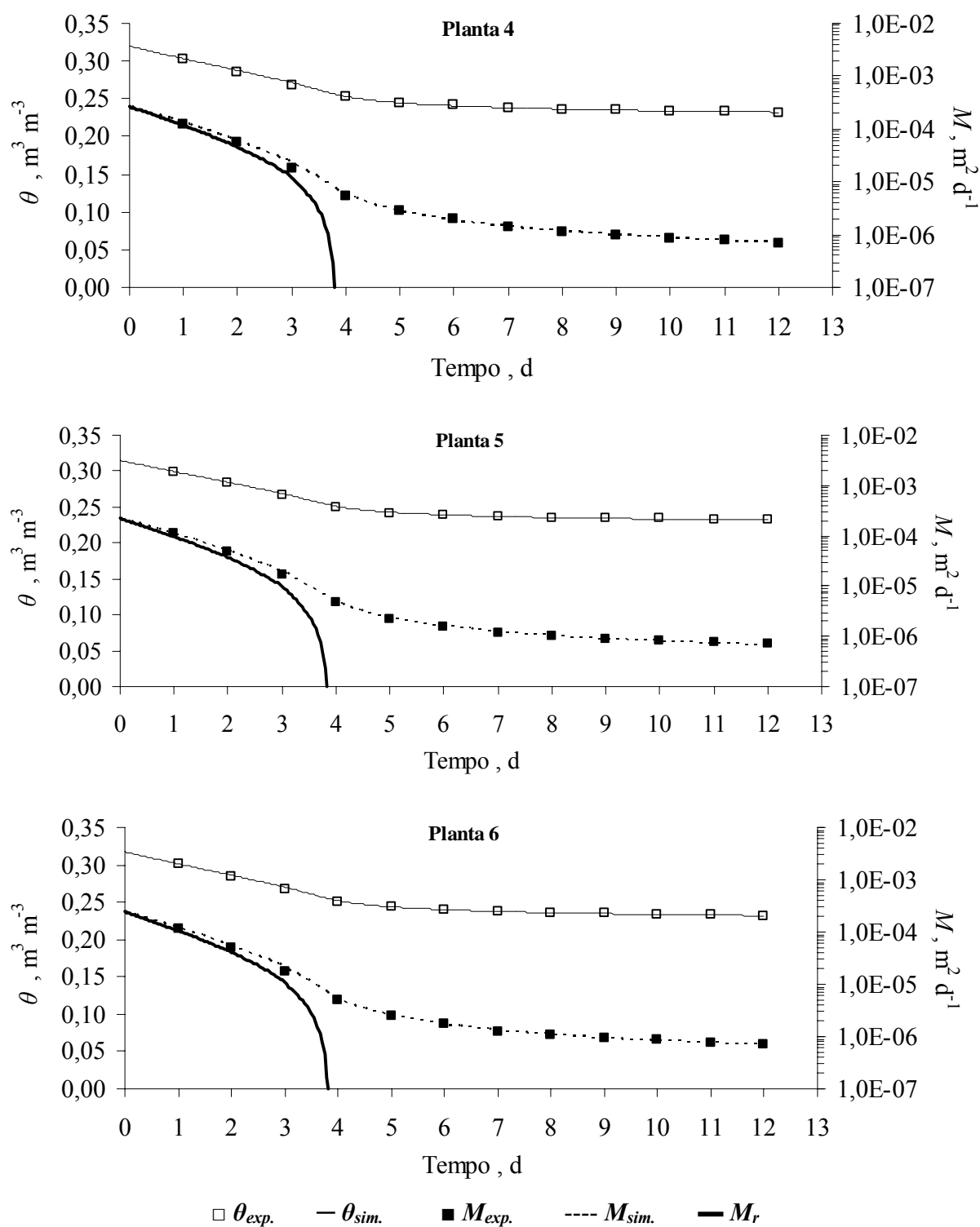


Figura 43 - Teor de água experimental ($\theta_{exp.}$) e simulado ($\theta_{sim.}$), potencial de fluxo matricial experimental ($M_{exp.}$) e simulado ($M_{sim.}$) e potencial de fluxo matricial simulado na superfície radicular (M_r), para as três plantas do solo argiloso (AG) do 1º experimento

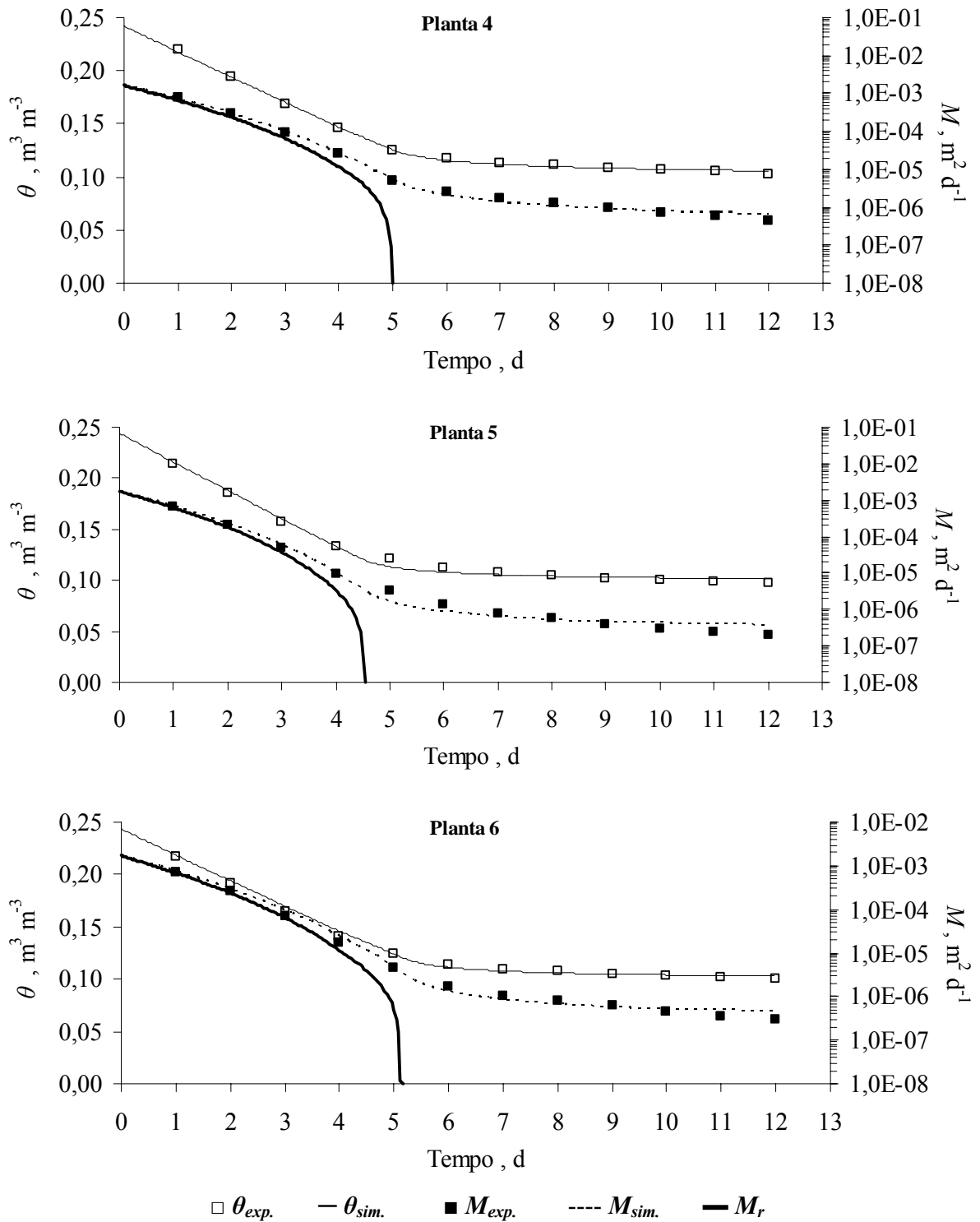


Figura 44 - Teor de água experimental ($\theta_{exp.}$) e simulado ($\theta_{sim.}$), potencial de fluxo matricial experimental ($M_{exp.}$) e simulado ($M_{sim.}$) e potencial de fluxo matricial simulado na superfície radicular (M_r), para as três plantas do solo arenoso (AR) do 1º experimento

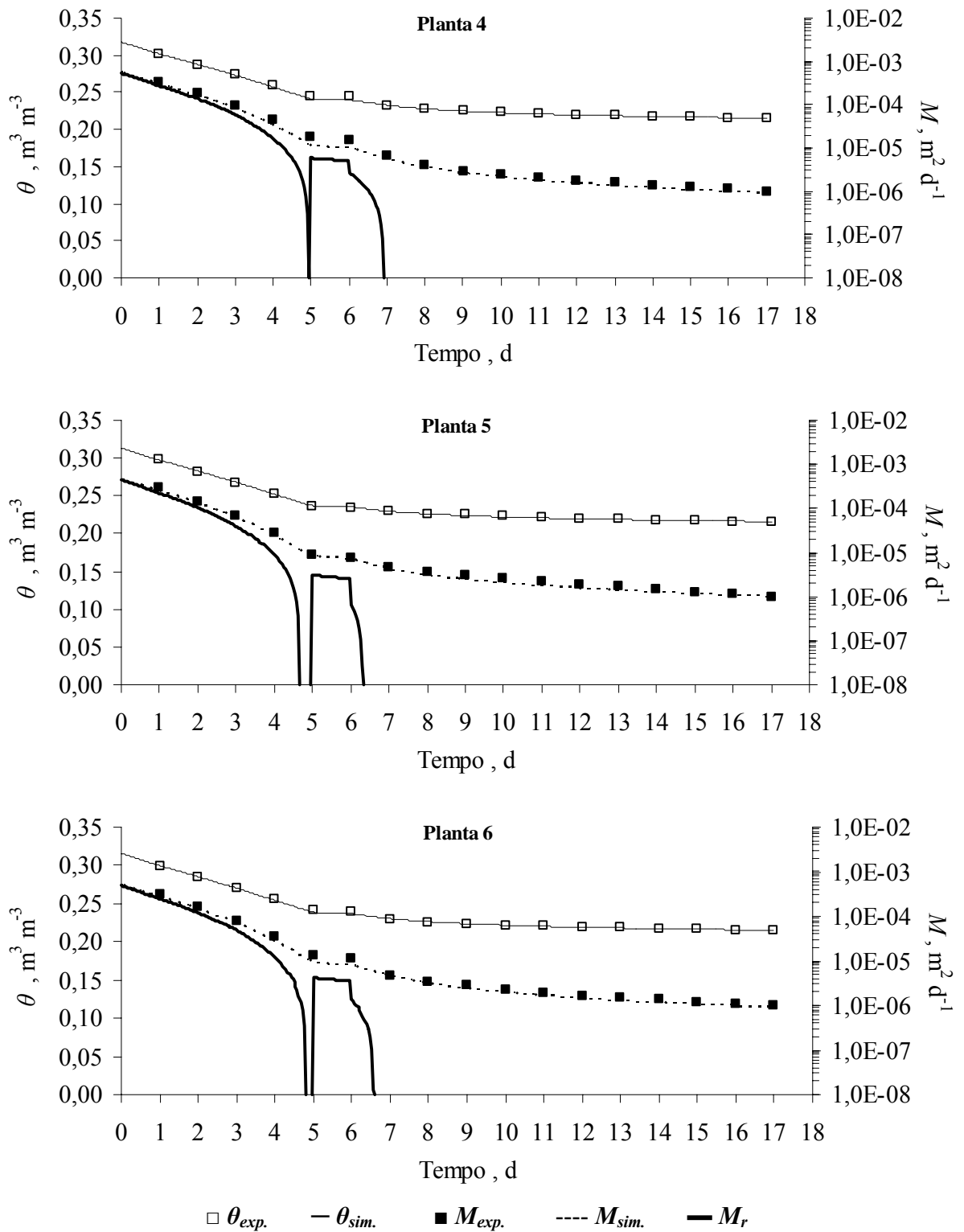


Figura 45 - Teor de água experimental ($\theta_{exp.}$) e simulado ($\theta_{sim.}$), potencial de fluxo matricial experimental ($M_{exp.}$) e simulado ($M_{sim.}$) e potencial de fluxo matricial simulado na superfície radicular (M_r), para as três plantas do solo argiloso (AG), sem ventilação forçada, do 2º experimento

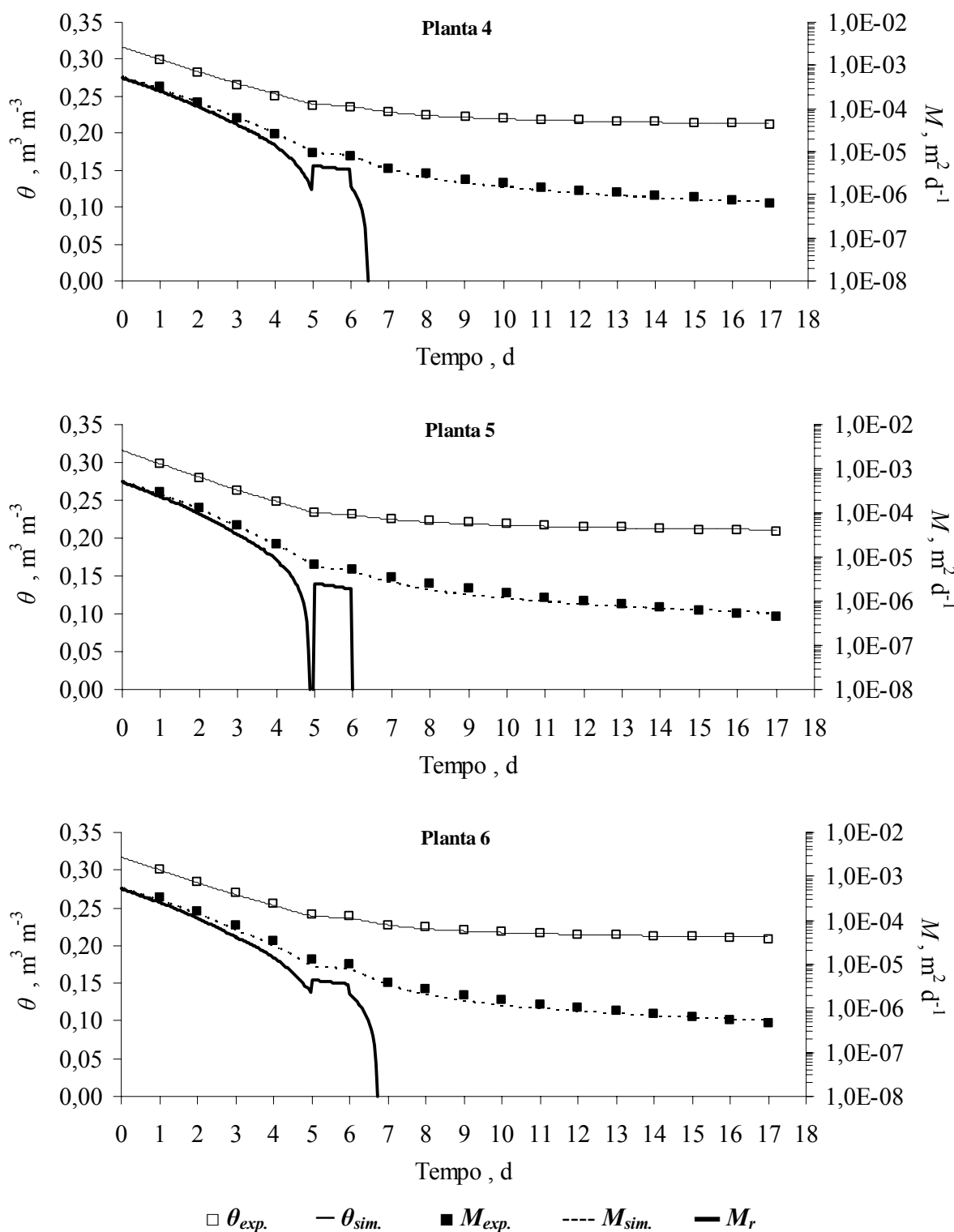


Figura 46 - Teor de água experimental ($\theta_{exp.}$) e simulado ($\theta_{sim.}$), potencial de fluxo matricial experimental ($M_{exp.}$) e simulado ($M_{sim.}$) e potencial de fluxo matricial simulado na superfície radicular (M_r), para as três plantas do solo argiloso (AG), com ventilação forçada, do 2º experimento

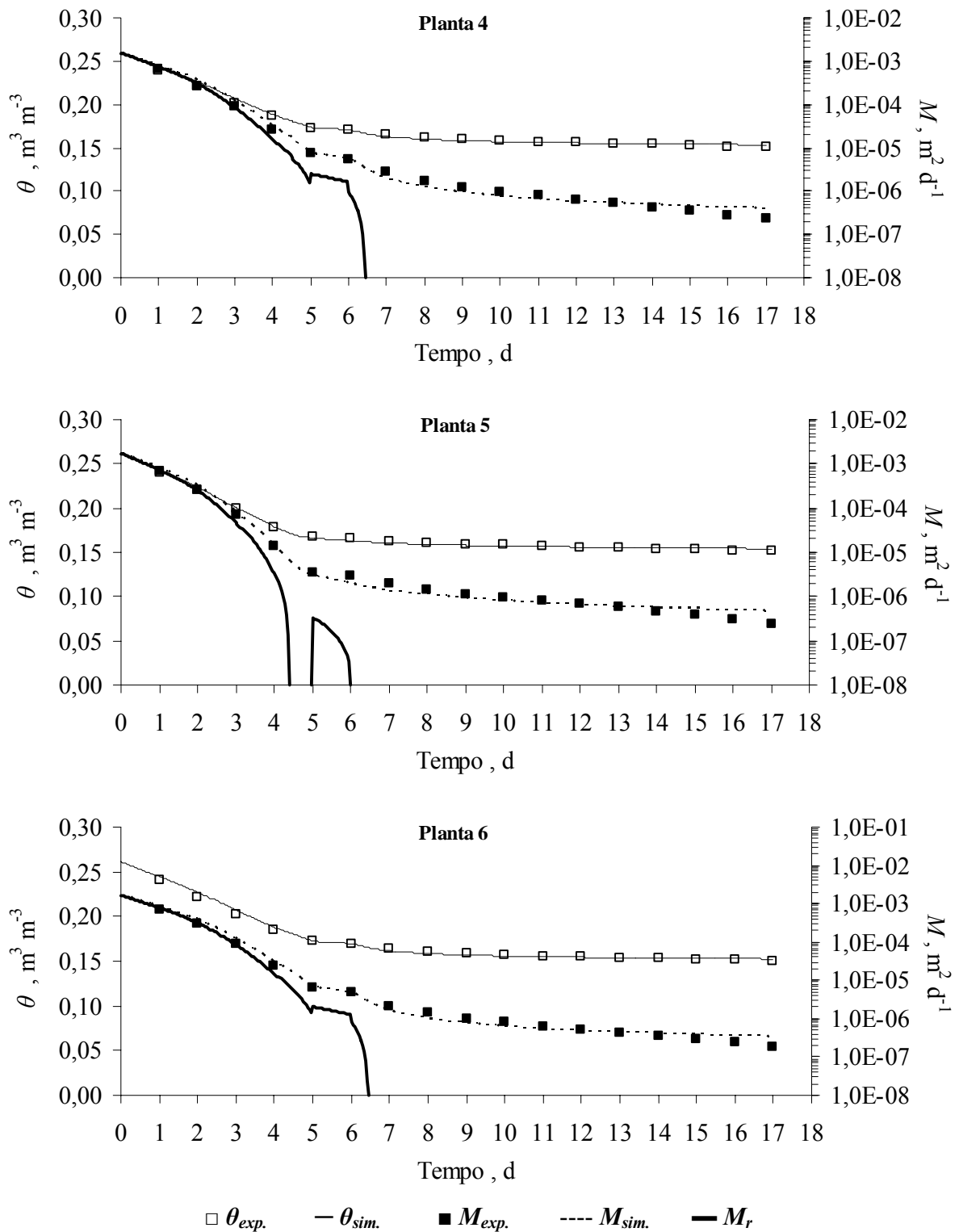


Figura 47 - Teor de água experimental ($\theta_{exp.}$) e simulado ($\theta_{sim.}$), potencial de fluxo matricial experimental ($M_{exp.}$) e simulado ($M_{sim.}$) e potencial de fluxo matricial simulado na superfície radicular (M_r), para as três plantas do solo arenoso (AR), sem ventilação forçada, do 2º experimento

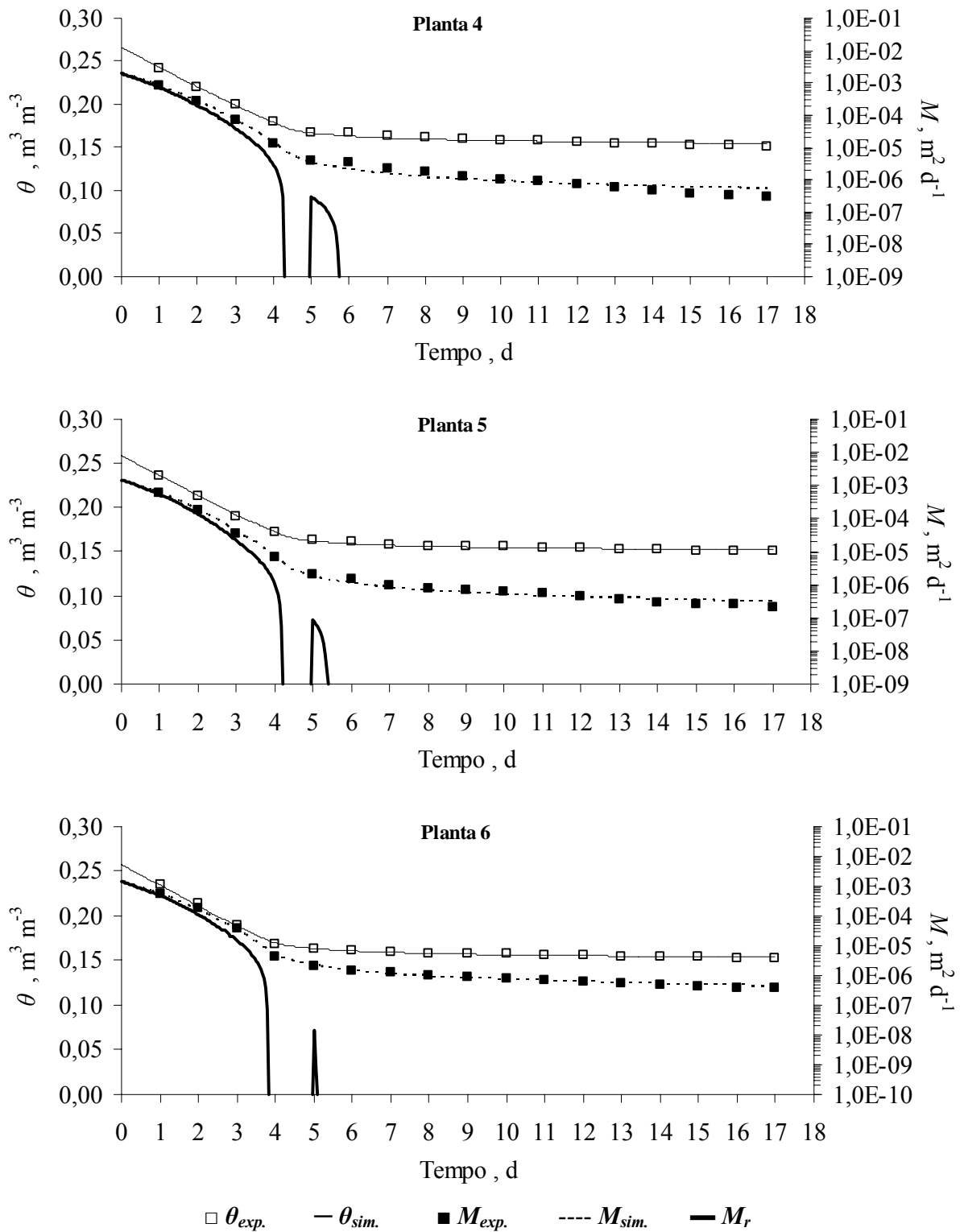


Figura 48 - Teor de água experimental ($\theta_{exp.}$) e simulado ($\theta_{sim.}$), potencial de fluxo matricial experimental ($M_{exp.}$) e simulado ($M_{sim.}$) e potencial de fluxo matricial simulado na superfície radicular (M_r), para as três plantas do solo arenoso (AR), com ventilação forçada, do 2º experimento

Nas Figuras de 43 a 48, pode-se observar o início do ponto crítico a partir dos dados de M_r , pois quando esta variável se igualar à zero tem-se o ponto crítico no momento anterior. Em um dado instante, no segundo experimento, alguns valores de M_r apenas apresentaram um decréscimo e outros se igualaram à zero. No entanto, retornaram a valores maiores que zero nas observações subseqüentes, até atingirem o ponto crítico real de $M_r = 0$, mantendo-se nesse valor para tempos maiores (Figuras 45 a 48). Esse fato deve-se a uma queda abrupta de transpiração, que ocorreu no sexto dia de avaliação ocasionada pelas condições climáticas, conforme já descrito anteriormente.

A resolução temporal dos dados experimentais foi de um dia; as simulações com o modelo foram com um passo de tempo de 0,04 dia. Nas Tabelas 22 e 23, verificam-se os tempos decorridos até a obtenção do ponto crítico.

No primeiro experimento (Tabela 22), os tempos estimados pelo modelo desviam-se no máximo 0,5 dias dos valores experimentais, podendo ser atribuído, integralmente, às diferenças na resolução temporal. Para o segundo experimento observaram-se discrepâncias maiores, principalmente no solo AR, que chegaram a quase dois dias (Tabela 23). Isso pode ter ocorrido devido a queda abrupta das taxas de transpiração observadas no experimento, conforme discutido anteriormente.

Tabela 22 - Tempo (d) para o início do ponto crítico, nos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), para valores experimentais e simulados pelo modelo, no 1º experimento

Planta	<i>Solo AG</i>		<i>Solo AR</i>	
	experimental	simulado	experimental	simulado
dias.....			
4	4	3,74	5	4,96
5	4	3,79	4	4,50
6	4	3,84	5	5,12

Tabela 23 - Tempo (d) para o início do ponto crítico, para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR), nos tratamentos sem (S/V) e com (C/V) ventilação forçada, para valores experimentais (*exp*) e simulados pelo modelo (*sim*), no 2º experimento

Planta	<i>Solo AG</i>				<i>Solo AR</i>			
	S/V		C/V		S/V		C/V	
	<i>exp</i>	<i>sim</i>	<i>exp</i>	<i>sim</i>	<i>exp</i>	<i>sim</i>	<i>exp</i>	<i>sim</i>
dias.....							
4	7,00	6,88	7,00	6,42	6,00	6,42	4,00	5,71
5	6,00	6,29	6,00	5,96	4,00	5,96	4,00	5,33
6	7,00	6,54	7,00	6,71	6,00	6,42	4,00	5,04

Os valores de *M* observados no experimento e simulados pelo modelo foram avaliados pelos índices RMSE (FOX, 1981), MAE (SCHAEFFER, 1980) e pelo índice de concordância “d” (WILLMOTT, 1982), que estão apresentados nas Tabelas 24 (1º experimento) e 25 (2º experimento).

As Figuras 49, 50 e 51 apresentam os valores de *M* obtidos experimentalmente e simulados a partir das densidades radiculares e frações do volume de solo para dois compartimentos.

Observaram-se em ambos os experimentos bom ajuste dos valores simulados em relação aos valores experimentais. No primeiro experimento os valores de *M* experimental e simulado do solo AG estão quase se sobrepondo a reta 1:1, o que pode ser comprovado a partir da análise do índice “d”, que obteve valor médio, das três plantas, igual a 0,9984. Para o solo AR, observou-se um distanciamento um pouco maior em relação à reta 1:1, em comparação com o solo AG, obtendo-se valor médio de “d” igual a 0,9920. Este menor ajuste dos valores simulados pelo modelo, para o solo AR, também pode ser observado a partir dos maiores índices RMSE e MAE que esse solo obteve em comparação ao solo AG (Tabela 24).

Tabela 24 - Raiz do quadrado médio do erro (RMSE, m² d⁻¹), erro médio absoluto (MAE, m² d⁻¹) e do índice de concordância “d” de Wilmott (1981), para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR) do 1º experimento

Planta	<i>Solo AG</i>			<i>Solo AR</i>		
	RMSE	MAE	“d”	RMSE	MAE	“d”
4	1,18.10 ⁻⁷	0,62.10 ⁻⁷	0,9984	2,47.10 ⁻⁷	1,80.10 ⁻⁷	0,9928
5	1,10.10 ⁻⁷	0,89.10 ⁻⁷	0,9980	6,28.10 ⁻⁷	3,39.10 ⁻⁷	0,9886
6	0,94.10 ⁻⁷	0,56.10 ⁻⁷	0,9988	1,96.10 ⁻⁷	1,44.10 ⁻⁷	0,9946

Observaram-se para o solo AG, do segundo experimento, menores médias de RMSE e MAE para o tratamento com ventilação ($2,54 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ e $1,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$, respectivamente) em relação ao não ventilado. Ainda, aquele tratamento mostrou valores de M experimental e simulado mais próximos da reta 1:1, com índice “d” médio, após atingir o ponto crítico, igual a 0,9960 (Tabela 25). Já para o tratamento sem ventilação, verificou-se um leve desvio para as plantas 5 e 6, no ponto crítico, que apresentaram valores menores de M na simulação (Figura 50).

Para o solo AR, observaram-se índices RMSE e MAE médios (Tabela 25) menores nos tratamentos sem ventilação ($\text{RMSE} = 3,29 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$) e com ventilação ($\text{MAE} = 2,65 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$), respectivamente. Ainda, aquele tratamento apresentou um maior índice médio “d” ($d = 0,9865$) em relação ao tratamento com ventilação, demonstrando uma maior proximidade de seus valores em relação à reta 1:1 (Tabela 25 e Figura 51).

Tabela 25 - Raiz do quadrado médio do erro (RMSE, $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$), erro médio (MAE, $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$) e do índice de concordância de Wilmott (“d”), para os solos argiloso (AG) e arenoso (AR), sem ou com ventilação forçada, do 2º experimento

Planta	<i>Solo AG</i>			<i>Solo AR</i>		
	RMSE	MAE	“d”	RMSE	MAE	“d”
<i>Sem ventilação</i>						
4	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$1,88 \cdot 10^{-7}$	0,9906	$3,63 \cdot 10^{-7}$	$3,03 \cdot 10^{-7}$	0,9842
5	$3,74 \cdot 10^{-7}$	$2,63 \cdot 10^{-7}$	0,9967	$3,81 \cdot 10^{-7}$	$3,29 \cdot 10^{-7}$	0,9880
6	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$	0,9921	$2,44 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-7}$	0,9874
<i>Com ventilação</i>						
4	$4,78 \cdot 10^{-7}$	$3,41 \cdot 10^{-7}$	0,9947	$2,85 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-7}$	0,9774
5	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	0,9984	$4,18 \cdot 10^{-7}$	$3,12 \cdot 10^{-7}$	0,9739
6	$1,53 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	0,9949	$3,39 \cdot 10^{-7}$	$2,58 \cdot 10^{-7}$	0,9651

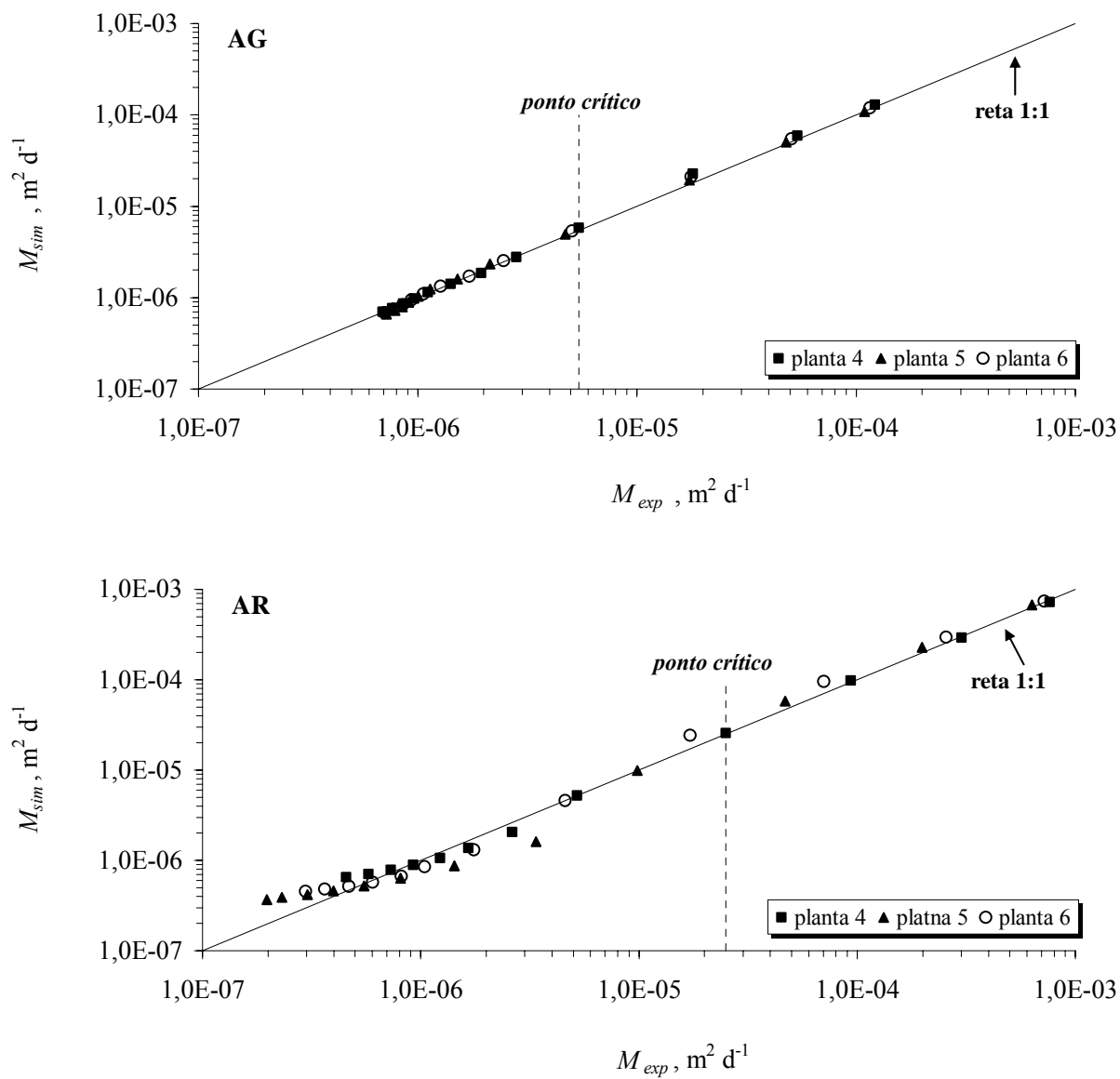


Figura 49 - Potencial de fluxo matricial experimental (M_{exp}) e simulado (M_{sim}) nos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), para as plantas 4, 5 e 6; do 1º experimento

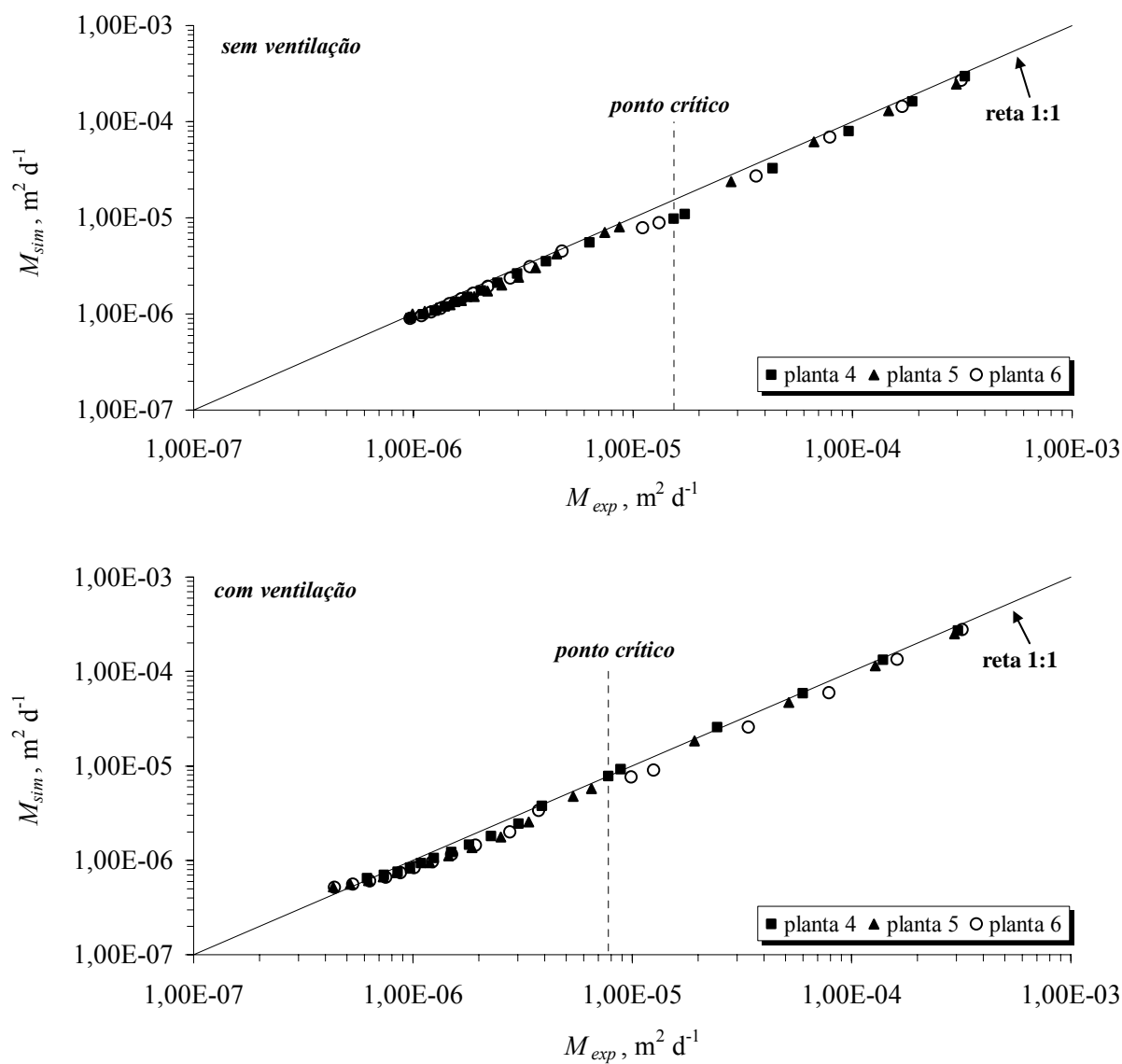


Figura 50 - Potencial de fluxo matricial experimental (M_{exp}) e simulado (M_{sim}), no solo de textura argilosa (AG), nos tratamentos sem ou com ventilação forçada, para as plantas 4, 5 e 6; do 2º experimento

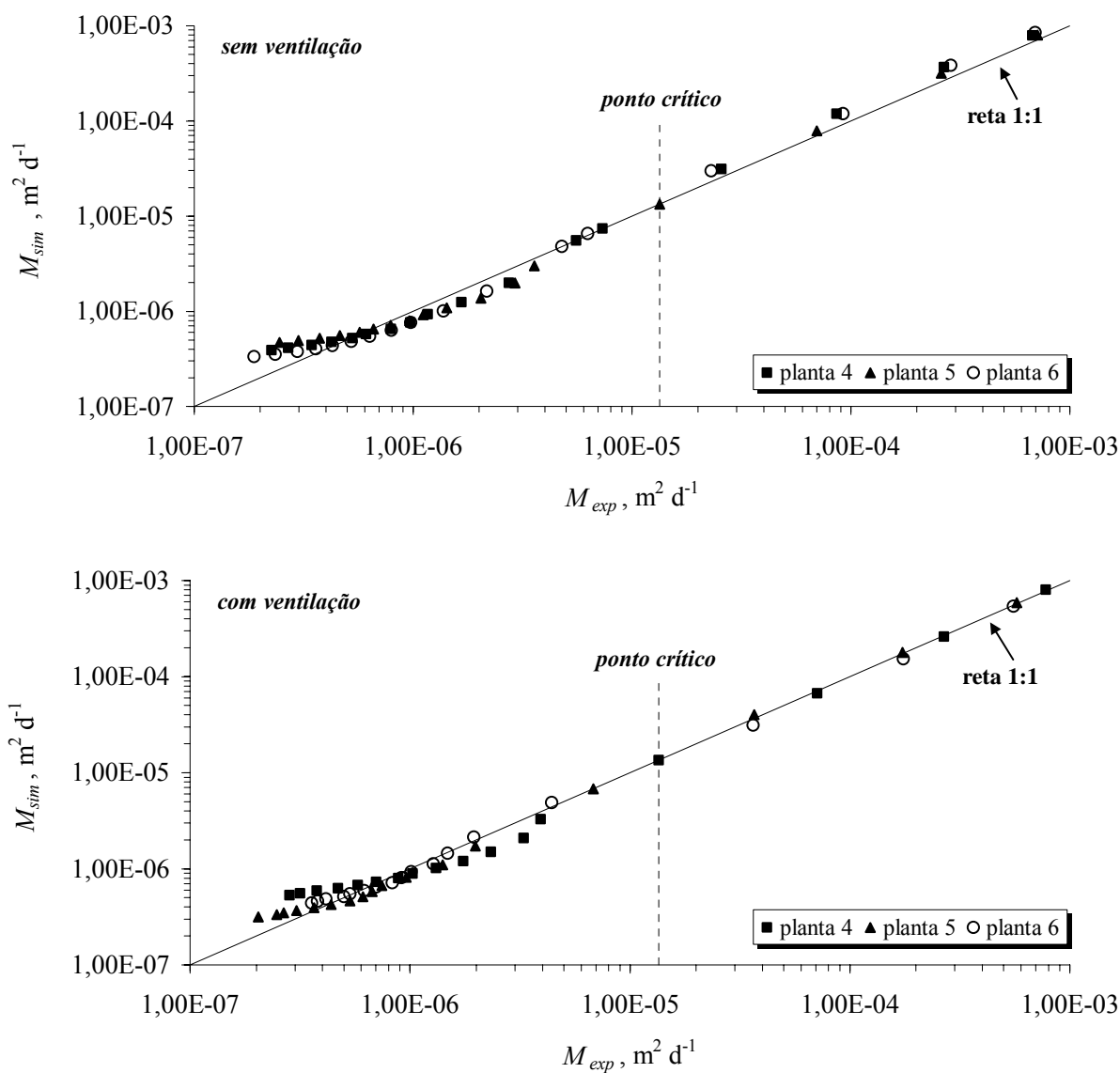


Figura 51 - Potencial de fluxo matricial experimental (M_{exp}) e simulado (M_{sim}), no solo de textura arenosa (AR), nos tratamentos sem ou com ventilação forçada, para as plantas 4, 5 e 6; do 2º experimento

2.3.7 Considerações finais

Este trabalho contribui para agregar conhecimento tanto na área de Física do Solo quanto na área de Agrometeorologia. Pois, nos experimentos foram utilizadas metodologias para a análise da dinâmica da água no solo e a influência do ambiente no processo de transpiração de plantas. Algumas limitações devem ser ressaltadas tanto no âmbito teórico quanto no experimental:

- i.* Apenas o valor de teor de água no solo (θ) foi determinado por medida direta da massa dos vasos contendo os solos. Outras variáveis como potencial matricial (h), condutividade hidráulica e potencial de fluxo matricial foram obtidos por equações empíricas. Embora, esses métodos empíricos sejam aceitos pela comunidade científica, ainda assim, torna-se difícil extrapolar os resultados a condições de campo.
- ii.* A modelagem da extração de água por raízes com distribuição heterogênea, conforme proposta, não é a palavra final na questão. Embora no presente experimento tenha-se conseguido uma boa aproximação pelo modelo com duas frações de solo e duas densidades radiculares, esses foram apenas parâmetros de ajuste, sem aferição experimental.
- iii.* O sistema radicular das plantas ficou restrito ao volume (pequeno) dos vasos. Isso pode ter afetado a distribuição (heterogeneidade) das raízes. Isso deve ser levado em consideração na extrapolação dos resultados nas condições de campo.

Para tanto, faz-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- i.* Desenvolver uma metodologia para se determinar a distribuição do sistema radicular no solo.
- ii.* Validar o modelo em campo utilizando uma técnica adequada como, por exemplo, a Lisimetria.

3 CONCLUSÕES

- 1) Nas condições estudadas, o potencial de fluxo matricial M , permitiu identificar o ponto crítico de água no solo que remete a diminuição da taxa de transpiração potencial (fase constante) entrando na fase de taxa de transpiração decrescente, independente do tipo de solo e demanda transpiratória, obtendo melhores resultados em relação ao teor de água no solo (θ), potencial matricial (h) ou condutividade hidráulica (K).
- 2) O potencial de fluxo matricial no ponto crítico (M_{crit}) mostrou-se menos dependente das propriedades do solo que os valores de teor de água no solo, potencial matricial e condutividade hidráulica críticos (θ_{crit} , h_{crit} e K_{crit} , respectivamente). Sendo que, para este estudo, as variações encontradas nos valores de M_{crit} estão, principalmente, relacionadas com as características do sistema radicular.
- 3) Os valores de M_{crit} obtidos experimentalmente e os estimados pelo modelo (M_{crit}^*) foram diferentes para uma mesma densidade radicular, em que: $M_{crit} > M_{crit}^*$. Isso ocorreu, provavelmente, devido à heterogeneidade da distribuição radiculares, não considerada no modelo.
- 4) A alternativa encontrada para determinar o ponto crítico de água no solo, incorporando a heterogeneidade da distribuição do sistema radicular, foi de estimar a transpiração relativa (T_R) com base nos valores de M , após atingir o ponto crítico, a partir de simulações de distribuição das densidades radiculares em duas frações de volume do solo. Sendo que, o melhor ajuste do modelo proposto, aos dados experimentais, ocorreu quando uma menor densidade radicular estivesse em uma maior fração do volume ($\approx 90\%$ do volume) e uma maior densidade na fração restante.
- 5) Para fins práticos, com o valor de M_{crit} podem-se obter os valores de θ_{crit} e h_{crit} através das relações físico-hídricos determináveis.

REFERÊNCIAS

- ALPI, A.; TOGNONI, F. **Cultura em estufa**. Lisboa: Presença, 1978. 203 p.
- ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SÁ, M.E. de; BUZETTI, S.; NASCIMENTO, V. do. Manejo do solo, água e nitrogênio no cultivo de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 131-138, fev. 2004.
- AUBINET, F.B.; DELTOUR, J.; HALLEUX, D. de. Stomatal regulation in greenhouse crops: analysis and simulation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 48, n. 1/2, p. 21-44, 1989.
- BENTLEY, W.J.; SKAGGS, R.W.; PARSONS, J.E. **The effect of variation in hydraulic conductivity on watertable drawdown**. Raleigh: North Carolina State University, North Carolina Agricultural Research Service, 1989. 23 p. (Technical Bulletin, 288).
- BOUMA, J. Using soil survey data or quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p. 177-213, 1989.
- BOYER, JS. Photosynthesis at low water potentials. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Series B, London, v. 273, n. 927, p. 501-512, Feb. 1976.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State University, Civil Engineering Department, 1964. 27 p. (Hydrology Paper, 3).
- BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size distributions data. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, New York, v. 198, p. 71-77, 1953.
- CAIXETA, T.J. Irrigação do feijoeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 4, n. 46, p. 36-40, out. 1978.
- CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. Critérios para a determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, 2007. No prelo.
- CARLESSO, R. 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, jan./abr. 1995.
- COSTA, L.C.; MORISON, J.; DENNETT, M. Effects of water stress on photosynthesis, respiration and growth of Faba Bean (*Vicia faba* L.) growing under field conditions. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 9-16, jul. 1997.
- COSTA, R.C.L.; LOPES, N.F.; OLIVA, M.A. Crescimento, morfologia, partição de assimilados e produção de matéria seca em *Phaseolus vulgaris* L., submetido a três níveis de nitrogênio e dois regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 9, p. 1453-1465, 1991.

DARDANELLI, J.L.; RITCHIE, J.T.; CALMON, M.; ADRIANI, J.M.; COLLINO, D.J. An empirical model for root water uptake. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 59-71, Apr. 2004.

DOORENBOS, J.; PRUIT, W.O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1976. 193 p. (Riego e Drenaje, 124).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H.; BENTVELSEN, C.L.M.; BRANSCHIED, V.; PLUSJÉ, J.M.G.A.; SMITH, M.; UITTENBOGAARD, G.O.; VAN DER WAL, H.K. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMBRAPA. **Ambiente de software NTIA, versão 4.2.2**. Manual do usuário: ferramental estatístico. Campinas: Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para a Agricultura, 1997. 258 p.

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

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES C.A. Common bean and cowpea. In: FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES C.A. (Ed.). **Growth and mineral nutrition of field crops**. New York: M. Dekker, 1991. p. 280-318.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia do feijoeiro. In: _____. (Coord.). **Tecnologia da produção do feijão irrigado**. Piracicaba: FEALQ, 1997. p. 100-120.

_____. Ecofisiologia e fenologia do feijoeiro comum. In: _____. (Ed.). **Feijão irrigado: tecnologia e produção**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Produção Vegetal, 2005. p. 166-174.

FEDDES, R.A.; BRESLER, E.; NEUMAN, S.P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root system. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 10, n. 6, p. 1199-1206, Dec. 1974.

FIORIN, J.E.; REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e crescimento e produção do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 249-255, abr./jun. 1997.

FOX, D.G. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Easton, v. 62, n. 5, p. 599-609, May 1981.

GARCIA, A.; ANDRÉ, R.G.B.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em nectarineiras. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 43-48, jan./jul. 2000.

GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, Baltimore, v. 85, p. 228-232, 1958.

_____. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 89, n. 2, p. 63-67, Feb. 1960.

_____. Modeling water uptake by roots. **Irrigation Science**, Berlin, v. 12, n. 3, p. 109-114, Sept. 1991.

GARRIDO, M.A.T.; PURCINO, J.R.C.; LIMA, C.A.S. Efeito de diferentes regimes de irrigação sobre o rendimento do feijoeiro na região norte de Minas Gerais. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto feijão**. Belo Horizonte, 1979. p. 27-29. (Relatório, 77/78).

GUIMARÃES, C.M. Relações hídricas. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.I.O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p. 139-163.

HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. Water extraction by single plant roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 2, p. 841-848, May/June 1986.

HAMBLIM, A. Sustainable agricultural system: What are the appropriate measures for soil structure? **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, n. 6, p. 709-715, 1991.

HENDRICKX, J.M.H.; WIERENGA, P.J.; NASH, M.S. Variability of soil water tension and soil water content. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 18, n. 2, p. 135-148, July 1990.

HOMAE, M.; FEDDES, R.A.; DIRKSEN, C. A macroscopic water extraction model for Nonuniform transient salinity and water stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1764-1772, Nov./Dec. 2002.

HSIAO, T. C.; ACEVEDO, E. Plant responses to water deficits, water use efficiency and drought resistance. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 14, n. 1/2, p. 59-84, 1974.

HULUGALLE, N.R.; WILLATT, S.T. The role of soil resistance in determining water uptake by plant root systems. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 21, n. 4, p. 571-574, 1983.

HUPET, F.; LAMBOT, S.; JAVAUX, M.; VANCLOOSTER, M. On the identification of macroscopic root water uptake parameters from soil water content observations. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 38, n. 12, p. 1300, Dec. 2002.

HUPET, F.; LAMBOT, S.; FEDDES, R.A.; VAN DAM, J.; VANCLOOSTER, M. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 39, n. 11, p. 1312, Nov. 2003.

HURTADO, A.L.B; JONG VAN LIER, Q. de. Uncertainty of Hydraulic Conductivity under Field Conditions and at Fixed Pressure Heads and Water Contents. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, p. 151-162, Feb. 2005.

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**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 535-542, out./dez. 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, Nov. 2006.

JORGE, L.A.C. **SIARCS 3.0 para Windows**: manual do usuário. São Carlos: EMBRAPA, CNPDIA, 1996. 30 p.

JORGE, L.A.C.; RESENDE, P.C.S.; POSADAS, A.N.; FREITAS JUNIOR, E.; CRESTANA, S. Comparação de técnicas de análise de imagens digitais na determinação do comprimento de raízes. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: PEQUENA PROPRIEDADE VERSUS DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 10., 1994, Florianópolis. **Resumos ...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p. 314-315.

KATTAN, A.A.; FLEMING, J.W. Effect of irrigation at specific stages of development on yield, quality growth and composition of snap beans. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Geneva, v. 68, p. 329-42, 1956.

KIRCHHOFF, G. **Vorlesungen über die Theorie der Wärme**. Leipzig: Barth, 1894.

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).

LAWN, R. J. Response of four grain legumes to water stress in south-eastern Queensland III. Dry matter production, yield and water use efficiency. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 33, n. 3, p. 511-521, Mar. 1982.

LEGATES, D.R; MCCABE, G.J. Jr. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LI, Y.; WALLACH, R.; COHEN, Y. The role of soil hydraulic conductivity on the spatial and temporal variation of root water uptake in drip-irrigated corn. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 243, n. 2, p. 131-142, June 2002.

LOPES, N.F.; OLIVA, M.A.; CARDOSO, M.; GOMES, M.M.S.; SOUZA, V.F. Crescimento e produção de energia solar em *Phaseolus vulgaris* L. submetidos a três densidades do fluxo

radiante e dois regimes hídricos. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 33, n. 186, p. 142-164, mar./abr. 1986.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1980. 256 p.

MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O.; SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. Variabilidade do potencial mátrico e do teor de água no solo em experimento de manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 563-571, out./dez. 1998.

MARKHART, A. H. Comparative water relations of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus acutifolius* Gray. **Plant Physiology**, New York, v. 77, n. 1, p. 113-117, Jan. 1985.

MARTINEZ GARCIA, P.F. La regulación de las condiciones del ambiente en los cultivos protegidos. In: FERIA TÉCNICA INTERNACIONAL DE LA MAQUINARIA AGRÍCOLA, 1986, Zaragoza. **Anales ...** Zaragoza: Asociación Nacional de Ing. Agrónomos, 1986. p. 135-147.

MARTINS, S.R.; GONZALEZ, J.F. Evapotranspiração e respostas fisiológicas do feijão-vagem cultivado em substrato em estufa com sistema de ventilação/calefação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 31-37, 1995.

METSELAAR, K; JONG VAN LIER, Q. de. The shape of the transpiration reduction function under plant water stress. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 6, p. 124-139, Jan. 2007.

MOLDRUP, P.; ROLSTON, D.E.; HANSEN, J.A.; YAMAGUCHI, T. A simple, mechanistic model for soil resistance to plant water uptake. **Soil Science**, Baltimore, v. 153, n. 2, p. 87-93, Feb. 1992.

MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Irrigação. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.I.O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p. 465-512.

PARDOSSI, A; VERNIERI, P; TOGNONI, T. Involvement of abscisic acid in regulating water status in *Phaseolus vulgaris* L. during chilling. **Plant Physiology**, New York, v. 100, p. 1243-1250, 1992.

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.

PERSONNE, E.; PERRIER, A.; TUZET, A. Simulating water uptake in the root zone with a microscopic-scale model of root extraction. **Agronomie**, Paris, v. 23, n. 2, p. 153-168, Mar. 2003.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Rio de Janeiro: EDUR, 1998. 150 p.

POLAK, A.; WALLACH, R. Analysis of soil moisture variations in an irrigated orchard root zone. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 233, n. 2, p. 145-159, June 2001.

PORTES, T.A. Ecofisiologia. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.I.O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p. 101-131.

PULLAN, A.J. The quasilinear approach for unsaturated porous media flow. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 26, n. 6, p. 1219-1234, June 1990.

RAATS, P.A.C. Steady infiltration from line sources and furrows. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, n. 5, p. 709-714, Sept./Oct. 1970.

_____. Laterally confined, steady flows of water from sources and to sinks in unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 2, p. 294-304, Mar./Apr. 1977.

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 Agrônômico, 1997. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, p. 213-234, 1991.

RICHARDS, L.A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. **Journal Agricultural Research**, Washington, DC, v. 37, n. 12, p. 719-742, 1928.

_____. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Science**, Baltimore, v. 68, p. 95-112, 1949.

ROOSE, T.; FOWLER, A.C. A model for water uptake by plant roots. **Journal of Theoretical Biology**, London, v. 228, n. 2, p. 155-171, May 2004.

ROSENBERG, N.J.; MCKENNEY, M.S.; MARTIN, P. Evapotranspiration in a greenhouse-warmed world: a review and a simulation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 47, n. 2/4, p. 303-320, 1989.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S.; PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 4, p. 1032-1036, July/Aug. 1986.

SCHAEFFER, D.L. A model evaluation methodology applicable to environmental assessment models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 8, p. 275-295, Jan. 1980.

SCHRÖDER T.; JAVAUX, M.; VANDERBORGHT, J.; VERECKEN, H. 2007. Comment on "Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation". **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 6, p. 524-526, 2007.

SIEBENEICHLER, S.C.; SANT'ANNA, R.; MARTINEZ, C. A.; MOSQUIM, P.R.; CAMBRAIA, J. Alterações na fotossíntese, condutância estomática e eficiência fotoquímica induzidas por baixa temperatura em feijoeiros. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 10, n. 1, p. 37-44, 1998.

SLAVIK, B. Water stress, photosynthesis and the use of photosynthates. In : COOPER, J.P. (Ed.). **Photosynthesis and productivity in different environments**. London: Cambridge University Press, 1975. p. 511-536.

SOUZA, C.R. de; SOARES, A.M.; REGINA, M.A. Trocas gasosas de mudas de videira, obtidas por dois porta-enxertos, submetidas à deficiência hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 10, p. 1221-1230, out. 2001.

SOUZA, M.J.H.; RAMOS, M.M.; SIQUEIRA, D.L.; COSTA, L.C.; LHAMAS, A.J.M.; MANTOVANI, E.C.; CECON, P.R.; SALOMÃO, L.C.C. Estresse esse hídrico e época de produção da lima ácida 'Tahiti'. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 31-38, jan./abr. 2004.

STANGHELLINI, C. Evapotranspiration in greenhouse with especial reference to Mediterranean conditions. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 335, p. 295-304, Apr. 1993.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 835-841, abr. 2000.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução de E.R. Santarém et al. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

VAN DER POST, C.J.; VAN-SHIE, J.J.; GRAAF, R. Basic problems of water relationship: energy balance and water supply in glasshouse in the West-Netherlands. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 35, p. 13-21, 1974.

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, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

WARRICK, A.W.; AMOOZEGAR-FARD, A. Soil water regimes near porous cup water samplers. **Water Resources Research**, Washington, v. 13, n. 1, p. 203-207, Feb. 1977.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Easton, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, Nov. 1982.

_____. On the evaluation of model performance in physical geography. In: GAILE, G.L.; C.J. WILLMOTT (Ed.). **Spatial statistics and models**. Dordrecht: D. Reidel, 1984. p. 443-460.

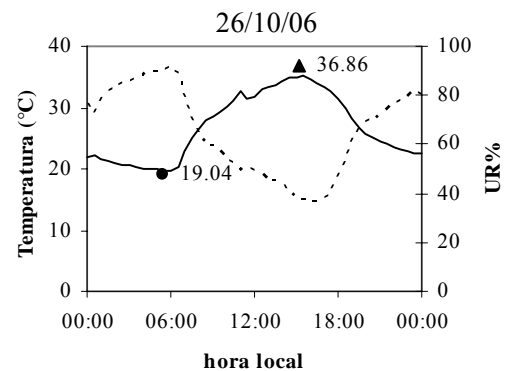
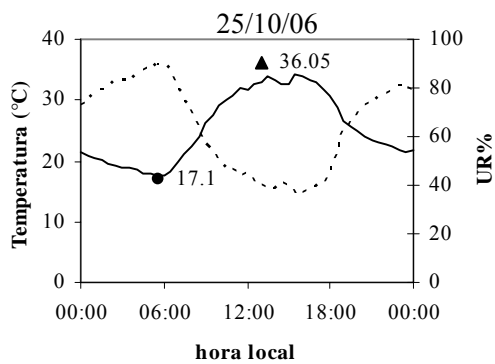
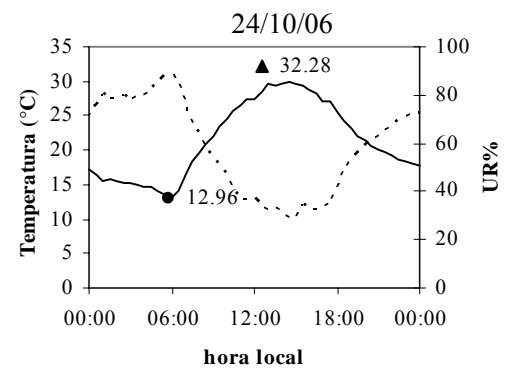
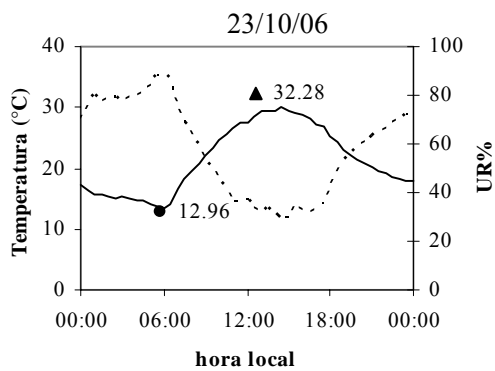
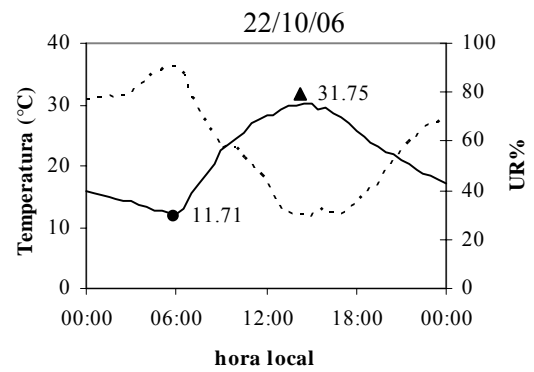
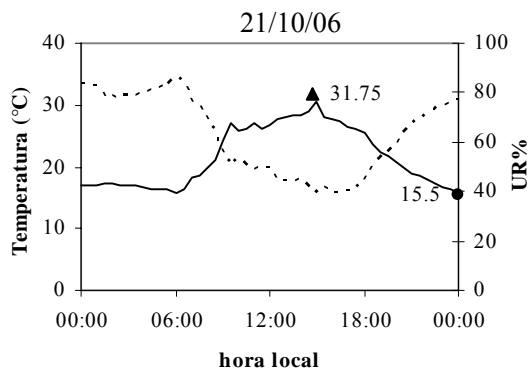
WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 251, n. 3/4, p. 123-150, Oct. 2001.

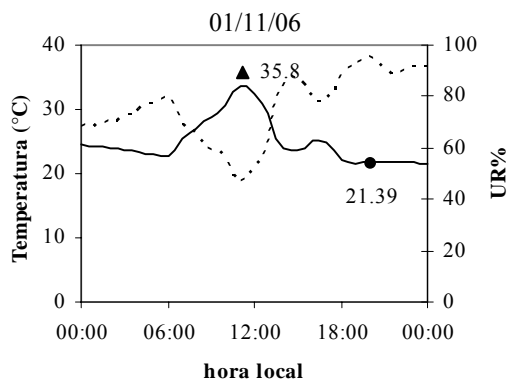
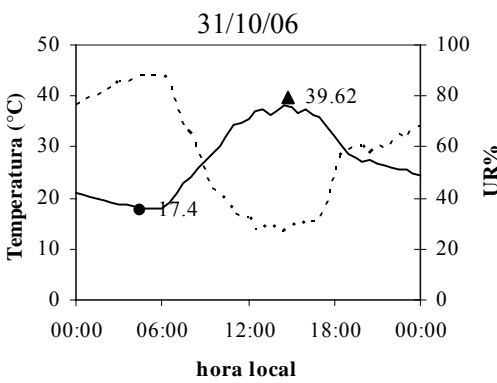
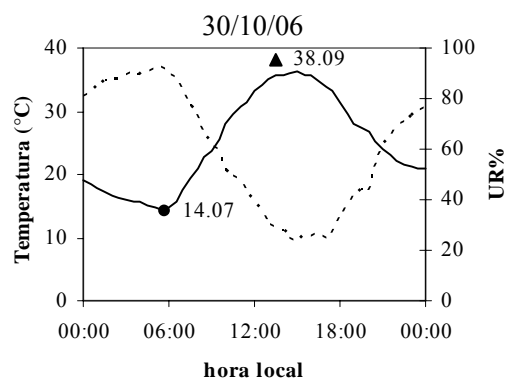
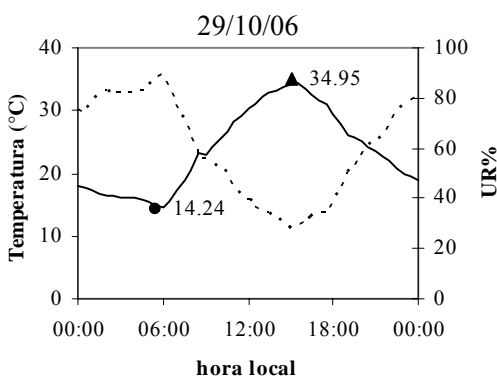
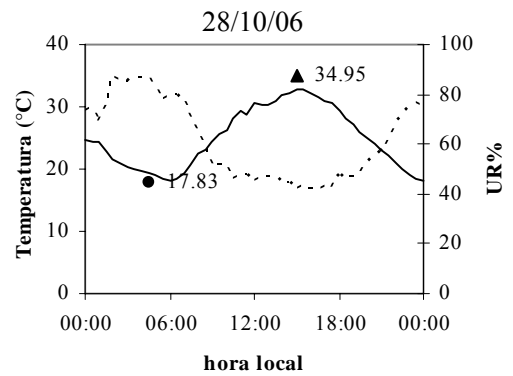
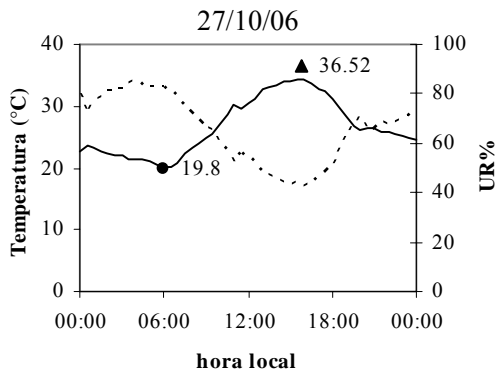
WU, J.; ZHANG, R.; GUI, S. Modeling soil water movement with water uptake by roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 215, n. 1, p. 7-17, Sept. 1999.

ZUO, Q.; ZHANG, R.D. Estimating root-water-uptake using an inverse method. **Soil Science**, Baltimore, v. 167, n. 9, p. 561-571, Sep. 2002.

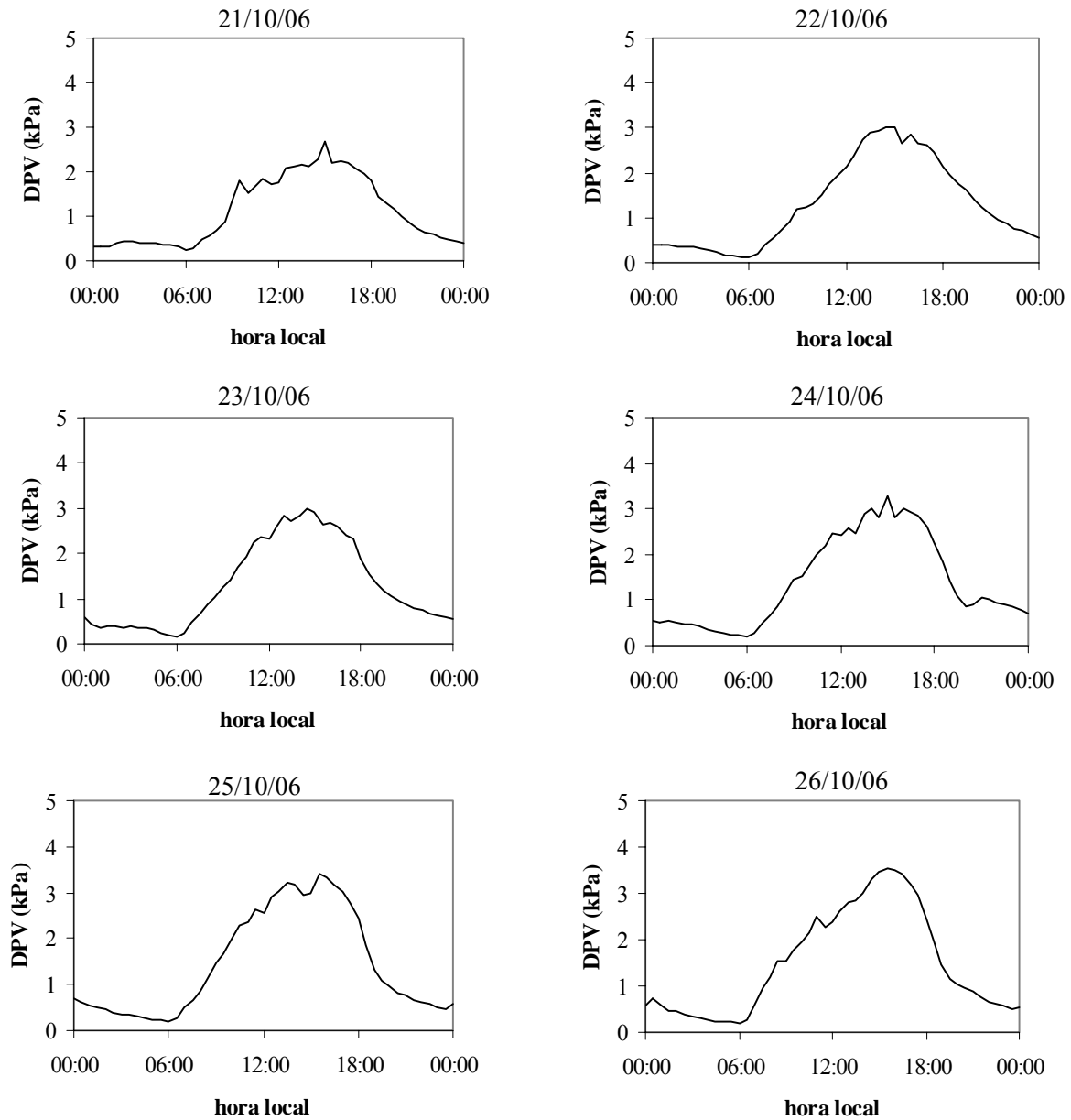
ANEXOS

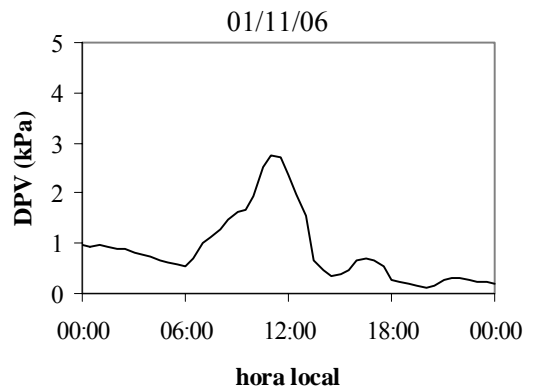
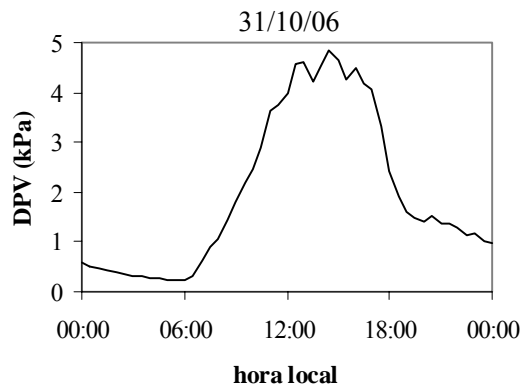
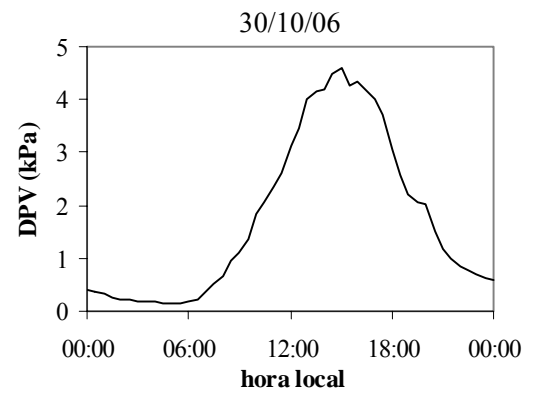
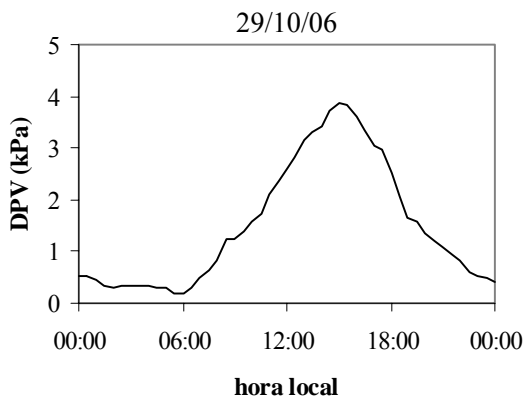
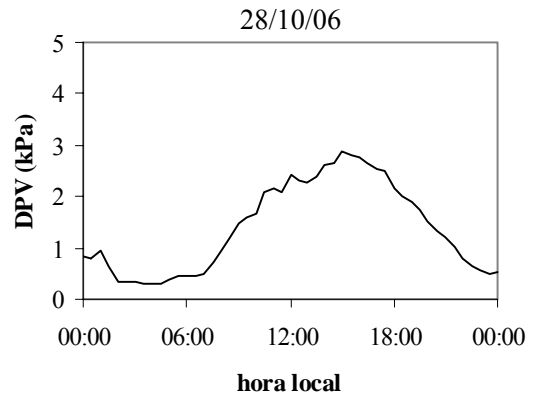
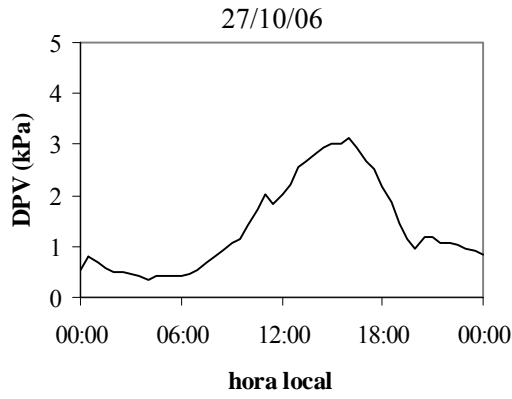
ANEXO A - Temperatura do ar (°C) em linhas cheias, e umidade relativa do ar (UR, %) em linhas pontilhadas, valores de temperatura do ar máxima (▲) e mínima (●), para os dias de 21/10 a 01/11 de 2006, referentes ao primeiro experimento.



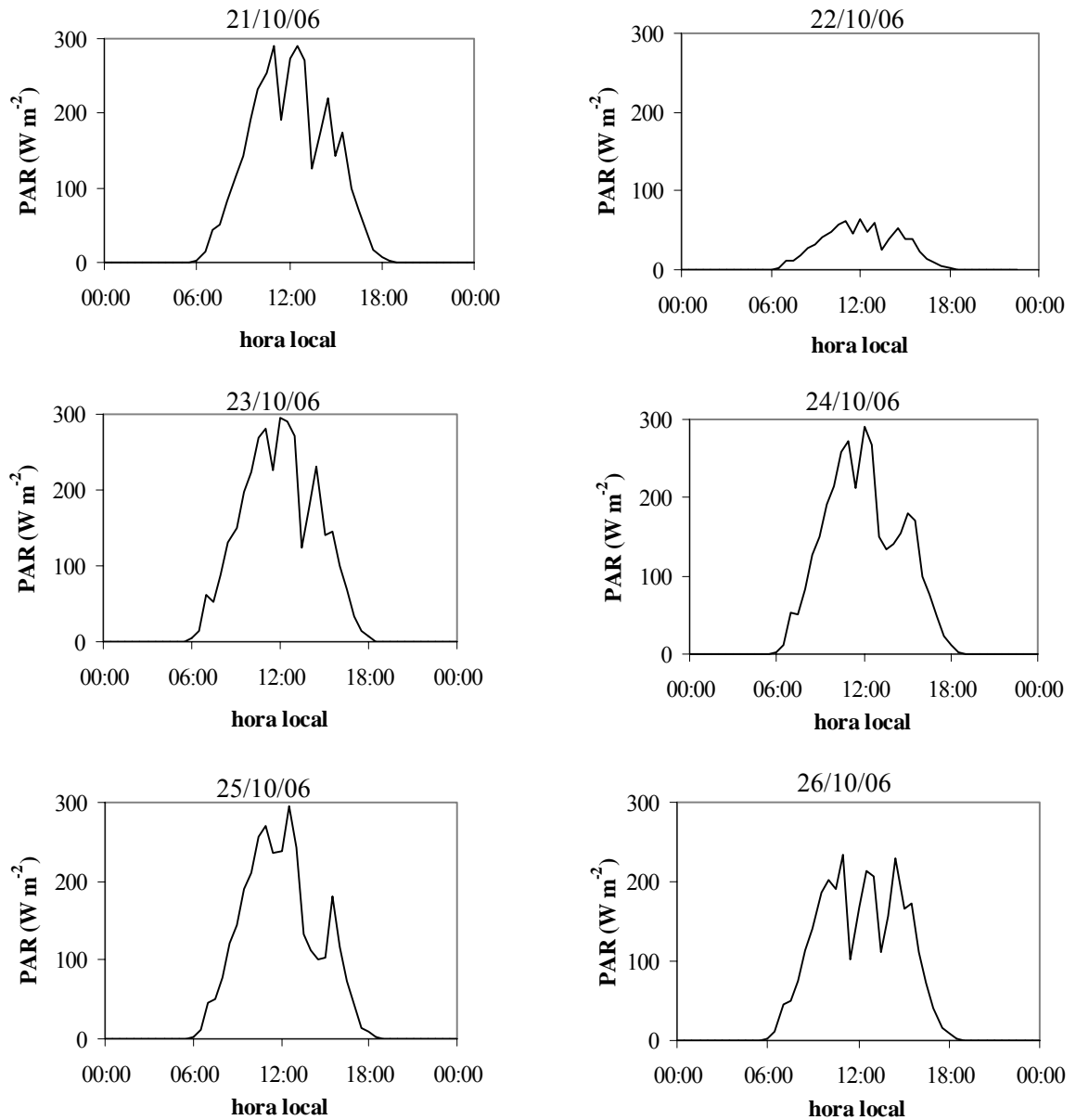


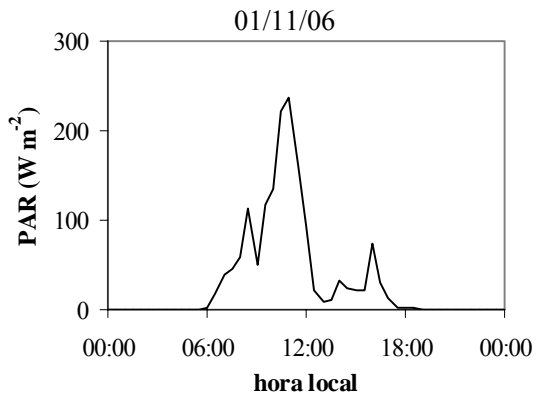
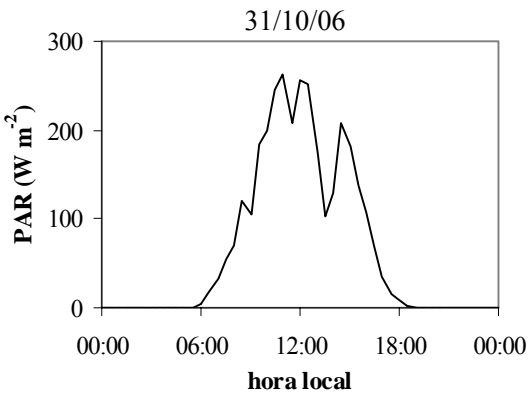
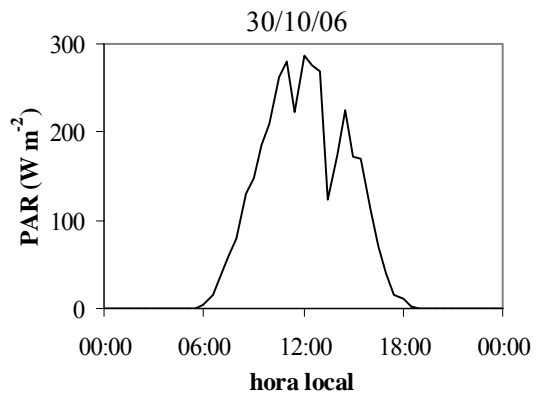
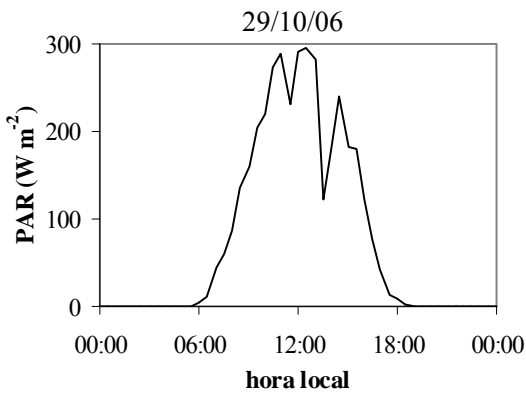
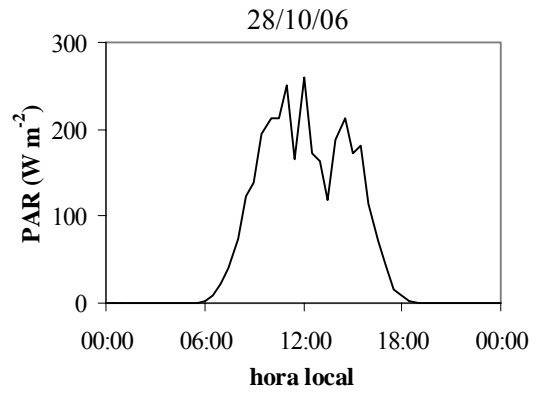
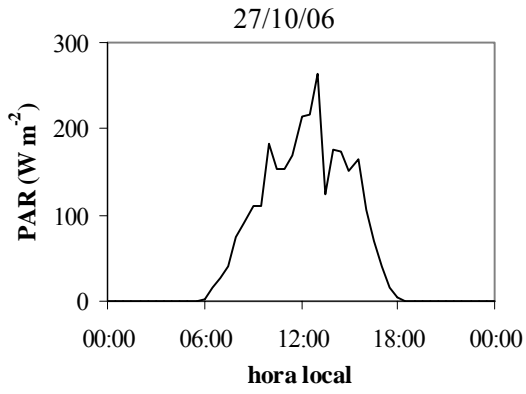
ANEXO B – Déficit de pressão de vapor do ar (DPV, kPa) para os dias de 21/10 a 01/11 de 2006, referente ao primeiro experimento.



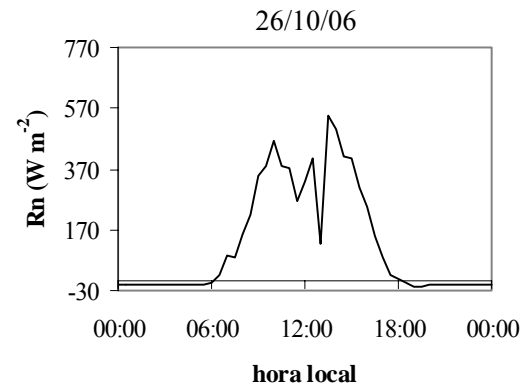
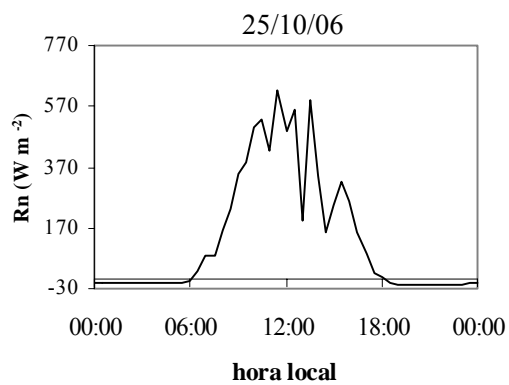
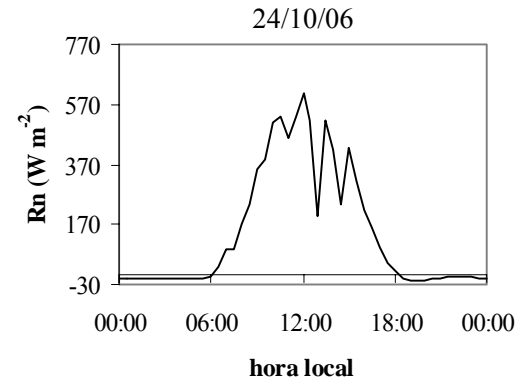
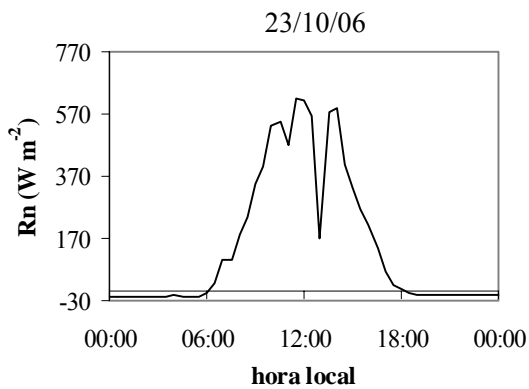
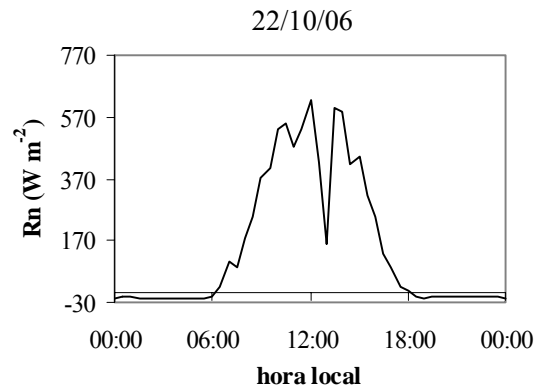
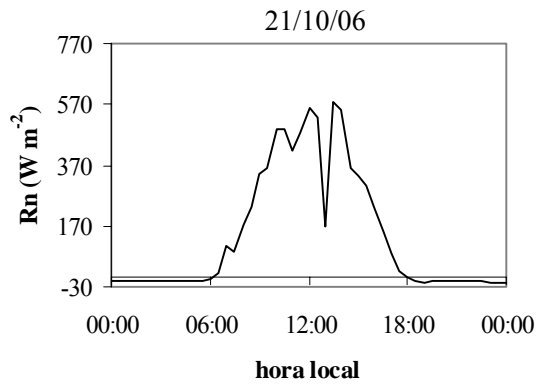


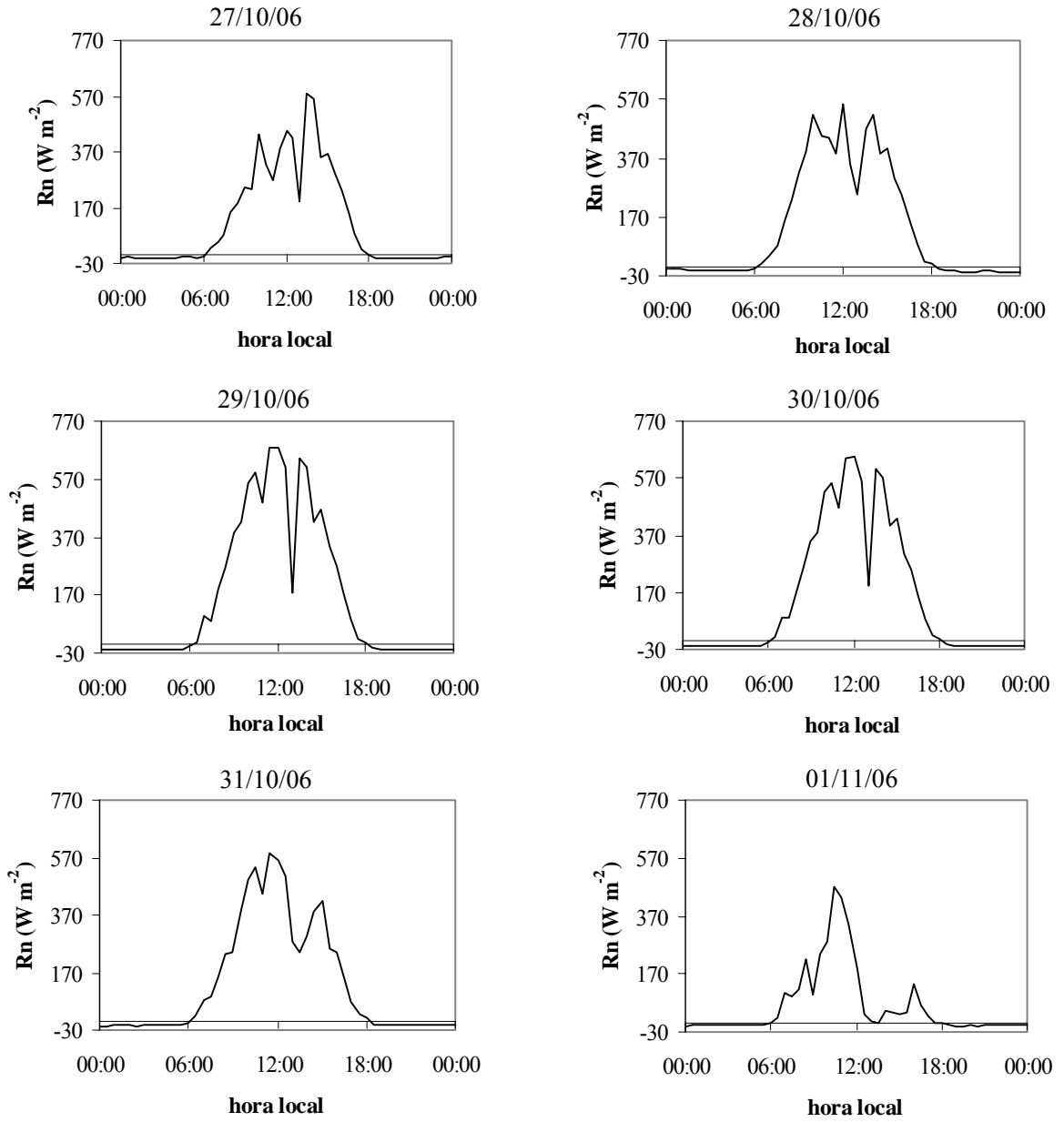
ANEXO C – Radiação fotossinteticamente ativa (PAR, W m^{-2}), para os dias de 21/10 a 01/11 de 2006, referente ao primeiro experimento.



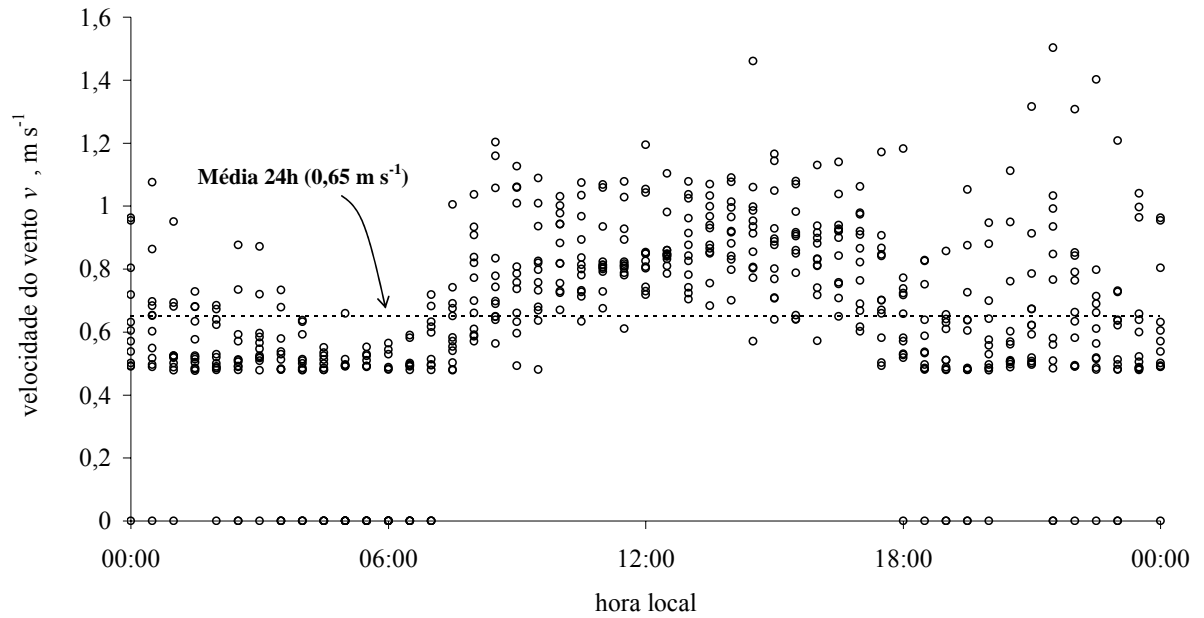


ANEXO D – Saldo de radiação (R_n , $W m^{-2}$), para os dias de 21/10 a 11/11 de 2006, referente ao primeiro experimento.

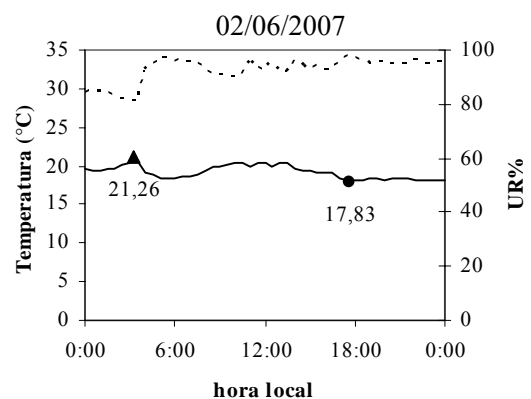
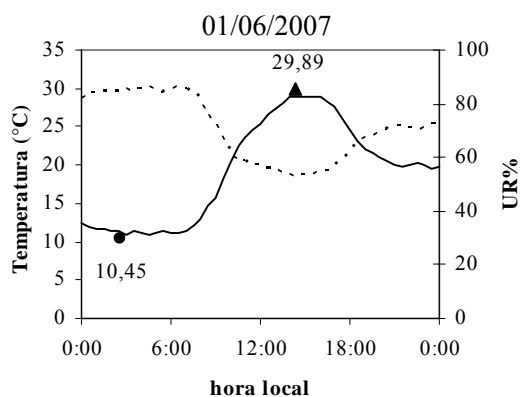
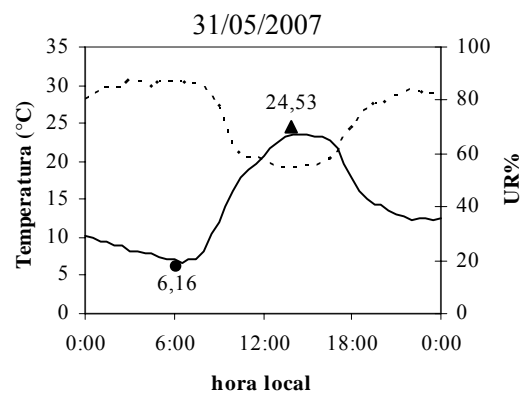
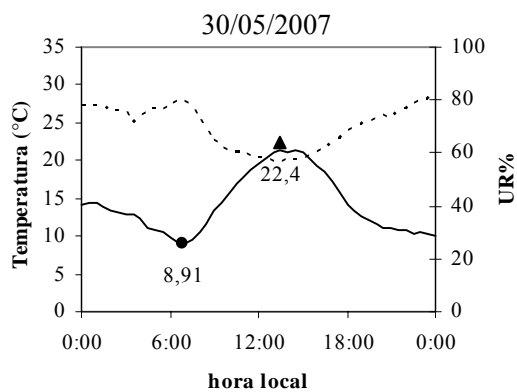
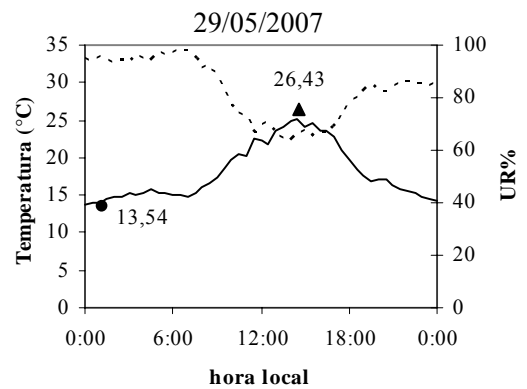
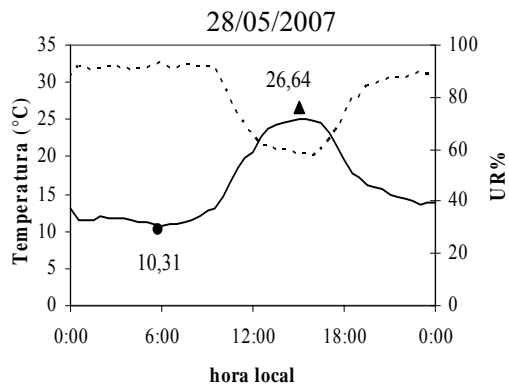


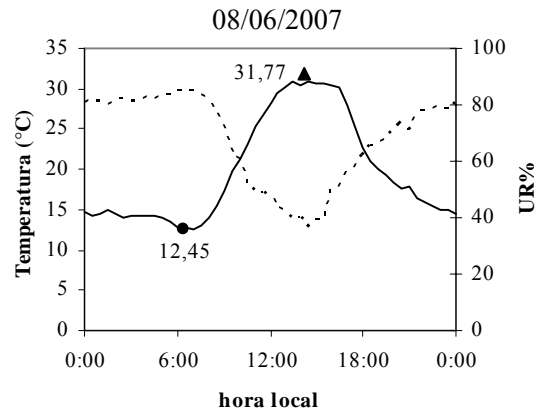
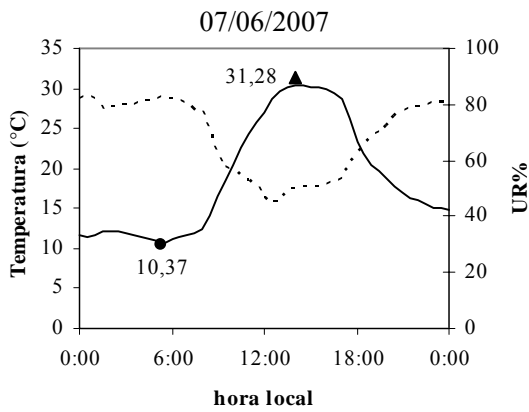
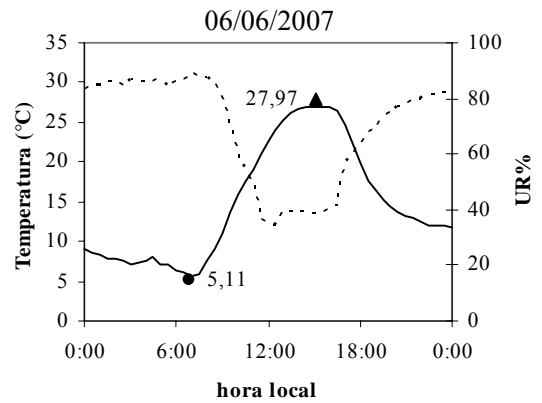
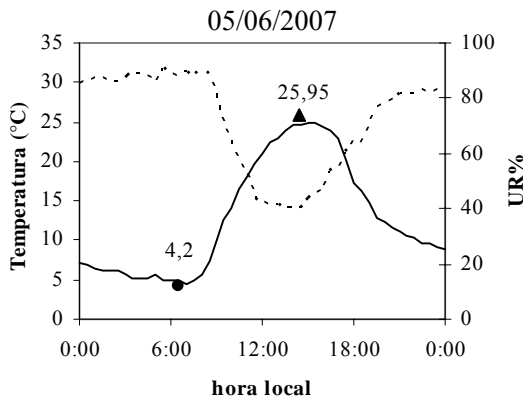
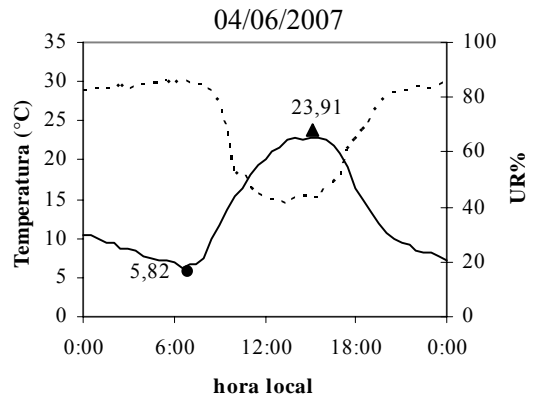
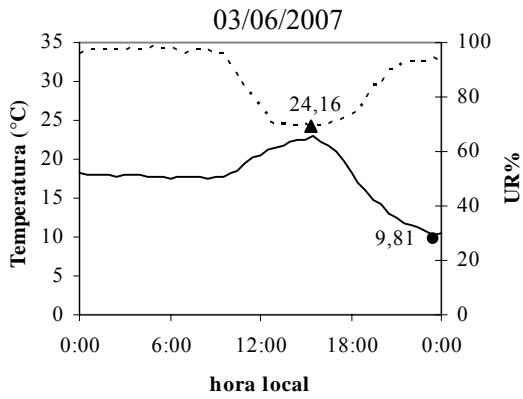


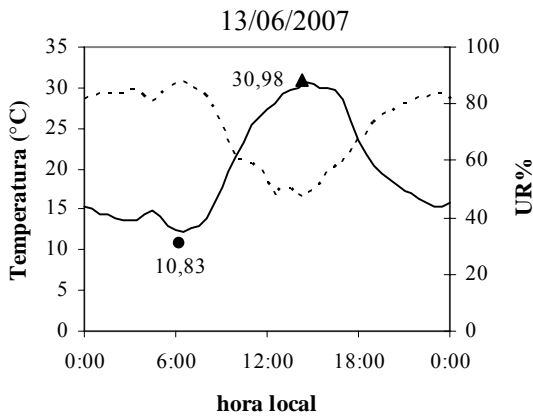
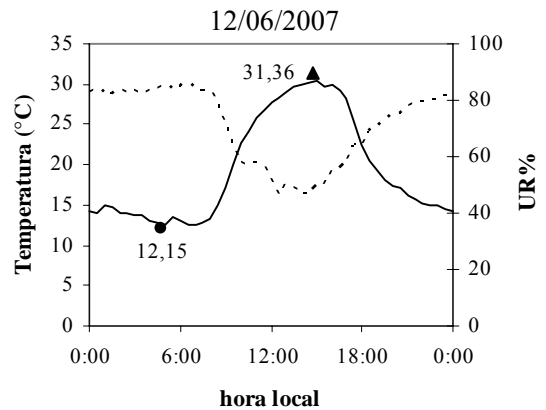
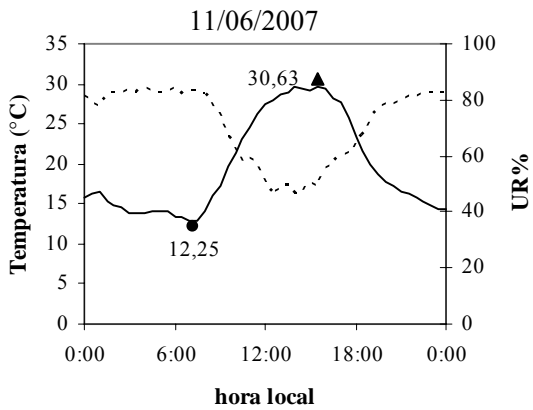
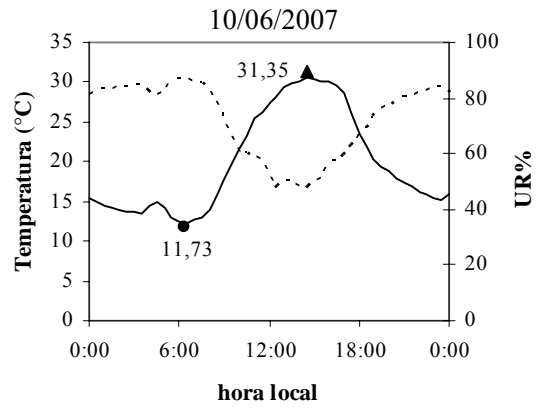
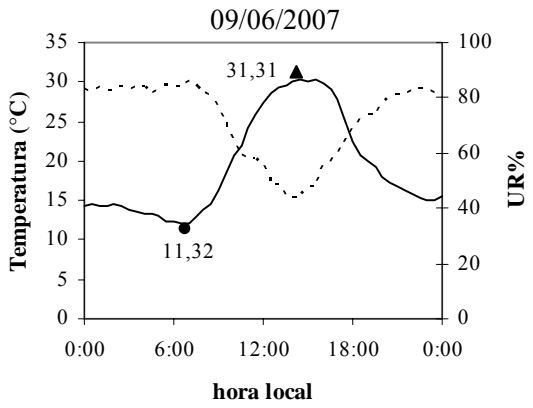
ANEXO E – Velocidade do vento (v , m s^{-1}), para os dias de 21/10 a 01/11 de 2006, referentes ao primeiro experimento.



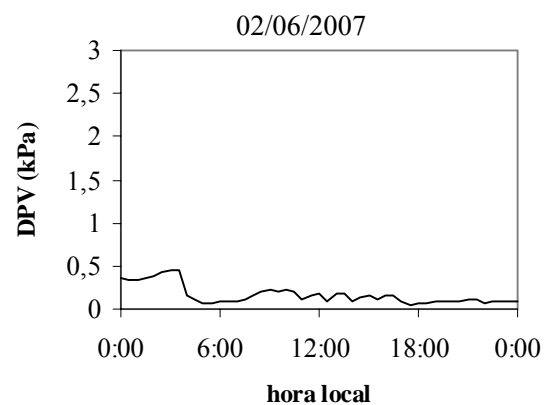
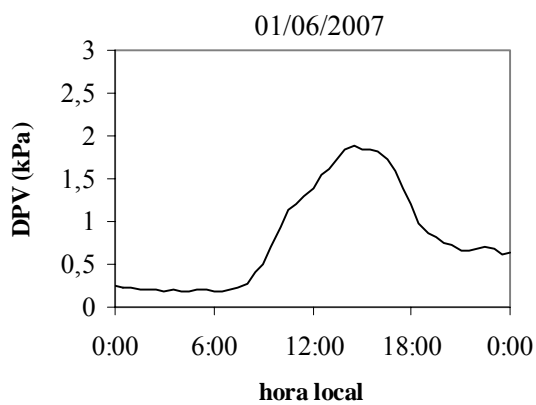
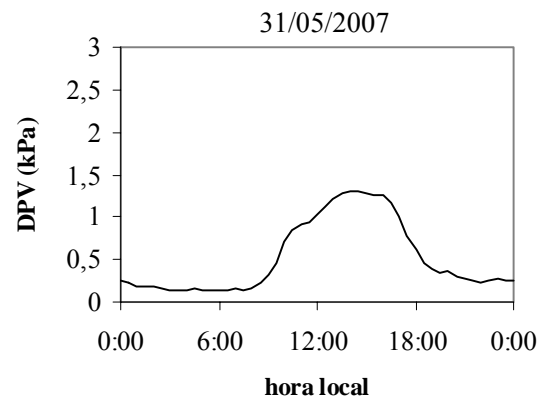
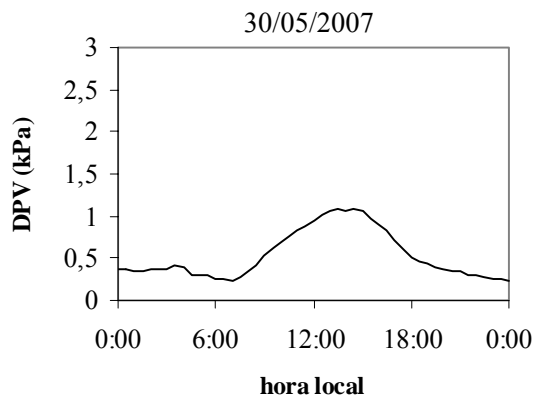
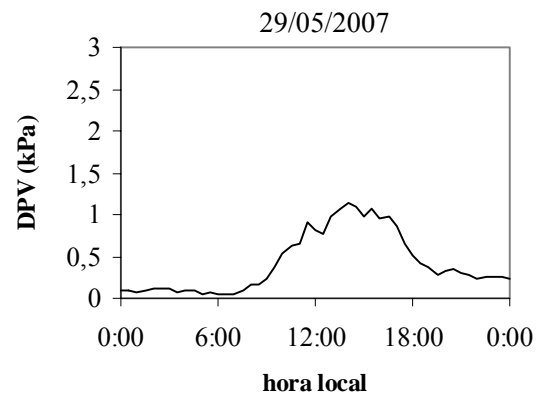
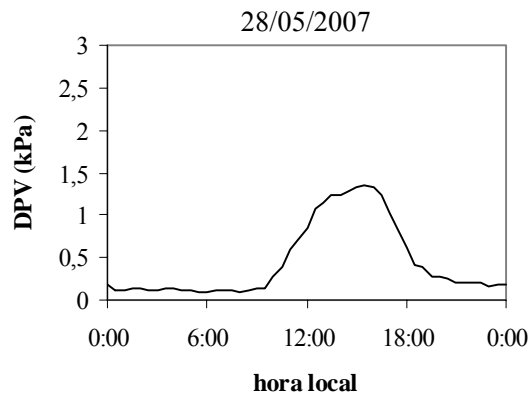
ANEXO F – Temperatura do ar (°C) linhas cheias, e umidade relativa do ar (UR, %) em linhas pontilhadas, valores de temperatura do ar máxima (▲) e mínima (●), para os dias de 28/05 a 13/06 de 2007, referente ao segundo experimento.

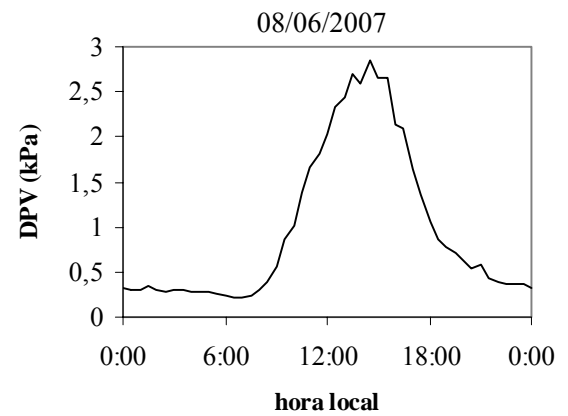
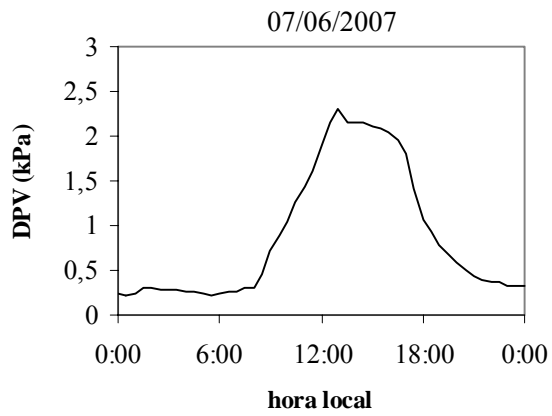
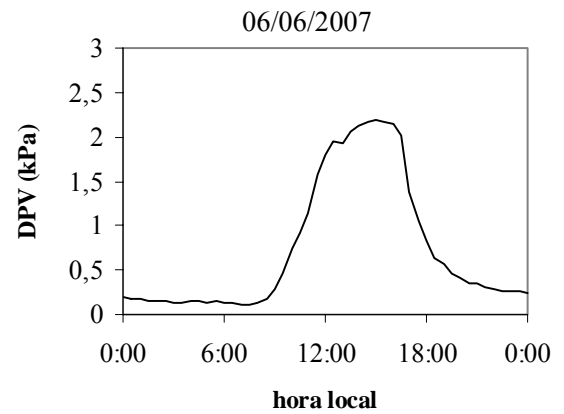
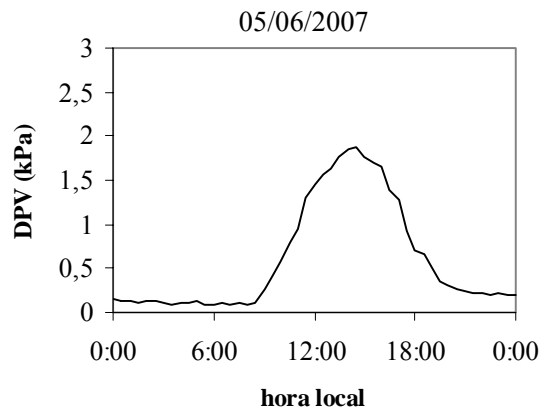
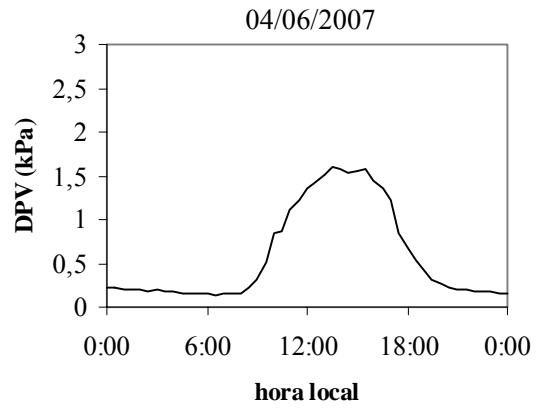
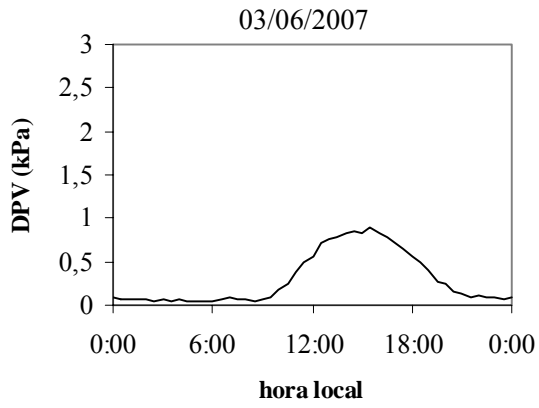


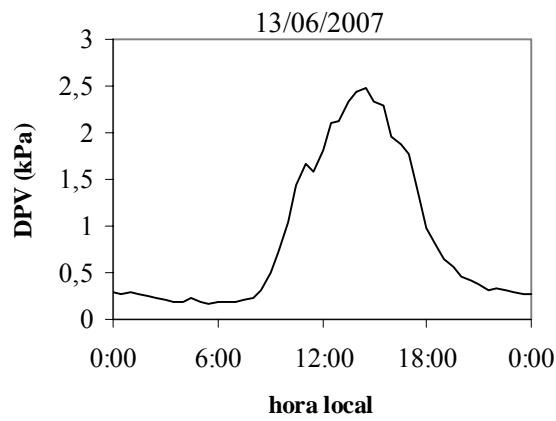
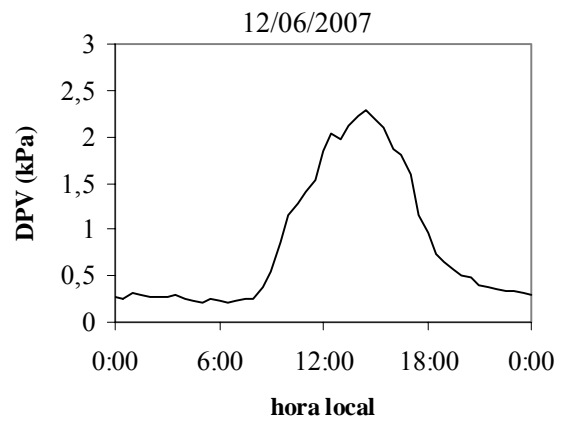
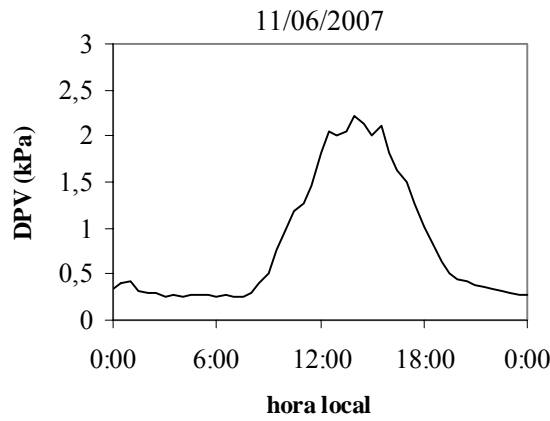
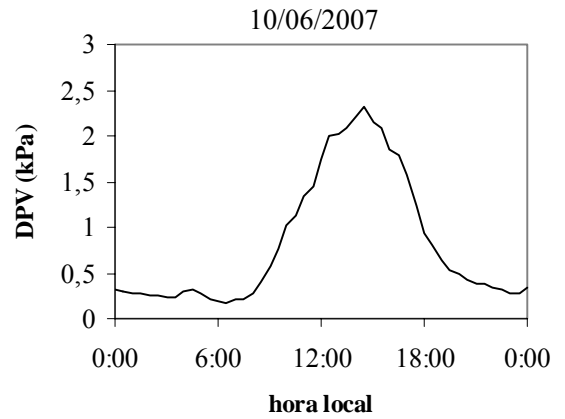
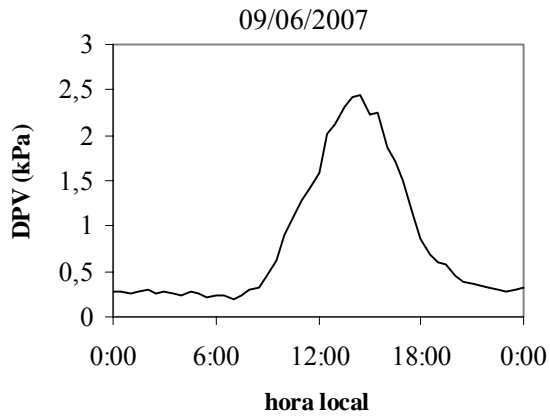




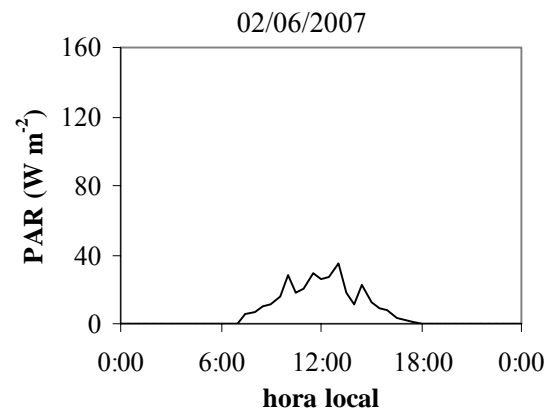
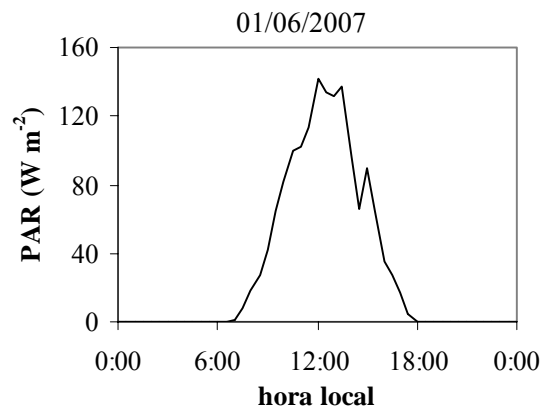
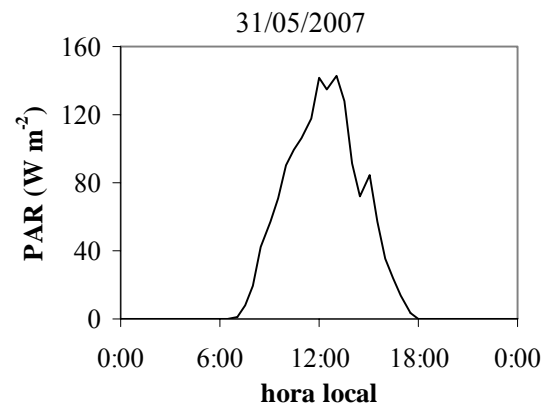
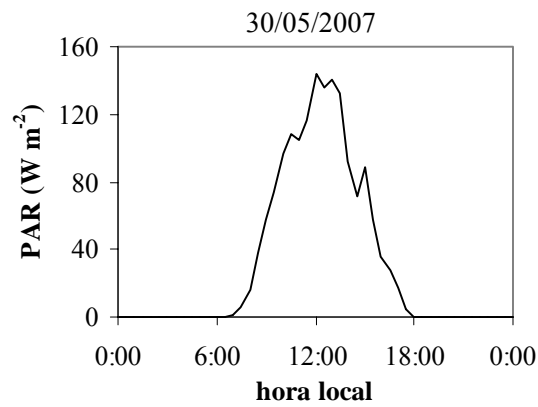
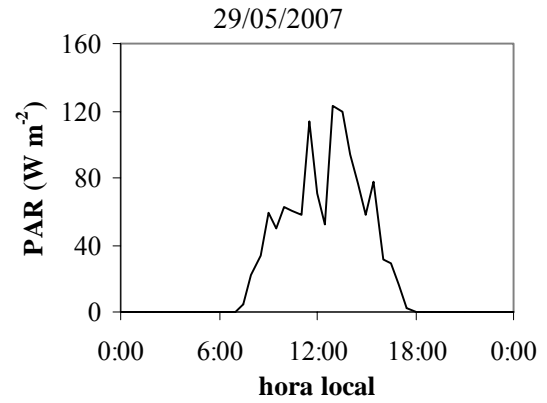
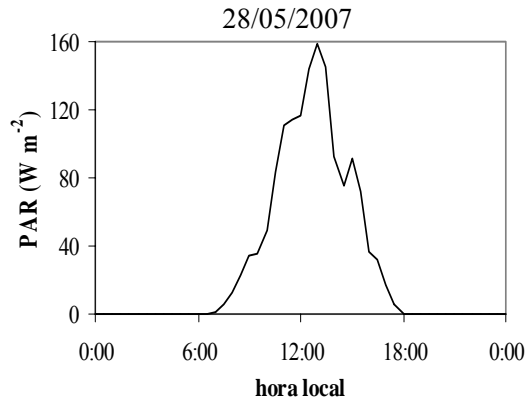
ANEXO G – Déficit de pressão de vapor do ar (DPV, kPa) para os dias de 28/05 a 13/06 de 2007, referente ao segundo experimento.

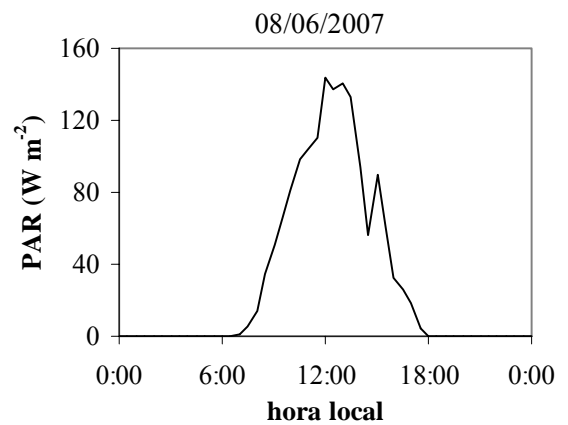
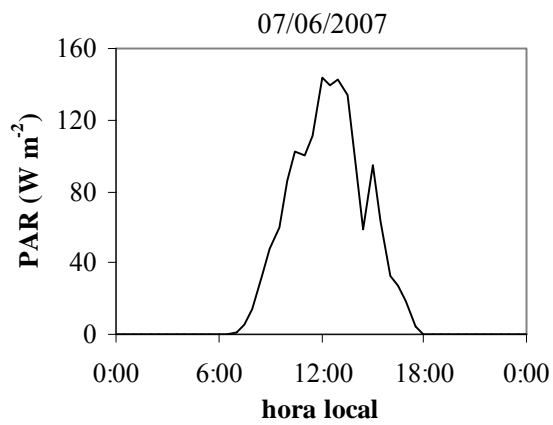
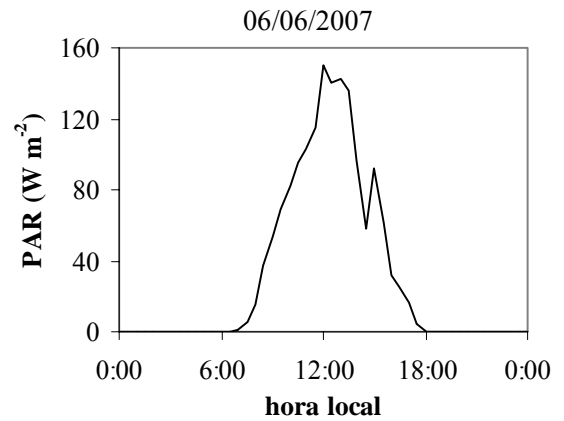
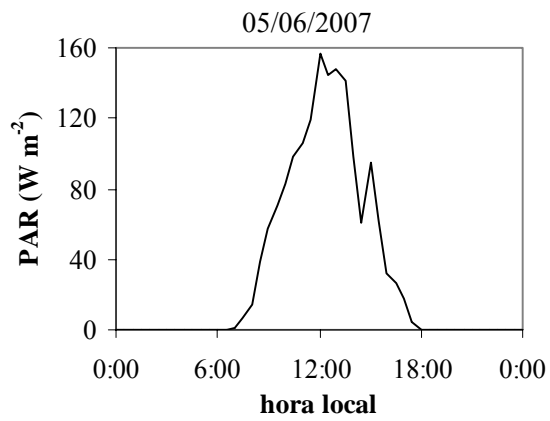
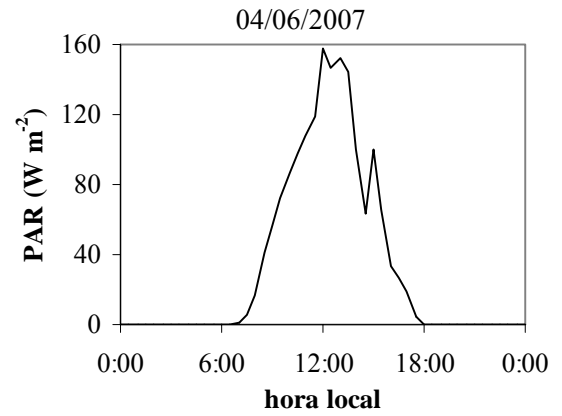
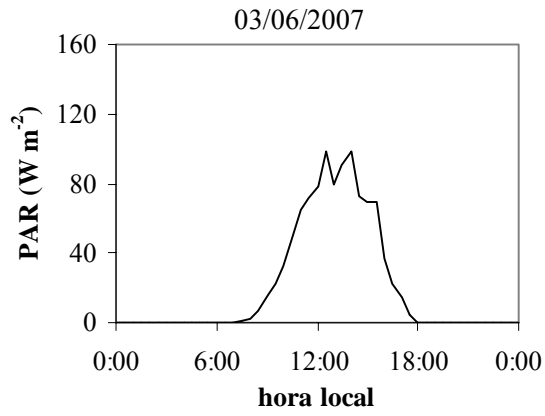


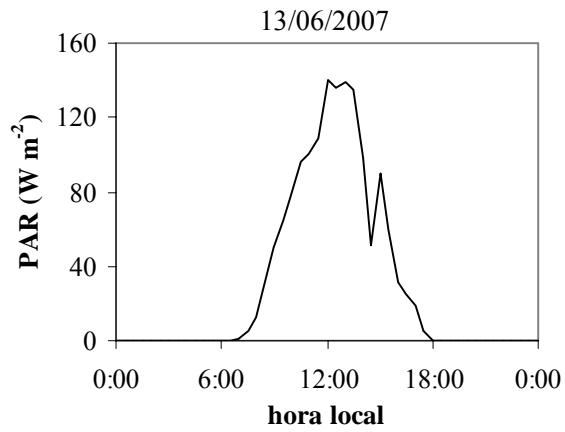
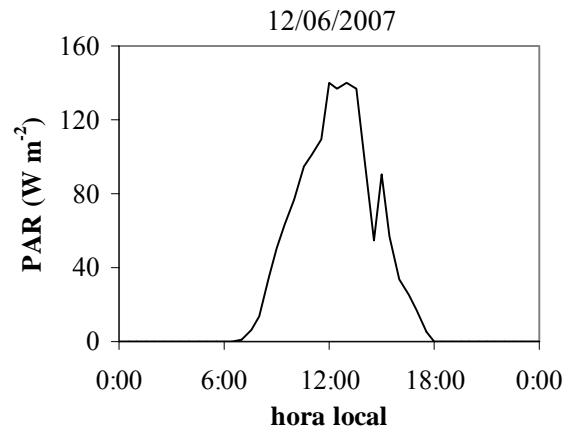
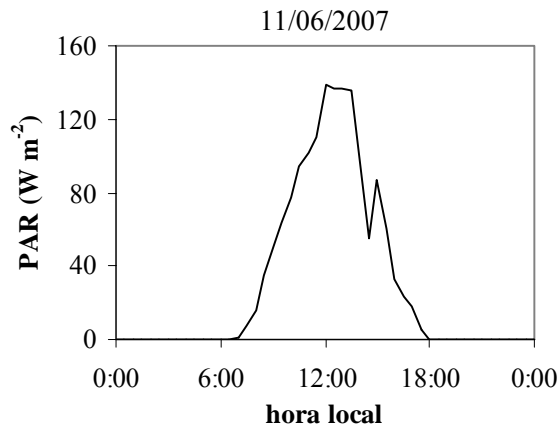
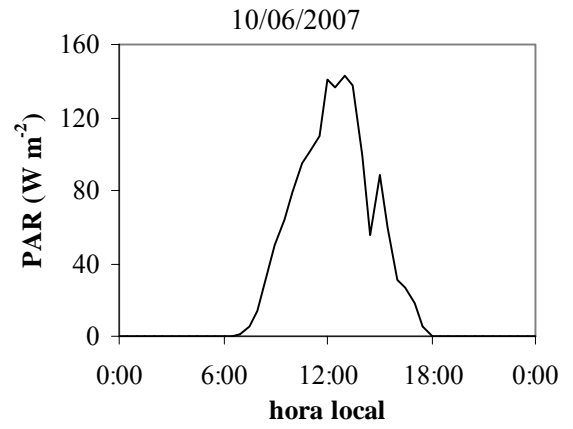
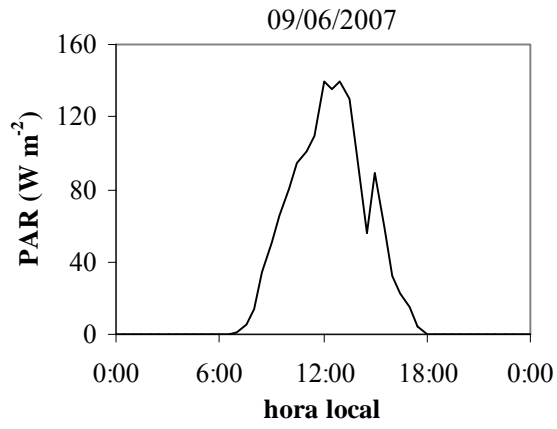




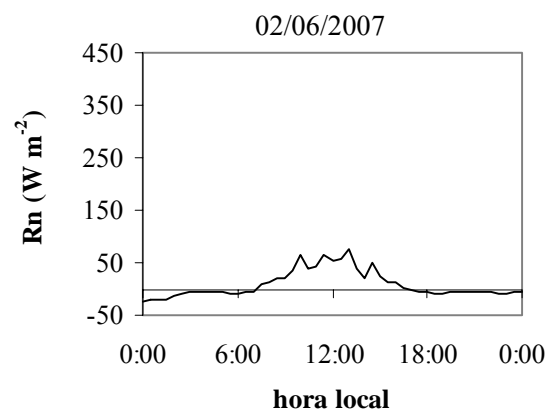
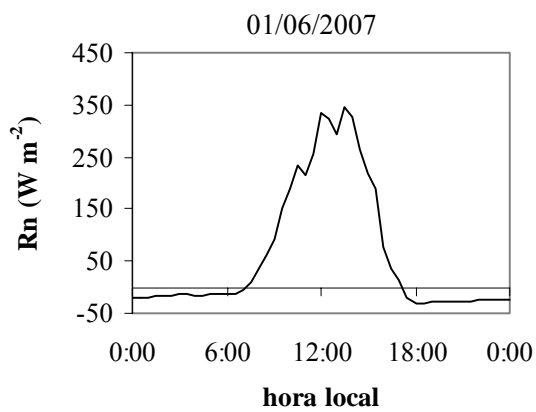
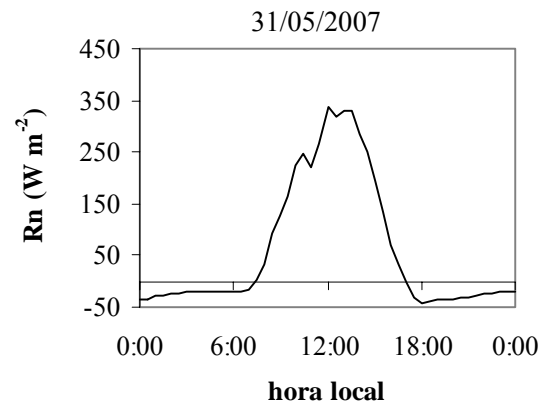
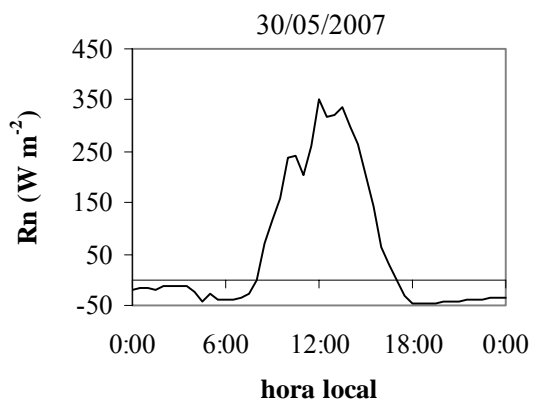
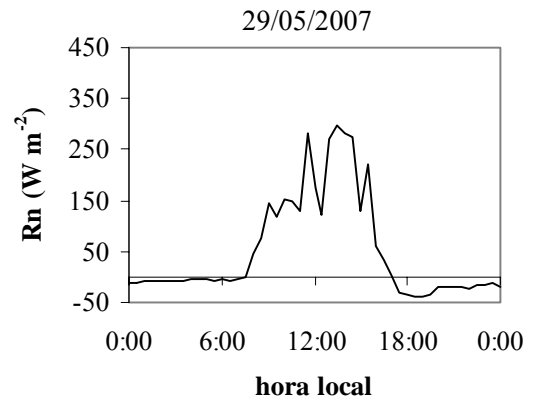
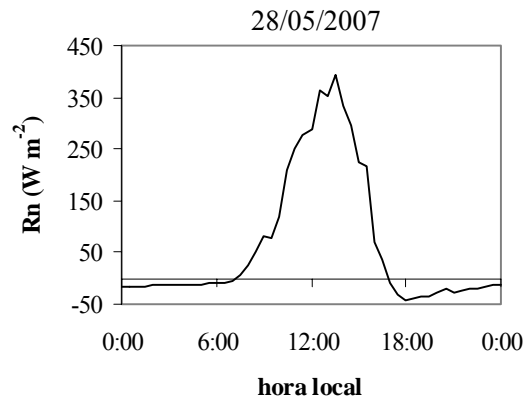
ANEXO H – Radiação fotossinteticamente ativa (PAR, W m^{-2}), para os dias de 28/05 a 13/06 de 2007, referentes ao segundo experimento.

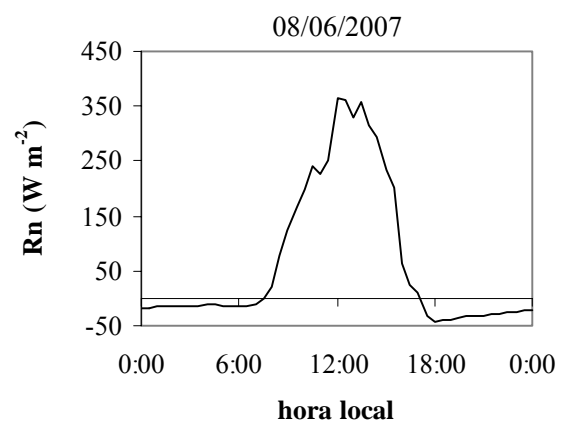
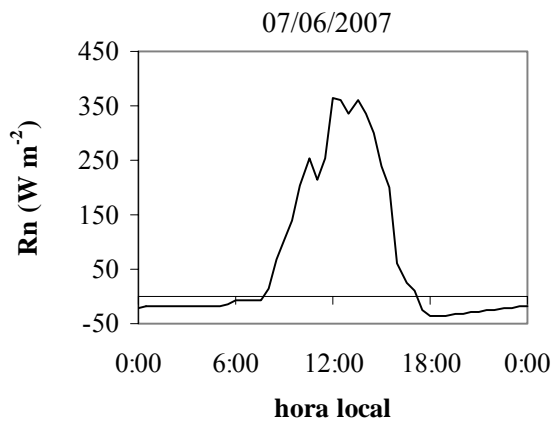
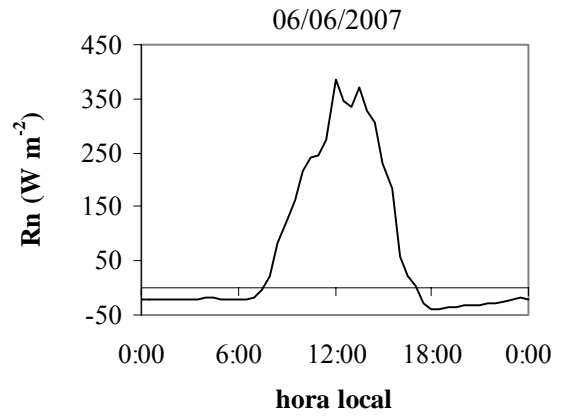
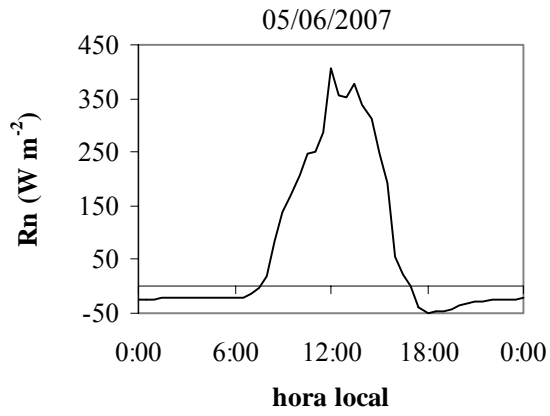
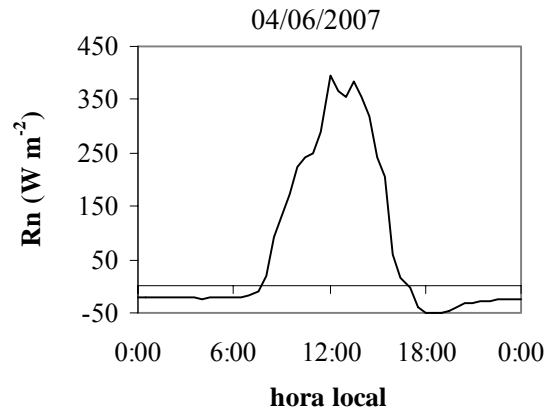
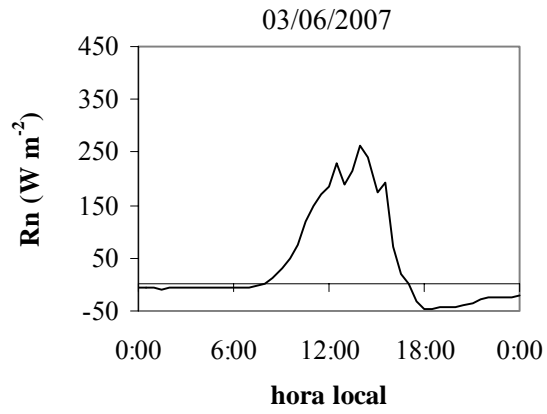


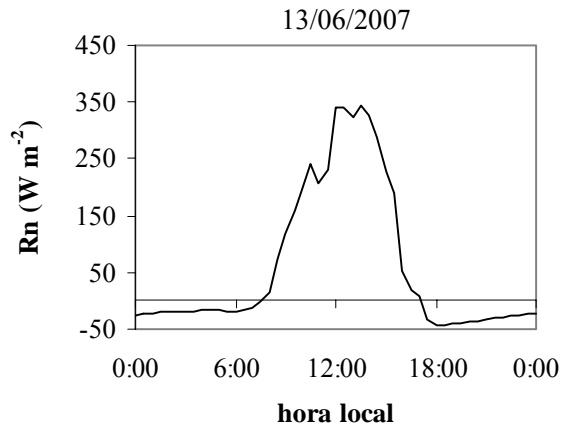
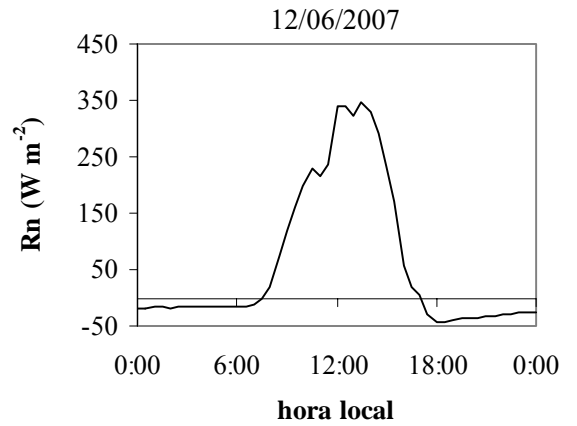
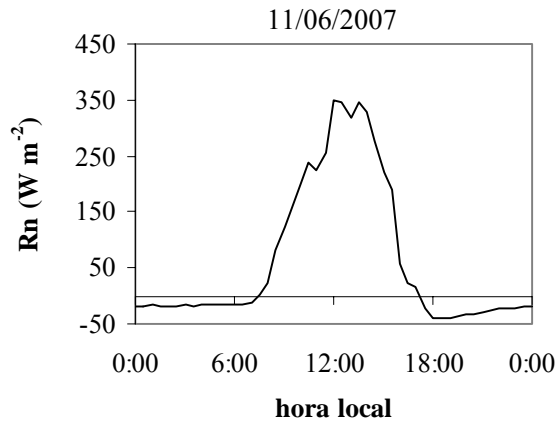
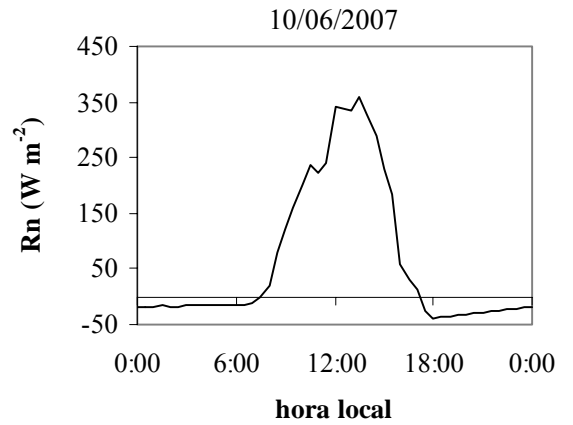
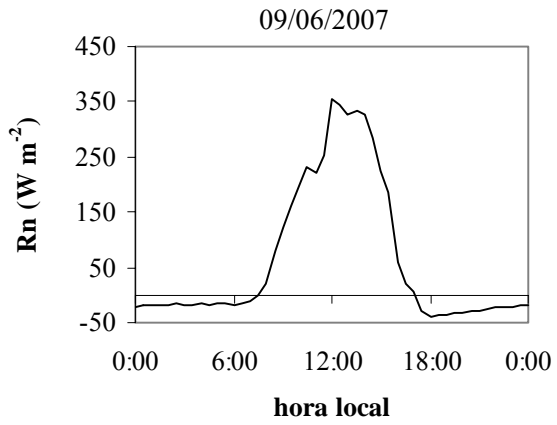




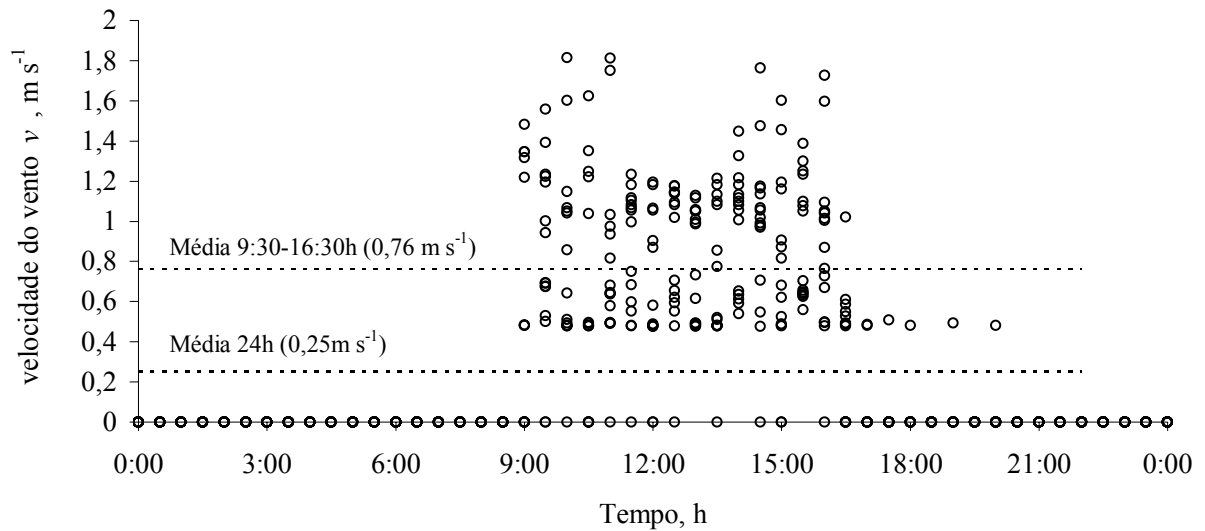
ANEXO I – Saldo de radiação (R_n , $W m^{-2}$) para os dias de 28/05 a 13/06 de 2007, referentes ao segundo experimento.







ANEXO J – Velocidade do vento (v , m s^{-1}), para os dias de 28/05 a 13/06 de 2007, referentes ao segundo experimento.



ANEXO K - Resultados experimentais da taxa de transpiração ($Transp.$, mm d^{-1}), teor de água no solo (θ , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), potencial matricial (h , m), condutividade hidráulica (K , m d^{-1}), potencial de fluxo matricial (M , $\text{m}^2 \text{ d}^{-1}$), transpiração relativa (T_R) e relação M/M_{crit} ; obtidos no primeiro e no segundo experimento.

Tabela 28 - Taxa de transpiração (*Transp.*, mm d⁻¹), teor de água (θ , m m⁻³), potencial matricial (*h*, m), condutividade hidráulica (*K*, 10⁵ m d⁻¹) e potencial de fluxo matricial (*M*, 10⁵ m² d⁻¹) no solo de textura argilosa (AG), para as plantas sem (plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), no 1º experimento

Dia	Planta 1					Planta 2					Planta 3				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	1,5901	0,3263	-2,66	29,0	35,3	1,5406	0,3233	-2,81	24,3	31,3	1,5854	0,3268	-2,64	29,8	36,0
2	1,4947	0,3269	-2,63	30,0	36,2	1,4558	0,3218	-2,89	22,2	29,4	1,4953	0,3264	-2,66	29,0	35,4
3	1,5583	0,3269	-2,63	30,0	36,2	1,5406	0,3230	-2,83	23,9	30,9	1,5695	0,3270	-2,63	30,0	36,2
4	1,7065	0,3260	-2,68	28,5	34,9	1,8526	0,3239	-2,78	25,2	32,1	2,0296	0,3280	-2,59	31,8	37,7
5	1,9046	0,3257	-2,69	28,0	34,5	1,9234	0,3209	-2,94	21,0	28,4	1,9340	0,3213	-2,92	21,6	28,9
6	1,9460	0,3260	-2,68	28,5	34,9	1,8964	0,3212	-2,93	21,4	28,7	1,9412	0,3256	-2,70	27,8	34,3
7	1,9851	0,3254	-2,71	27,5	34,1	1,8578	0,3230	-2,83	23,9	30,9	1,9515	0,3262	-2,67	28,8	35,2
8	1,9307	0,3242	-2,77	25,6	32,5	1,8848	0,3209	-2,94	21,0	28,4	1,9477	0,3245	-2,75	26,1	32,9
9	1,8915	0,3248	-2,74	26,5	33,3	1,7832	0,3242	-2,77	25,6	32,5	1,9574	0,3265	-2,65	29,3	35,6
10	1,9503	0,3239	-2,78	25,2	32,1	1,9105	0,3209	-2,94	21,0	28,4	2,0504	0,3244	-2,76	25,9	32,7
11	1,7958	0,3233	-2,81	24,3	31,3	1,8295	0,3203	-2,98	20,3	27,7	1,9326	0,3238	-2,79	25,0	31,9
12	1,9068	0,3221	-2,88	22,6	29,8	1,9606	0,3209	-2,94	21,0	28,4	2,0537	0,3235	-2,81	24,5	31,5
Dia	Planta 4					Planta 5					Planta 6				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	2,3640	0,3018	-4,34	6,1379	12,1817	2,0813	0,2996	-4,55	5,2537	10,9485	2,2226	0,3007	-4,44	5,681	11,5516
2	2,1272	0,2859	-6,30	1,8723	5,3927	2,1131	0,2838	-6,64	1,5768	4,7927	2,1201	0,2849	-6,47	1,719	5,0854
3	2,4099	0,2680	-10,40	0,3791	1,7997	2,2014	0,2674	-10,58	0,3589	1,7334	2,3057	0,2677	-10,49	0,3689	1,7663
4	2,1272	0,2522	-17,92	0,0670	0,5448	2,2792	0,2505	-19,13	0,0545	0,4716	2,2032	0,2513	-18,51	0,0605	0,5071
5	0,9823	0,2448	-24,11	0,0260	0,2823	1,1343	0,2420	-27,30	0,0175	0,2139	1,0583	0,2434	-25,64	0,0214	0,2462
6	0,5018	0,2411	-28,47	0,0153	0,1947	0,4346	0,2388	-31,75	0,0108	0,1524	0,4682	0,2399	-30,05	0,0129	0,1725
7	0,3993	0,2381	-32,77	0,0098	0,1418	0,3463	0,2362	-36,05	0,0072	0,1142	0,3728	0,2372	-34,36	0,0084	0,1274
8	0,2862	0,2360	-36,43	0,0070	0,1115	0,1449	0,2351	-38,09	0,0061	0,1007	0,2155	0,2356	-37,25	0,0065	0,1060
9	0,1625	0,2348	-38,77	0,0057	0,0966	0,1131	0,2343	-39,79	0,0053	0,0910	0,1378	0,2345	-39,28	0,0055	0,0938
10	0,1307	0,2338	-40,80	0,0049	0,0859	0,0742	0,2337	-40,97	0,0048	0,0851	0,1025	0,2338	-40,89	0,0048	0,0855
11	0,1201	0,2329	-42,80	0,0042	0,0768	0,0813	0,2331	-42,32	0,0043	0,0789	0,1007	0,2330	-42,56	0,0043	0,0779
12	0,1095	0,2321	-44,75	0,0036	0,0692	0,0954	0,2324	-43,98	0,0038	0,0721	0,1025	0,2323	-44,36	0,0037	0,0707

Tabela 29 - Taxa de transpiração (*Transp.*, mm d⁻¹), teor de água no solo (θ , m m⁻³), potencial matricial (*h*, m), condutividade hidráulica (*K*, 10⁵ m d⁻¹) e potencial de fluxo matricial (*M*, 10⁵ m² d⁻¹) no solo de textura arenosa (AR), para as plantas sem (plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), no 1º experimento

Dia	Planta 1					Planta 2					Planta 3				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	3,0247	0,2463	-1,10	363,7	183,8	3,0813	0,2490	-1,06	407,6	198,7	3,0730	0,2580	-0,94	596,6	257,9
2	2,9505	0,2479	-1,08	389,5	192,6	2,9081	0,2513	-1,03	451,0	212,9	2,9493	0,2576	-0,95	587,6	255,3
3	3,1060	0,2487	-1,07	403,0	197,1	2,7951	0,2508	-1,04	441,0	209,7	2,9705	0,2596	-0,92	637,0	269,8
4	2,8693	0,2508	-1,04	441,0	209,7	2,9187	0,2513	-1,03	451,0	212,9	2,9140	0,2597	-0,92	640,4	270,8
5	2,6572	0,2503	-1,04	431,2	206,5	2,6219	0,2497	-1,05	421,6	203,3	2,6596	0,2611	-0,91	675,5	280,8
6	2,8339	0,2490	-1,06	407,6	198,7	3,0459	0,2503	-1,04	431,2	206,5	2,9599	0,2600	-0,92	647,3	272,7
7	2,9505	0,2492	-1,06	412,2	200,2	2,9081	0,2508	-1,04	441,0	209,7	2,9493	0,2596	-0,92	637,0	269,8
8	2,8021	0,2505	-1,04	436,1	208,1	3,1060	0,2500	-1,05	426,4	204,9	2,9741	0,2600	-0,92	647,3	272,7
9	3,1555	0,2516	-1,02	456,0	214,6	2,8728	0,2518	-1,02	461,1	216,2	3,0341	0,2603	-0,91	654,2	274,8
10	3,0000	0,2503	-1,04	431,2	206,5	2,8304	0,2513	-1,03	451,0	212,9	2,9352	0,2617	-0,90	693,6	286,0
11	3,0565	0,2508	-1,04	441,0	209,7	2,7668	0,2513	-1,03	451,0	212,9	2,9317	0,2608	-0,91	668,3	278,8
12	3,0318	0,2487	-1,07	403,0	197,1	2,8021	0,2516	-1,02	456,0	214,6	2,9370	0,2611	-0,91	675,5	280,8
Dia	Planta 4					Planta 5					Planta 6				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	3,0813	0,2192	-1,65	101,2019	76,4661	4,0707	0,2140	-1,79	76,9588	63,3815	3,4905	0,2176	-1,69	93,0569	72,1931
2	3,2756	0,1948	-2,52	26,0929	30,2015	3,8799	0,1851	-3,06	14,1326	19,8383	3,5777	0,1910	-2,72	20,5613	25,6513
3	3,4170	0,1694	-4,31	4,7326	9,3714	3,8233	0,1566	-5,94	1,7127	4,6678	3,6201	0,1640	-4,91	3,1305	7,0590
4	3,0813	0,1464	-7,91	0,6898	2,5012	3,1343	0,1333	-12,12	0,1776	0,9846	3,1078	0,1409	-9,40	0,3988	1,7169
5	2,8198	0,1254	-16,22	0,0703	0,5198	1,6890	0,1207	-19,73	0,0378	0,3381	2,2544	0,1241	-17,14	0,0590	0,4605
6	0,9929	0,1181	-22,13	0,0262	0,2623	1,1343	0,1122	-29,11	0,0110	0,1426	1,3322	0,1141	-26,52	0,0148	0,1756
7	0,6007	0,1136	-27,25	0,0135	0,1653	0,6466	0,1074	-37,43	0,0049	0,0807	0,6237	0,1095	-33,47	0,0070	0,1041
8	0,3569	0,1109	-31,10	0,0089	0,1229	0,3922	0,1045	-44,17	0,0029	0,0551	0,2671	0,1075	-37,24	0,0050	0,0817
9	0,3251	0,1085	-35,30	0,0059	0,0923	0,3039	0,1022	-50,61	0,0019	0,0399	0,3145	0,1052	-42,48	0,0033	0,0603
10	0,2509	0,1066	-39,10	0,0043	0,0730	0,2403	0,1004	-56,66	0,0013	0,0303	0,2456	0,1033	-47,32	0,0023	0,0468
11	0,2403	0,1048	-43,29	0,0031	0,0577	0,2191	0,0988	-63,10	0,0009	0,0231	0,2297	0,1016	-52,56	0,0017	0,0364
12	0,2261	0,1032	-47,84	0,0023	0,0456	0,1201	0,0979	-67,07	0,0008	0,0197	0,1731	0,1003	-57,06	0,0013	0,0298

Tabela 30 - Taxa de transpiração ($Transp.$, mm d^{-1}), teor de água no solo (θ , m m^{-3}), potencial matricial (h , m), condutividade hidráulica (K , 10^5 m d^{-1}) e potencial de fluxo matricial (M , $10^5 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$) no solo de textura argilosa (AG), para as plantas sem (plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), sem ventilação forçada no 2º experimento

Dia	Planta 1					Planta 2					Planta 3				
	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M
1	1,9645	0,2989	-2,58	27,8958	30,2577	2,0176	0,2983	-2,61	26,8418	29,4481	2,0393	0,3046	-2,35	38,5183	37,9749
2	1,8002	0,2933	-2,85	19,9658	23,9092	1,7449	0,2937	-2,83	20,4179	24,2891	1,8126	0,2994	-2,56	28,6367	30,8213
3	1,8609	0,2873	-3,19	13,6854	18,3262	1,8548	0,3018	-2,45	33,0112	34,0659	1,9009	0,3003	-2,52	30,2438	32,0293
4	2,0002	0,2825	-3,49	10,0167	14,7109	1,9769	0,2980	-2,62	26,4893	29,1753	2,0386	0,2959	-2,72	23,3945	26,7316
5	1,9288	0,2859	-3,27	12,5406	17,2329	2,0991	0,2824	-3,50	9,9276	14,6187	2,0604	0,2899	-3,03	16,1488	20,5913
6	0,2620	0,2900	-3,03	16,2228	20,6577	0,1119	0,3057	-2,30	41,0468	39,7134	0,2001	0,3036	-2,38	36,5630	36,6072
7	0,8422	0,2854	-3,30	12,1382	16,8416	0,9231	0,2946	-2,79	21,5316	25,2146	0,8612	0,2957	-2,73	23,0753	26,4743
8	0,9824	0,2867	-3,22	13,2086	17,8742	0,9310	0,2966	-2,69	24,3123	27,4659	0,9423	0,2974	-2,65	25,5142	28,4150
9	1,0360	0,2940	-2,81	20,8674	24,6644	1,0991	0,2995	-2,55	28,8746	31,0013	1,1193	0,3027	-2,42	34,5919	35,2064
10	1,0002	0,2923	-2,90	18,7486	22,8734	1,3270	0,3030	-2,41	35,2400	35,6695	1,2136	0,3035	-2,39	36,2483	36,3851
11	1,7028	0,2804	-3,64	8,6880	13,3083	1,3955	0,2936	-2,83	20,3558	24,2371	1,6343	0,2926	-2,88	19,1624	23,2277
12	1,5480	0,2851	-3,32	11,9021	16,6103	1,3908	0,2852	-3,31	11,9741	16,6810	1,5468	0,2909	-2,98	17,1887	21,5163
13	1,0836	0,2960	-2,71	23,5393	26,8480	1,2822	0,2958	-2,73	23,1788	26,5579	1,2371	0,3018	-2,45	33,0108	34,0656
14	1,4230	0,2980	-2,62	26,5018	29,1850	1,1771	0,2984	-2,60	27,1187	29,6617	1,3712	0,3042	-2,36	37,7342	37,4290
15	1,3098	0,2897	-3,04	15,9445	20,4076	1,3229	0,3055	-2,31	40,6505	39,4431	1,3819	0,3034	-2,39	36,0913	36,2741
16	1,6075	0,2897	-3,04	15,9445	20,4076	1,6621	0,3055	-2,31	40,6505	39,4431	1,7152	0,3034	-2,39	36,0913	36,2741
17	1,7266	0,2897	-3,04	15,9445	20,4076	1,8318	0,3055	-2,31	40,6505	39,4431	1,8655	0,3034	-2,39	36,0913	36,2741
Dia	Planta 4					Planta 5					Planta 6				
	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M
1	2,4268	0,3006	-2,51	30,8172	32,4556	2,0890	0,2984	-2,60	27,1028	29,6495	2,2326	0,2997	-2,55	29,2113	31,2554
2	1,8192	0,2878	-3,16	14,1063	18,7213	2,2686	0,2824	-3,51	9,9043	14,5945	2,0149	0,2854	-3,30	12,1473	16,8506
3	1,9571	0,2739	-4,18	5,4813	9,6220	2,1625	0,2671	-4,87	3,2710	6,6893	2,1625	0,2701	-4,54	4,1450	7,9033
4	2,0424	0,2595	-5,85	1,7598	4,3229	2,0601	0,2525	-7,02	0,9488	2,7977	1,9088	0,2566	-6,28	1,3793	3,6413
5	1,9894	0,2454	-8,60	0,4766	1,7223	2,2724	0,2364	-11,48	0,1802	0,8674	2,1059	0,2417	-9,63	0,3261	1,3180
6	0,2261	0,2438	-9,03	0,4044	1,5339	0,2580	0,2346	-12,23	0,1454	0,7455	0,3216	0,2395	-10,36	0,2546	1,1070
7	1,5618	0,2327	-13,07	0,1161	0,6361	0,8092	0,2289	-15,12	0,0710	0,4492	1,4064	0,2295	-14,74	0,0773	0,4771
8	0,7138	0,2277	-15,84	0,0607	0,4020	0,3286	0,2265	-16,58	0,0519	0,3601	0,5018	0,2260	-16,98	0,0480	0,3405
9	0,4346	0,2246	-17,96	0,0396	0,2975	0,2544	0,2247	-17,87	0,0404	0,3014	0,2898	0,2239	-18,50	0,0359	0,2772
10	0,2834	0,2226	-19,58	0,0296	0,2420	0,2403	0,2230	-19,21	0,0316	0,2532	0,3216	0,2216	-20,43	0,0257	0,2184
11	0,2261	0,2210	-21,03	0,0233	0,2039	0,1979	0,2216	-20,44	0,0256	0,2184	0,1991	0,2202	-21,78	0,0207	0,1873
12	0,1873	0,2197	-22,35	0,0190	0,1761	0,1837	0,2203	-21,68	0,0210	0,1895	0,1532	0,2192	-22,91	0,0174	0,1659
13	0,1519	0,2186	-23,51	0,0160	0,1559	0,1696	0,2191	-22,92	0,0174	0,1657	0,1541	0,2181	-24,13	0,0146	0,1464
14	0,1343	0,2177	-24,61	0,0137	0,1396	0,1484	0,2181	-24,10	0,0147	0,1469	0,1104	0,2173	-25,07	0,0129	0,1335
15	0,1272	0,2168	-25,73	0,0118	0,1255	0,1731	0,2169	-25,59	0,0120	0,1271	0,1187	0,2164	-26,14	0,0112	0,1208
16	0,1449	0,2157	-27,09	0,0099	0,1108	0,1378	0,2159	-26,87	0,0102	0,1129	0,1171	0,2156	-27,26	0,0097	0,1091
17	0,1484	0,2147	-28,60	0,0082	0,0971	0,1484	0,2148	-28,36	0,0085	0,0991	0,1329	0,2147	-28,61	0,0082	0,0970

Tabela 31 - Taxa de transpiração (*Transp.*, mm d⁻¹), teor de água no solo (θ , m m⁻³), potencial matricial (*h*, m), condutividade hidráulica (*K*, 10⁵ m d⁻¹) e potencial de fluxo matricial (*M*, 10⁵ m² d⁻¹) no solo de textura argilosa (AG), para as plantas sem (plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), com ventilação forçada no 2º experimento

Dia	Planta 1					Planta 2					Planta 3				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	2,0530	0,2908	-2,98	17,0954	21,4340	1,7949	0,2804	-3,65	8,6598	13,2779	1,9516	0,2914	-2,95	17,7586	22,0162
2	1,9210	0,2898	-3,04	16,0316	20,4860	1,8689	0,2763	-3,97	6,4931	10,8410	1,9160	0,2888	-3,10	15,0885	19,6299
3	1,5133	0,2938	-2,83	20,5357	24,3877	2,1757	0,2798	-3,69	8,3247	12,9139	1,8452	0,2927	-2,88	19,1951	23,2556
4	1,6259	0,2912	-2,96	17,4995	21,7895	1,5916	0,2837	-3,42	10,8179	15,5300	1,6150	0,2933	-2,85	19,8963	23,8506
5	1,8200	0,2934	-2,84	20,0715	23,9983	1,5176	0,2879	-3,15	14,2248	18,8318	1,6848	0,2965	-2,69	24,2156	27,3889
6	0,2300	0,2928	-2,88	19,3181	23,3604	0,3100	0,2872	-3,19	13,6436	18,2868	0,1600	0,2959	-2,72	23,2942	26,6509
7	1,1500	0,2815	-3,57	9,3550	14,0198	1,0352	0,2918	-2,93	18,1532	22,3595	1,1200	0,2923	-2,90	18,7342	22,8610
8	1,5631	0,2971	-2,66	25,1110	28,0980	1,0371	0,2845	-3,36	11,4248	16,1385	1,3782	0,2968	-2,68	24,5775	27,6764
9	1,0366	0,2918	-2,93	18,2196	22,4171	0,8689	0,2883	-3,13	14,5929	19,1737	1,0046	0,2959	-2,72	23,3375	26,6858
10	1,0094	0,2874	-3,18	13,7617	18,3981	0,8689	0,2839	-3,40	10,9624	15,6758	0,9896	0,2914	-2,95	17,7245	21,9864
11	1,4592	0,2969	-2,67	24,8150	27,8645	1,2879	0,2967	-2,68	24,5454	27,6510	1,4465	0,3028	-2,42	34,8255	35,3736
12	1,9736	0,2972	-2,66	25,2227	28,1860	1,2478	0,2824	-3,50	9,9276	14,6187	1,7094	0,2957	-2,73	23,1320	26,5201
13	2,1677	0,2975	-2,65	25,5991	28,4815	1,2771	0,2866	-3,23	13,0489	17,7218	1,8308	0,2979	-2,62	26,3634	29,0776
14	1,1000	0,2947	-2,78	21,7803	25,4193	0,9089	0,2905	-3,00	16,7784	21,1534	1,0595	0,2985	-2,60	27,2579	29,7688
15	1,2295	0,2966	-2,69	24,3406	27,4883	1,1092	0,2963	-2,70	23,9681	27,1914	1,2308	0,3024	-2,43	34,1040	34,8561
16	1,6501	0,2966	-2,69	24,3406	27,4883	1,3403	0,2963	-2,70	23,9681	27,1914	1,5777	0,3024	-2,43	34,1040	34,8561
17	1,8118	0,2966	-2,69	24,3406	27,4883	1,4173	0,2963	-2,70	23,9681	27,1914	1,7051	0,3024	-2,43	34,1040	34,8561
Dia	Planta 4					Planta 5					Planta 6				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	2,4559	0,2992	-2,57	28,4071	30,6471	2,4775	0,2983	-2,61	26,8676	29,4681	2,3958	0,3003	-2,52	30,1483	31,9580
2	2,5159	0,2814	-3,57	9,2918	13,9530	2,6219	0,2797	-3,70	8,2709	12,8551	2,2113	0,2846	-3,35	11,4926	16,2058
3	2,3074	0,2651	-5,10	2,7996	5,9949	2,4276	0,2625	-5,42	2,2769	5,1828	2,0396	0,2702	-4,53	4,1530	7,9139
4	2,0707	0,2504	-7,43	0,7834	2,4443	2,2085	0,2469	-8,22	0,5560	1,9198	2,0718	0,2555	-6,47	1,2482	3,3939
5	1,9470	0,2367	-11,37	0,1856	0,8858	1,9647	0,2330	-12,94	0,1202	0,6519	2,0369	0,2411	-9,83	0,3044	1,2555
6	0,2191	0,2351	-12,00	0,1549	0,7795	0,3074	0,2308	-14,02	0,0917	0,5382	0,4346	0,2380	-10,87	0,2167	0,9881
7	1,1025	0,2273	-16,07	0,0578	0,3883	0,6996	0,2259	-17,03	0,0475	0,3380	1,5618	0,2270	-16,29	0,0551	0,3757
8	0,3569	0,2248	-17,82	0,0407	0,3031	0,4134	0,2230	-19,27	0,0313	0,2513	0,4346	0,2239	-18,51	0,0358	0,2768
9	0,3922	0,2220	-20,09	0,0272	0,2275	0,3958	0,2202	-21,85	0,0205	0,1860	0,4765	0,2205	-21,49	0,0216	0,1936
10	0,2994	0,2199	-22,12	0,0196	0,1806	0,3026	0,2180	-24,17	0,0145	0,1458	0,3184	0,2183	-23,88	0,0151	0,1501
11	0,2321	0,2183	-23,90	0,0151	0,1498	0,2394	0,2163	-26,28	0,0110	0,1192	0,2376	0,2166	-25,93	0,0115	0,1231
12	0,2195	0,2167	-25,79	0,0117	0,1248	0,2343	0,2147	-28,60	0,0082	0,0971	0,2220	0,2150	-28,09	0,0088	0,1015
13	0,1554	0,2156	-27,26	0,0097	0,1091	0,1556	0,2136	-30,32	0,0068	0,0843	0,1621	0,2139	-29,83	0,0071	0,0877
14	0,1307	0,2147	-28,59	0,0082	0,0972	0,1528	0,2125	-32,15	0,0055	0,0730	0,1626	0,2127	-31,74	0,0058	0,0754
15	0,1429	0,2137	-30,16	0,0069	0,0854	0,1590	0,2114	-34,24	0,0045	0,0626	0,1768	0,2115	-34,03	0,0046	0,0636
16	0,1549	0,2126	-32,01	0,0056	0,0739	0,1902	0,2100	-37,00	0,0034	0,0517	0,1758	0,2102	-36,55	0,0036	0,0533
17	0,1834	0,2113	-34,41	0,0044	0,0618	0,1696	0,2088	-39,75	0,0027	0,0433	0,1852	0,2089	-39,51	0,0028	0,0440

Tabela 32 - Taxa de transpiração ($Transp.$, $mm\ d^{-1}$), teor de água no solo (θ , $m\ m^{-3}$), potencial matricial (h , m), condutividade hidráulica (K , $10^5\ m\ d^{-1}$) e potencial de fluxo matricial (M , $10^5\ m^2\ d^{-1}$) no solo de textura arenosa (AR), para as plantas sem (plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), sem ventilação forçada no 2º experimento

Dia	Planta 1					Planta 2					Planta 3				
	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M
1	1,6215	0,2390	-1,22	134,47	66,05	1,8901	0,2378	-1,24	124,95	62,68	2,0274	0,2432	-1,13	174,79	79,63
2	1,8101	0,2376	-1,25	123,55	62,18	1,7729	0,2353	-1,30	106,04	55,77	2,0725	0,2412	-1,17	154,95	73,07
3	2,2872	0,2363	-1,28	113,21	58,43	2,0524	0,2333	-1,36	92,87	50,73	2,4747	0,2395	-1,21	139,25	67,72
4	2,2113	0,2352	-1,31	105,52	55,57	2,1110	0,2318	-1,40	83,79	47,15	2,0121	0,2382	-1,24	128,02	63,78
5	1,8052	0,2340	-1,34	97,47	52,51	1,6425	0,2369	-1,27	117,52	60,00	1,7412	0,2401	-1,19	144,66	69,58
6	0,2821	0,2346	-1,32	101,09	53,90	0,3002	0,2375	-1,25	122,36	61,76	0,2987	0,2407	-1,18	150,20	71,47
7	1,1321	0,2311	-1,42	79,88	45,57	1,0522	0,2333	-1,35	93,02	50,79	1,1132	0,2368	-1,27	117,11	59,86
8	1,9529	0,2399	-1,20	142,80	68,94	1,4579	0,2409	-1,18	151,57	71,94	1,8030	0,2452	-1,09	197,58	86,90
9	1,8863	0,2398	-1,20	141,68	68,56	1,7130	0,2397	-1,20	141,01	68,33	1,8940	0,2445	-1,10	190,10	84,54
10	1,9972	0,2368	-1,27	117,33	59,94	1,7130	0,2357	-1,30	108,68	56,75	1,9550	0,2410	-1,17	152,76	72,34
11	1,8308	0,2366	-1,27	115,82	59,38	1,3223	0,2339	-1,34	96,82	52,27	1,6681	0,2400	-1,20	143,66	69,24
12	1,7568	0,2331	-1,36	91,63	50,25	1,2772	0,2339	-1,34	96,66	52,20	1,6049	0,2381	-1,24	127,67	63,66
13	1,8493	0,2317	-1,40	83,22	46,92	1,4275	0,2327	-1,37	89,20	49,30	1,7309	0,2368	-1,27	117,11	59,85
14	1,3870	0,2303	-1,44	76,00	43,98	1,4275	0,2315	-1,40	82,09	46,47	1,4766	0,2355	-1,30	107,58	56,34
15	1,9418	0,2307	-1,43	77,99	44,80	1,3524	0,2321	-1,39	85,65	47,89	1,7442	0,2360	-1,29	111,21	57,69
16	1,8955	0,2307	-1,43	77,99	44,80	1,6529	0,2321	-1,39	85,65	47,89	1,8690	0,2360	-1,29	111,21	57,69
17	1,8308	0,2307	-1,43	77,99	44,80	1,3899	0,2321	-1,39	85,65	47,89	1,7019	0,2360	-1,29	111,21	57,69
Dia	Planta 4					Planta 5					Planta 6				
	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M	$Transp.$	θ	h	K	M
1	2,7927	0,2394	-1,21	138,6216	67,4991	3,0537	0,2406	-1,18	149,0609	71,0840	2,9823	0,2401	-1,19	144,5018	69,5276
2	2,6567	0,2206	-1,76	37,6797	26,6746	2,9011	0,2201	-1,78	36,0599	25,8522	2,5661	0,2219	-1,71	41,5696	28,6094
3	2,6415	0,2020	-2,77	7,6933	8,5964	2,9788	0,1990	-3,01	5,7669	7,0000	2,6832	0,2030	-2,70	8,4613	9,1996
4	2,2366	0,1861	-4,51	1,4087	2,5632	2,8127	0,1791	-5,86	0,5670	1,3398	2,5548	0,1849	-4,72	1,2090	2,2986
5	1,8092	0,1733	-7,47	0,2439	0,7341	1,6678	0,1673	-9,98	0,0890	0,3577	1,8303	0,1719	-7,96	0,1956	0,6273
6	0,3463	0,1709	-8,36	0,1648	0,5552	0,2191	0,1657	-10,83	0,0670	0,2921	0,3251	0,1696	-8,88	0,1339	0,4786
7	0,7951	0,1653	-11,12	0,0611	0,2736	0,3675	0,1631	-12,51	0,0405	0,2039	0,8554	0,1636	-12,20	0,0442	0,2171
8	0,4973	0,1617	-13,59	0,0304	0,1660	0,3392	0,1607	-14,44	0,0246	0,1428	0,4346	0,1605	-14,66	0,0234	0,1377
9	0,3199	0,1595	-15,65	0,0186	0,1170	0,2226	0,1592	-15,96	0,0174	0,1114	0,3039	0,1584	-16,83	0,0144	0,0975
10	0,1607	0,1583	-16,86	0,0144	0,0972	0,1272	0,1583	-16,94	0,0141	0,0961	0,1677	0,1572	-18,25	0,0109	0,0797
11	0,1710	0,1571	-18,31	0,0108	0,0791	0,1625	0,1571	-18,32	0,0108	0,0790	0,1837	0,1559	-20,02	0,0079	0,0633
12	0,2068	0,1557	-20,32	0,0075	0,0610	0,1449	0,1561	-19,70	0,0084	0,0659	0,1484	0,1548	-21,64	0,0060	0,0521
13	0,1102	0,1549	-21,53	0,0061	0,0528	0,1130	0,1553	-20,88	0,0068	0,0569	0,1449	0,1538	-23,41	0,0046	0,0428
14	0,1596	0,1538	-23,49	0,0045	0,0424	0,1555	0,1542	-22,70	0,0051	0,0462	0,1237	0,1529	-25,11	0,0036	0,0359
15	0,1484	0,1527	-25,55	0,0034	0,0343	0,1519	0,1531	-24,71	0,0038	0,0374	0,1319	0,1520	-27,13	0,0027	0,0296
16	0,1625	0,1516	-28,14	0,0024	0,0269	0,1519	0,1520	-27,00	0,0028	0,0299	0,1484	0,1509	-29,70	0,0020	0,0235
17	0,1131	0,1508	-30,18	0,0019	0,0226	0,1307	0,1511	-29,23	0,0021	0,0245	0,1378	0,1500	-32,43	0,0015	0,0188

Tabela 33 - Taxa de transpiração (*Transp.*, mm d⁻¹), teor de água no solo (θ , m m⁻³), potencial matricial (*h*, m), condutividade hidráulica (*K*, 10⁵ m d⁻¹) e potencial de fluxo matricial (*M*, 10⁵ m² d⁻¹) no solo de textura arenosa (AR), para as plantas sem (plantas 1, 2 e 3) ou com deficiência hídrica (plantas 4, 5 e 6), com ventilação forçada no 2º experimento

Dia	Planta 1					Planta 2					Planta 3				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	2,8532	0,2336	-1,35	95,06	51,59	2,6689	0,2394	-1,21	138,15	67,33	2,1532	0,2412	-1,17	154,66	72,98
2	2,6472	0,2297	-1,46	72,54	42,54	2,9236	0,2376	-1,25	122,95	61,97	2,3623	0,2382	-1,24	128,14	63,82
3	2,7684	0,2350	-1,31	104,14	55,05	2,2132	0,2358	-1,29	109,76	57,15	2,5422	0,2401	-1,19	144,62	69,57
4	2,3654	0,2323	-1,38	87,12	48,47	2,2145	0,2318	-1,39	84,07	47,26	1,9689	0,2367	-1,27	116,45	59,62
5	2,7860	0,2354	-1,30	106,92	56,09	1,4712	0,2368	-1,27	116,95	59,80	2,2236	0,2408	-1,18	151,06	71,76
6	0,4123	0,2344	-1,33	100,09	53,52	0,3721	0,2307	-1,43	77,72	44,69	0,3877	0,2372	-1,26	120,31	61,02
7	1,6735	0,2337	-1,34	95,45	51,74	1,6636	0,2358	-1,29	109,58	57,09	2,4522	0,2394	-1,21	138,41	67,42
8	2,6735	0,2364	-1,28	113,77	58,63	1,9419	0,2323	-1,38	86,82	48,36	1,7061	0,2391	-1,22	135,24	66,32
9	1,9731	0,2343	-1,33	99,27	53,20	2,0275	0,2396	-1,20	140,13	68,02	1,8026	0,2416	-1,16	159,05	74,45
10	2,0706	0,2341	-1,33	98,28	52,83	2,0275	0,2389	-1,22	133,62	65,75	1,8955	0,2412	-1,17	154,63	72,97
11	2,2396	0,2336	-1,35	94,59	51,40	2,9600	0,2379	-1,24	125,95	63,04	2,5891	0,2404	-1,19	147,44	70,53
12	2,6528	0,2364	-1,28	113,95	58,70	2,4679	0,2330	-1,36	91,17	50,07	2,1751	0,2394	-1,21	138,50	67,46
13	2,3476	0,2316	-1,40	83,01	46,83	2,0887	0,2358	-1,29	109,58	57,09	1,8202	0,2383	-1,23	129,23	64,21
14	2,0471	0,2397	-1,20	141,01	68,33	2,1009	0,2390	-1,22	135,11	66,28	1,8444	0,2442	-1,11	185,81	83,17
15	2,0800	0,2396	-1,20	140,24	68,06	2,3048	0,2382	-1,24	128,19	63,84	2,0497	0,2437	-1,12	180,70	81,54
16	2,5965	0,2380	-1,24	126,16	63,11	2,7125	0,2325	-1,38	88,08	48,86	2,4343	0,2400	-1,20	143,51	69,19
17	2,8312	0,2380	-1,24	126,16	63,11	2,7941	0,2482	-1,04	236,51	98,78	2,6042	0,2478	-1,04	231,48	97,28
Dia	Planta 4					Planta 5					Planta 6				
	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>	<i>Transp.</i>	θ	<i>h</i>	<i>K</i>	<i>M</i>
1	3,2706	0,2427	-1,14	169,4442	77,8832	3,2196	0,2359	-1,29	110,5408	57,4424	3,1421	0,2352	-1,31	105,2255	55,4599
2	3,1047	0,2207	-1,75	37,8206	26,7456	3,2351	0,2130	-2,09	20,5838	17,3360	3,1035	0,2132	-2,08	20,8916	17,5204
3	3,0317	0,1992	-2,99	5,9118	7,1250	3,1912	0,1905	-3,90	2,3360	3,6758	3,2401	0,1903	-3,93	2,2923	3,6268
4	2,8333	0,1792	-5,84	0,5753	1,3537	2,5159	0,1727	-7,70	0,2193	0,6806	3,0128	0,1690	-9,17	0,1195	0,4415
5	1,5760	0,1680	-9,60	0,1018	0,3936	1,3746	0,1629	-12,67	0,0388	0,1977	0,8657	0,1628	-12,73	0,0382	0,1954
6	0,1979	0,1666	-10,32	0,0792	0,3291	0,3216	0,1607	-14,52	0,0241	0,1408	0,2615	0,1610	-14,22	0,0260	0,1485
7	0,3604	0,1641	-11,85	0,0489	0,2334	0,3357	0,1583	-16,92	0,0142	0,0962	0,1378	0,1600	-15,11	0,0210	0,1276
8	0,2862	0,1621	-13,32	0,0326	0,1745	0,2136	0,1568	-18,77	0,0099	0,0743	0,2014	0,1586	-16,57	0,0153	0,1014
9	0,2619	0,1602	-14,92	0,0220	0,1316	0,0813	0,1562	-19,56	0,0086	0,0671	0,0877	0,1580	-17,27	0,0132	0,0915
10	0,2191	0,1587	-16,49	0,0155	0,1027	0,0742	0,1557	-20,32	0,0075	0,0610	0,0777	0,1574	-17,93	0,0116	0,0833
11	0,1237	0,1578	-17,49	0,0126	0,0887	0,1027	0,1549	-21,44	0,0062	0,0533	0,1378	0,1565	-19,20	0,0091	0,0703
12	0,1908	0,1564	-19,21	0,0091	0,0702	0,1449	0,1539	-23,19	0,0047	0,0438	0,0989	0,1558	-20,19	0,0077	0,0619
13	0,1484	0,1554	-20,73	0,0070	0,0580	0,1267	0,1530	-24,91	0,0037	0,0366	0,1131	0,1550	-21,42	0,0062	0,0534
14	0,1555	0,1543	-22,52	0,0052	0,0471	0,1237	0,1521	-26,77	0,0029	0,0306	0,0464	0,1546	-21,96	0,0057	0,0502
15	0,1598	0,1532	-24,62	0,0038	0,0377	0,0919	0,1515	-28,29	0,0024	0,0266	0,1378	0,1537	-23,69	0,0044	0,0415
16	0,1183	0,1523	-26,37	0,0030	0,0317	0,0465	0,1512	-29,11	0,0021	0,0247	0,0636	0,1532	-24,55	0,0039	0,0380
17	0,0742	0,1518	-27,56	0,0026	0,0284	0,1201	0,1503	-31,40	0,0016	0,0204	0,0424	0,1529	-25,15	0,0036	0,0357

Tabela 34 - Transpiração relativa (T_R) das plantas cultivadas no solo argiloso (AG) e arenoso (AR), no 1º experimento

Dia	<i>Argiloso</i>			<i>Arenoso</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
1	1,50	1,32	1,41	1,01	1,33	1,14
2	1,44	1,43	1,43	1,12	1,32	1,22
3	1,55	1,41	1,48	1,16	1,29	1,22
4	1,14	1,22	1,18	1,06	1,08	1,07
5	0,51	0,59	0,55	1,41	0,84	1,13
6	0,26	0,23	0,24	0,43	0,49	0,58
7	0,21	0,18	0,19	0,20	0,22	0,21
8	0,15	0,08	0,11	0,12	0,13	0,09
9	0,09	0,06	0,07	0,11	0,10	0,10
10	0,07	0,04	0,05	0,09	0,08	0,08
11	0,06	0,04	0,05	0,08	0,08	0,08
12	0,06	0,05	0,05	0,08	0,04	0,06

Tabela 35 - Transpiração relativa (T_R) das plantas cultivadas no solo argiloso (AG) sem ou com ventilação forçada, no 2º experimento

Dia	<i>sem ventilação</i>			<i>com ventilação</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
1	1,51	1,65	1,62	1,28	1,26	1,23
2	1,41	1,54	1,36	1,17	1,22	1,17
3	1,16	1,31	1,18	1,21	1,27	1,29
4	1,06	1,33	1,21	1,30	1,15	1,38
5	1,05	0,96	1,06	0,73	0,64	0,40
6	1,18	0,75	1,11	0,51	0,82	0,67
7	0,72	0,33	0,78	0,19	0,17	0,07
8	0,29	0,20	0,25	0,14	0,10	0,10
9	0,17	0,12	0,17	0,14	0,04	0,05
10	0,09	0,07	0,09	0,11	0,04	0,04
11	0,11	0,10	0,11	0,05	0,04	0,05
12	0,13	0,09	0,10	0,08	0,06	0,04
13	0,07	0,07	0,09	0,07	0,06	0,05
14	0,11	0,11	0,09	0,08	0,06	0,02
15	0,09	0,09	0,08	0,07	0,04	0,06
16	0,09	0,08	0,08	0,05	0,02	0,02
17	0,07	0,08	0,08	0,03	0,04	0,02

Tabela 36 - Transpiração relativa (T_R) das plantas cultivadas no solo arenoso (AR) sem ou com ventilação forçada, no 2º experimento

Dias	<i>sem ventilação</i>			<i>com ventilação</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
1	1,51	1,65	1,62	1,28	1,26	1,23
2	1,41	1,54	1,36	1,17	1,22	1,17
3	1,16	1,31	1,18	1,21	1,27	1,29
4	1,06	1,33	1,21	1,30	1,15	1,38
5	1,05	0,96	1,06	0,73	0,64	0,40
6	1,18	0,75	1,11	0,51	0,82	0,67
7	0,72	0,33	0,78	0,19	0,17	0,07
8	0,29	0,20	0,25	0,14	0,10	0,10
9	0,17	0,12	0,17	0,14	0,04	0,05
10	0,09	0,07	0,09	0,11	0,04	0,04
11	0,11	0,10	0,11	0,05	0,04	0,05
12	0,13	0,09	0,10	0,08	0,06	0,04
13	0,07	0,07	0,09	0,07	0,06	0,05
14	0,11	0,11	0,09	0,08	0,06	0,02
15	0,09	0,09	0,08	0,07	0,04	0,06
16	0,09	0,08	0,08	0,05	0,02	0,02
17	0,07	0,08	0,08	0,03	0,04	0,02

Tabela 37 - Fotossíntese líquida das plantas sem ou com deficiência hídrica e, sem ou com ventilação forçada, cultivadas nos solos argiloso (AG) e arenoso (AR)

Dia*	Avaliação	Sem ventilação				Com ventilação			
		irrigadas		déficit		irrigadas		déficit	
		AG	AR	AG	AR	AG	AR	AG	AR
	 $\mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$							
1	1	14,20	5,25	15,14	1,12	9,90	7,71	3,47	3,87
3	2	19,90	11,50	13,65	1,59	16,60	15,60	14,40	8,42
5	3	17,90	8,87	12,92	16,60	16,30	3,37	13,89	22,85
7	4	20,30	14,80	25,50	9,47	16,10	20,10	20,60	20,89
9	5	13,40	11,30	9,06	8,82	9,51	14,58	5,76	9,69
11	6	13,40	8,09	9,54	6,02	15,88	11,67	0,50	7,16
13	7	23,35	8,78	5,17	5,09	14,65	11,41	0,36	4,11
14	8	12,10	3,38	4,35	3,80	12,26	14,23	0,12	2,82
15	9	15,10	9,20	2,91	1,22	8,16	12,30	0,26	1,54
16	10	11,45	8,58	0,49	0,60	12,29	9,42	0,02	1,16
17	11	13,60	6,43	0,00	0,38	8,73	14,30	0,00	0,18

*dias transcorridos após o início da aplicação dos tratamentos de deficiência hídrica e ventilação forçada.

Tabela 38 - Valores de M/M_{crit} em função da T_R , dos solos argiloso (AG) e arenoso (AR), no 1º experimento

Dias	<i>Argiloso</i>			<i>Arenoso</i>		
	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 4	Planta 5	Planta 6
1	22,36	23,21	22,78	147,10	64,37	156,78
2	9,90	10,16	10,03	58,10	20,15	55,71
3	3,30	3,68	3,48	18,03	4,74	15,33
4	1	1	1	4,81	1	3,73
5	0,52	0,45	0,49	1	0,34	1
6	0,36	0,32	0,34	0,50	0,14	0,38
7	0,26	0,24	0,25	0,32	0,08	0,23
8	0,20	0,21	0,21	0,24	0,06	0,18
9	0,18	0,19	0,18	0,18	0,04	0,13
10	0,16	0,18	0,17	0,14	0,03	0,10
11	0,14	0,17	0,15	0,11	0,02	0,08
12	0,13	0,15	0,14	0,09	0,02	0,06

Tabela 39 - Valores de M/M_{crit} em função de T_R , do solo argiloso (AG), em plantas sem ou com ventilação forçada, no 2º experimento

Dia	<i>sem ventilação</i>			<i>com ventilação</i>		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 1	Planta 2	Planta 3
1	51,0218	39,7723	65,5052	78,9276	54,7512	85,0706
2	29,4307	19,5773	35,3154	35,9343	23,8846	43,1391
3	15,1263	8,9731	16,5637	15,4390	9,6296	21,0665
4	6,7958	3,7528	7,6314	6,2950	3,5670	9,0345
5	2,7075	1,1636	2,7622	2,2813	1,2113	3,3422
6	2,4114	1	2,3200	2,0075	1	2,6302
7	1	0,6025	1	1	0,6281	1
8	0,6320	0,4830	0,7137	0,7806	0,4670	0,7368
9	0,4676	0,4043	0,5811	0,5858	0,3456	0,5153
10	0,3804	0,3397	0,4578	0,4650	0,2710	0,3996
11	0,3205	0,2929	0,3926	0,3859	0,2215	0,3277
12	0,2769	0,2543	0,3477	0,3213	0,1804	0,2701
13	0,2451	0,2223	0,3068	0,2810	0,1566	0,2334
14	0,2195	0,1970	0,2799	0,2503	0,1357	0,2006
15	0,1972	0,1705	0,2531	0,2198	0,1164	0,1692
16	0,1741	0,1515	0,2287	0,1902	0,0961	0,1420
17	0,1527	0,1330	0,2033	0,1593	0,0805	0,1171

Tabela 40 - Valores de M/M_{crit} em função de T_R , do solo arenoso (AR), em plantas sem ou com ventilação forçada, no 2º experimento

Dia	<i>sem ventilação</i>			<i>com ventilação</i>		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 1	Planta 2	Planta 3
1	121,5871	53,0561	145,2652	57,5357	84,4022	125,6261
2	48,0493	19,2957	59,7740	19,7581	25,4724	39,6867
3	15,4848	5,2247	19,2210	5,2635	5,4010	8,2152
4	4,6171	1	4,8025	1	1	1
5	1,3224	0,2670	1,3105	0,2908	0,2905	0,4426
6	1	0,2180	1	0,2431	0,2069	0,3363
7	0,4929	0,1522	0,4536	0,1724	0,1414	0,2891
8	0,2991	0,1066	0,2877	0,1289	0,1092	0,2298
9	0,2107	0,0831	0,2037	0,0973	0,0986	0,2072
10	0,1750	0,0717	0,1666	0,0758	0,0896	0,1887
11	0,1425	0,0590	0,1323	0,0655	0,0783	0,1592
12	0,1098	0,0492	0,1089	0,0518	0,0643	0,1403
13	0,0950	0,0425	0,0894	0,0429	0,0538	0,1210
14	0,0764	0,0345	0,0750	0,0348	0,0449	0,1137
15	0,0619	0,0279	0,0617	0,0279	0,0391	0,0941
16	0,0485	0,0223	0,0491	0,0235	0,0363	0,0860
17	0,0407	0,0183	0,0393	0,0210	0,0300	0,0809

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](#)