



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Tese de Doutorado

BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO
TOMATEIRO EM AMBIENTE PROTEGIDO

LUCIA SAMPAIO REIS

Biblioteca UFCG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg. 12432/13

Campina Grande
Paraíba

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRICOLA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO
TOMATEIRO EM AMBIENTE PROTEGIDO**

LIGIA SAMPAIO REIS

CAMPINA GRANDE- PARAIBA- BRASIL
DEZEMBRO-2006

LIGIA SAMPAIO REIS

**BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO
TOMATEIRO EM AMBIENTE PROTEGIDO**

OREINTADORES

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO

Prof. Dr. JOSÉ LEONALDO DE SOUZA

**CAMPINA GRANDE- PARAIBA- BRASIL
DEZEMBRO-2006**

**BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO
TOMATEIRO EM AMBIENTE PROTEGIDO**

LIGIA SAMPAIO REIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande, para Obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

CAMPINA GRANDE- PARAIBA- BRASIL
DEZEMBRO-2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



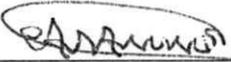
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DA DOUTORANDA

LIGIA SAMPAIO REIS

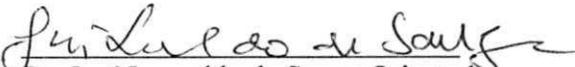
BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO TOMATEIRO EM AMBIENTE
PROTEGIDO

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo-Orientador

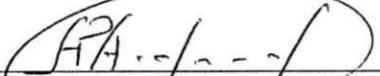
Aprovado


Dr. José Leonaldo de Souza-Orientador

Aprovado


Dr. Hermes Alves de Almeida-Examinador

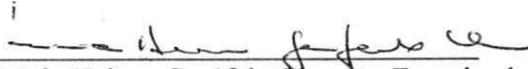
Aprovado


Dr. Albericio Pereira de Andrade-Examinador

APROVADO


Dr. Bernardo Barbosa da Silva-Examinador

Aprovado


Dra. Lúcia Helena Garófalo Chaves - Examinadora

Aprovado

DEZEMBRO - 2006

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de aperfeiçoamento

À Universidade Federal de Alagoas e ao Departamento de Agrometeorologia, pela condição oferecida para execução das análises experimental

Ao Professor Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo pela orientação, apoio, amizade e principalmente, pelo exemplo de integridade moral e conduta profissional.

Ao Professor Dr. José Leonaldo de Souza, pela orientação durante todo o período de elaboração e de execução deste trabalho.

A minha grande amiga irmã, Josivanda pelo exemplo de humildade, carinho e respeito ao próximo, por tudo que aprendi com você.

A minha filha, Livia que me ajudou a superar toda dor; as minhas irmãs, Jessie e Rosangela, e a meus pais, Volney e Daí, por me incentivarem a ir sempre em frente.

Ao Professor Iedo Teodoro, pelo colaboração nos trabalhos de campo.

Aos Professores Abel Washigton, Lailton Soares, e Aloísio Martins, pelo na minha liberação e ajuda na execução do trabalho.

Aos amigos Tânia Marta e Jakes Allan, que mesmo distante sempre me deram força.

A D.Nora, escritora, amiga e mãe, que me acolheu durante quatro anos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, UFCG/PB

Aos colegas e amigos do Laboratório de Irrigação

De modo especial aos amigos José Lins, Sally, Germana, Alexandre, Fred e Gustavo.

Aos alunos de graduação, Manoelito, Cícero, Lula e Ricardo, pela ajuda na condução e coleta dos dados do experimento

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFCG, pela amizade e serviços prestados;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas – FAPEAL, pela concessão da bolsa de estudos;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A minha mãe pela ternura e amor que espalhou no caminho.

Ao meu pai pela razão.

As minhas irmãs pela garra e exemplo de força.

Ofereço

À Lívia minha filha, luz da minha vida dedico.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 – INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 - Cultivo em ambiente protegido	3
2.2 - Exigências Bioclimáticas da cultura do Tomate	4
2.3 - Necessidade de água das culturas	6
2.4 - Estimativa da Evapotranspiração	11
2.5 - Produção de Tomate e uso de Água	13
3 - MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 – Material	15
3.1.1 – Caracterização da área experimental	15
3.1.2 - Caracterização do Ambiente Protegido	15
3.1.3 - Descrição do experimento	21
3.1.4 - Observações na planta	23
3.1.4.1. Altura de plantas	23
3.1.4.2. Diâmetro do caule	23
3.1.4.3. Comprimento e largura das folhas	23
3.1.4.4. Número de folhas	23
3.1.4.5. Início da floração e da frutificação	24
3.1.4.6. Produção	25
3.1.5 - Observações meteorológicas	25
3.2 – Métodos	27
3.2.1 - Balanço de Radiação no ambiente protegido	27
3.3.2. Balanço de Energia	28
3.2.2.1 - Razão de Bowen	29
3.2.2.2 - Método combinado de Penman-Monteith	30
3.2.2.3 - Resistência estomática	32

3.2.2.4 - Resistência aerodinâmica da cultura	32
3.2.3 - Estimativa da Evapotranspiração da cultura	33
3.2.5.1 - Balanço Hídrico	33
3.2.5.2 - Método de Penman-Monteith	34
3.2.4 - Estimativa da Evapotranspiração de referencia	35
3.2.4.1 - Método de Linacre	35
3.2.4.2 - Método de Penman-Monteith	36
3.2.4.3 - Método de Radiação (FAO)	36
3.2.5 - Coeficiente da cultura do tomate	37
3.2.6 - Umidade do solo	37
3.2.7 - Análise de crescimento e desenvolvimento da cultura do tomate	38
3.3.7.1 – Altura de plantas	38
3.3.7.2 - Área foliar	38
3.3.7.3 - Índice de área foliar	39
3.2.8 - Análise Estatística	40
4. – RESULTADOS E DISCUSSAO	42
4.1 - Condições meteorológicas do ambiente protegido e campo	42
4.1.1 – Temperatura	42
4.1.2 - Umidade Relativa	47
4.1.3 - Velocidade do vento	50
4.2 - Balanço de Radiação	51
4.2.1 - Radiação fotossinteticamente ativa	56
4.3. Balanço de Energia	60
4.3.1. Variação diária dos componentes de balanço de Energia	61
4.3.2. Variação horária do saldo de radiação fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível obtidos pelos métodos de Bowen e Penman – Monteith	63
4.3.3. Determinação diária do saldo de radiação fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível obtidos pelos métodos de Bowen e Penman – Monteith	68
4.3.4. Determinação do saldo de radiação fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível obtidos pelos método Bowen em um dia de céu limpo e um dia nublado.	70
4.4. Umidade do solo dentro do ambiente protegido	72

4.5. Evapotranspiração da cultura	75
4.5.1 – Métodos do Balanço hídrico e Penman – Monteith	77
4.6. Evapotranspiração de referência (ET _o): comparação entre os métodos do Radiação, Penman – Monteith e Linacre.	79
4.7. Estádios Fenológico da cultura	83
4.8. Altura de plantas e IAF	84
4.9. Produção	87
4.10. Tratamento e análise dos dados	90
5. CONCLUSÕES	91
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 . Análise Granulométrica, Classificação textural e Massa específica Global do solo da área experimental.	16
Tabela 2 . Média das variáveis microclimáticas; Umidade do ar (%), Temperatura do ar a 2m (°C), Radiação Global, Saldo de radiação (MJ m ⁻²) e velocidade do vento (ms ⁻¹) observado no interior do ambiente protegido durante todo ciclo do tomateiro.	42
Tabela 3 . Partição do balanço de energia, Saldo de Radiação, Fluxo de calor latente, Fluxo de calor sensível e razão entre os fluxos de Saldo de radiação em cultivo protegido durante o ciclo da cultura de tomate.	61
Tabela 4 . Irrigação (I), Drenagem (D) e a Variação no Armazenamento de água no solo (Δh) e Evapotranspiração da cultura (ETc.) do tomate pelos métodos de Penman-Monteith e Lisímetro.	76
Tabela 5 . Coeficiente de cultura nas fases vegetativa, reprodutiva e maturação do tomateiro cultivado em estufa.	82
Tabela 6 . Valores médios de números de frutos por planta, peso de fruto, perímetro maior e perímetro menor e produtividade do tomateiro.	88
Tabela 7 . Classificação dos frutos, peso e valor em porcentagem em relação ao total produzido.	89
Tabela 8 . Indicadores estatísticos para a análise de concordância entre as variáveis Tmed, UR, Vv2med, Rg obtidos em ambiente protegido e no campo.	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 . Fixação do plástico agrícola sobre a estrutura de arcos e madeira para formação do ambiente protegido	17
Figura 2 . Instalação do sombrite nas laterais, iniciando na base de alvenaria até 2m de altura no ambiente protegido	18
Figura 3 . Detalhes da Instalação dos lisímetros e sistema de drenagem	19
Figura 4 . Detalhes da Instalação dos lisímetros e sistema de drenagem.	20
Figura 5 . Fases de preenchimento dos lisímetros: camada de brita areia e o solo retirado da área, seguido de compactação manual.	21
Figura 6 . Visão geral do ambiente protegido com a cultura do tomate.	
Figura 7 . Detalhe do sistema de irrigação por gotejamento no ambiente protegido.	22
Figura 8 . Estação automática para o monitoramento das condições micrometeorológicas, localizado no centro da área.	24
Figura 9 . Detalhe da torre da Estação automática para o monitoramento micrometeorológico.	25
Figura 10 . Razão entre Temperatura média interna (°C) e temperatura média externa diária durante todo o ciclo da cultura do tomate	26
Figura 11 . Relação entre Umidade Relativa encontrada no interior da estufa plástica e no campo durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate	27
Figura 12 . Temperatura média diária (°C), no interior da estufa e no campo	44
Figura 13 . Temperatura mínima diária (°C),no interior e fora da estufa.	44
Figura 14 . Temperatura máxima (°C), no interior da estufa e no campo.	45
Figura 15 . Temperatura média do ar diurna (tdi) e noturna (tni) no interior do ambiente protegido durante todo ciclo	

fenológico do tomate.	46
Figura 16 . Relação entre a temperatura média interna (°C) e temperatura média externa durante todo ciclo da cultura.	47
Figura 17 . Umidade Relativa diária dentro (A) do ambiente protegido e no campo (B).	48
Figura 18 . Relação entre Umidade Relativa encontrada no interior da estufa plástica e no campo, durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate.	49
Figura 19 . Umidade Relativa diurna no interior da estufa plástica e no campo durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate.	50
Figura 20 . Umidade Relativa noturna encontrada no interior da estufa plástica e no campo durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate.	50
Figura 21 . Velocidade do vento diária encontrada no interior da estufa plástica (A) e no campo (B).	51
Figura 22 . Radiação solar global diária no interior da estufa plástica (A) e no campo (B).	52
Figura 23 . Razão entre Radiação solar global no interior da estufa e fora do ambiente protegido.	53
Figura 24 . Saldo de radiação, radiação global interna no período experimental.	54
Figura 25 . Relação entre saldo de radiação e radiação solar global no interior do ambiente protegido.	55
Figura 26 . Radiação solar global e refletida no interior da estufa plástica, durante todo o ciclo da cultura do tomateiro.	56
Figura 27 . Radiação solar global e PAR no interior do ambiente protegido durante todo o ciclo do tomateiro.	57
Figura 28 . Radiação solar global e PAR no interior do ambiente protegido durante todo o ciclo do tomateiro.	57
Figura 29 . Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa diária (PAR) e a Radiação solar global interna.	58
Figura 30 . Relação entre a radiação fotossinteticamente	

ativa diária (PAR) e a Radiação solar global diária externa durante todo o ciclo do tomateiro.	59
Figura 31 . Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa diária (PAR) e o Saldo de radiação solar diária externa durante todo o ciclo do tomateiro.	60
Figura 32 . Variação diária da razão entre o Saldo de Radiação (Rn) e a radiação global (Rg), e entre o saldo de radiação e fluxos de calor latente (LE), sensível (H) no interior da estufa pelo método de Penman-Monteith.	62
Figura 33 . Variação Saldo de Radiação (Rn) diária, e fluxos de calor latente (LE), sensível (H) no interior da estufa na cultura do tomate caqui.	62
Figura 34 . Razão entre saldo de radiação e fluxo de calor latente, calculado pelo método de Penman-Monteith no interior da estufa.	63
Figura 35 . Comportamento do Balanço de energia nos períodos de 162-171 e 172-181 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith.	64
Figura 36 . Componentes do balanço de energia nos períodos de 183-191 e 192 -201 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith.	65
Figura 37 . Componentes do balanço de energia nos períodos de 202-211 e 212-221 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith.	66
Figura 38 . Componentes do balanço de energia nos períodos de 222-232 e 233-242 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith.	67
Figura 39 . Componentes do balanço de energia nos períodos de 243 251 e 252-257 calculado pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith.	68
Figura 40 . Variação diurna da razão fluxos de calor latente (LE), determinados pelos métodos LE*B e LE*PM no interior da estufa na cultura do tomate caqui.	69
Figura 41 . Variação diurna da razão fluxos de calor sensível (H)	

determinado por H^* e H^*B no interior da estufa na cultura do tomate caqui.	70
Figura 42 . Saldo de Radiação, fluxo calor sensível e fluxo de calor latente em dia de céu nublado 32 dias após o transplântio, calculados pelo método Bowen.	71
Figura 43. Saldo de Radiação, fluxo calor sensível e fluxo de calor latente em dia de céu limpo 42 dias após o transplântio, calculados pelo método Bowen.	71
Figura 44 - Umidade do solo com e sem planta no dentro do lisímetro nos dias 180 a 220.	73
Figura 45 . Umidade do solo com e sem planta no dentro do lisímetro durante o dias 220- 230 e 231-240.	74
Figura 46 - Umidade do solo com e sem planta no dentro do lisímetro durante os dias 241-250 e 251-257.	75
Figura 47 . Evapotranspiração da cultura e medida no lisímetro e estimada pelo método Penman-Monteith no interior da estufa.	78
Figura 48 . Correlação entre Evapotranspiração da cultura e medida no lisímetro e estimada pelo método Penman-Monteith no interior da estufa.	79
Figura 49 . E_{To} determinada pelos métodos de Linacre, Radiação (FAO) e Penman- Monteith, em dias de céu limpo.	80
Figura 50 . Razão da Evapotranspiração de referência calculada pelo método Radiação e Linacre.	81
Figura 51 . Razão da Evapotranspiração de referência calculada pelo método Penman-Montheith e Linacre.	81
Figura 52 . Planta do tomateiro na fase vegetativa no inteiro da estufa.	83
Figura 53 . Plantas de tomateiro no período de floração e aparecimento dos primeiros frutos e início da maturação dentro do ambiente protegido.	84
Figura 54 . Altura da cultura do tomateiro dentro do ambiente protegido.	85
Figura 55 . Altura de plantas e Índice de área foliar durante os primeiros dias 70 dias após o transplântio.	85
Figura 56 . Relação área Foliar real e estimada dias após o transplântio,	

na cultura do tomateiro.	86
Figura 57 . Relação entre área foliar e número de folhas durante o ciclo da cultura.	87
Figura 58 . Detalhe do início da colheita de frutos do tomateiro em estufa plástica.	88
Figura 59 . Produção do tomate caqui em ambiente protegido aos 104 dias após o transplântio.	89

LISTA DE SIMBOLOS

ETc	evapotranspiração da cultura. (mm.dia)
ETo	evapotranspiração de referência. (mm.dia)
P	precipitação efetiva. (mm.dia)
I	irrigação. (mm)
D	percolação,(mm)
ΔA	variação do armazenamento da água do solo .(mm)
Z	camada de profundidade de zero. (m)
Rg	radiação global; (MJ.m ⁻²)
Rn	saldo de radiação total diário; (MJ.m ⁻²)
G	fluxo de calor no solo; (MJ.m ⁻²)
LE	fluxo de calor latente; (MJ.m ⁻²)
H	fluxo de calor sensível; (MJ.m ⁻²)
T	temperatura do ar (°C)
Tm	temperatura média do ar
UR	umidade relativa do ar;(%)
e _s	saturação de vapor; (kPa)
R	escoamento superficial; (mm)

UFMG - BIBLIOTECA

R_s	resistência estomática ($s.m^{-1}$)
τ	transmissividade; (%)
r_a	resistência aerodinâmica; ($s.m^{-1}$)
V_v	velocidade do vento ; ($m.s^{-1}$)
AF	área foliar (cm)
C	comprimento de folha (cm)
L	largura de folha (cm)
f	fator de correção
AT	área do terreno ocupada pela cultura. (m)
NP	número de plantas por metro quadrado
DMN	desvio médio normalizado
RMSEs	Raiz quadrada do quadrado médio do erro sistemático
RMSEn	Raiz quadrada do quadrado médio do não sistemático
V_v	velocidade do vento
β	Razão de Bowen

RESUMO

O conhecimento sobre o crescimento das espécies cultivadas permite planejar e manejar de forma racional os cultivos, contribuindo para que as espécies consigam expressar todo seu potencial, além de fornecer dados para a construção de modelos matemáticos capazes de descrever a necessidade de água das culturas, através do conhecimento da evapotranspiração. O objetivo principal deste trabalho foi a caracterização energética e hídrica no desenvolvimento do tomate caqui em ambiente protegido, visando determinação da necessidade de água. Foram feitas as seguintes determinações: fluxos de calor sensível e latente pelos métodos do balanço de energia de Bowen e pelo método de Penman-Monteith; coeficiente da cultura através dos métodos de Linacre, Penman-Monteith e radiação; e evapotranspiração pelos métodos do balanço hídrico e Penman-Monteith. Durante o período experimental, foram tomadas medidas semanais de altura das plantas e comprimento e largura das folhas. Foram ajustados modelos para determinação do índice de área foliar, em função da largura e comprimento das folhas. Comparado ao modelo de Penman-Monteith, o modelo de Linacre subestimou os valores de E_{To} , quando o saldo de radiação (R_n) foi superior a $7,0 \text{ MJ m}^2$; por outro lado, quando R_n ocorreu na faixa de 4 MJ m^2 o método de Linacre superestimou a E_{To} . O saldo de radiação foi consumido em 71% para o fluxo de calor latente no interior do ambiente protegido, e em 15% para o fluxo de calor sensível. Apesar do comportamento dos dois métodos serem os mesmos, os valores encontrados pelo método do balanço hídrico foram maiores que os encontrados pelo método de Penman-Monteith. A relação R_{gi} e R_{ge} permaneceu constante durante o ciclo com transmissividade de 89%, mostrando, portanto, redução de 18%, provocada pela cobertura de polietileno. A R_g apesar de mostrar uma concordância elevada, apresentou um maior erro quando comparada aos outros elementos, mostrando que existem diferenças significativas entre as mediadas obtidas dentro da estufa e as estimadas pelos dados externos. O valor médio de frutos por planta foi de 21,5, com uma produção de $3,04 \text{ kg planta}^{-1}$ e uma produtividade de $7,6 \text{ kg m}^{-2}$, totalizando uma produtividade de 76 t ha^{-1} , valor este maior que a média Nacional. Verificou-se, que o maior consumo de água ocorreu na fase reprodutiva.

ABSTRACT

The knowledge on growth of cultivated species allows to planning and to manage, in a rational way, the cultivations, contributing so that the species get to express all its potential, besides supplying data for construction of mathematical models capable to describe the need of water by crops, through the knowledge of evapotranspiration. The main objective of this work was the energy and hydric characterization in the development of tomato kaki in greenhouse, seeking determination of the need of water. The following determinations were performed: sensitive and latent heat flows by the methods of energy balance of Bowen and by the method of Penman-Monteith; crop coefficient through the methods of Linacre, Penman-Monteith and radiation; and evapotranspiration by the methods of water balance and Penman-Monteith. During the experimental period, weekly measures of plants height and length and width of leaves were taken. Models were adjusted for determination of the foliar area index, in function of the width and length of the leaves. Compared to the model of Penman-Monteith, the model of Linacre underestimated the values of E_{To} , when the radiation balance (R_n) was superior to 7.0 MJ m^{-2} ; on the other hand, when R_n happened in the strip of 4 MJ m^{-2} the method of Linacre overestimated E_{To} . The radiation balance was consumed in 71% by the latent heat flow inside of the greenhouse, and in 15% by the sensitive heat flow. In spite of the behavior of the two methods be the same, the values found by the water balance method were larger than the ones found by the method of Penman-Monteith. The relationship R_{gi} and R_{ge} stayed constant during the cycle with transmissivity of 89%, showing, therefore, reduction of 18%, provoked by the covering of polyethylene. The R_g , in spite of showing a high agreement, presented a larger error when compared to the other elements, showing that significant differences exist among the measures obtained inside of the greenhouse and the ones estimated by the external data. The mean value of fruits per plant was of 21.5, with a production of $3.04 \text{ kg plant}^{-1}$ and a productivity of 7.6 kg m^{-2} , totaling a productivity of 76 t ha^{-1} , which is a value larger than the National mean. It was verified that the largest water consumption happened in the reproductive phase.

1 - INTRODUÇÃO

Em algumas regiões do Brasil, como as Sul e Sudeste, tem crescido o uso de estufa plástica na agricultura com o objetivo de atenuar a densidade de fluxo de radiação solar, possibilitando o cultivo, principalmente de olerícolas, em épocas com alta disponibilidade energética, mostrando ser vantajoso, e possibilitar o aumento da produtividade, melhor qualidade dos produtos, produção fora de épocas convencionais e melhor preço.

Diversos trabalhos têm mostrado que o uso de estufa plástica causa modificação no balanço de energia radiante, propiciando características mais adequadas às espécies de baixo ponto de saturação luminosa. A caracterização dessa atenuação da radiação solar é importante visto que afeta os outros componentes do balanço de energia, como os fluxos de calor sensível e latente, além de todo o processo fotossintético. Souza et al., (1995) mostram que o uso de tela de polietileno provoca redução da radiação fotossinteticamente ativa e na porção do infravermelho próximo, além de alterar a temperatura do ar e do solo. O excesso de radiação solar pode causar prejuízo direto à planta, afetando a assimilação de CO₂ através da fotossíntese, devido a um processo conhecido como fotoinibição. Pezzopane et al., (2004) fizeram uma ampla revisão dos problemas causados pelo excesso de energia para as plantas.

A FAO estima que a evapotranspiração é reduzida em 30% nos cultivos protegidos e que o uso da água por unidade de produção pode ser diminuído em até 30%. Em cultivos em estufas, é possível controlar não apenas o suprimento de água mas, também, o consumo da cultura, através de sistema de controle ambiental, principalmente a temperatura, a umidade relativa do ar e a radiação solar global

(Folegatti et al.,1997). O controle eficiente exige que se obtenha informações do microclima, do ambiente e da planta, para que se proporcione a melhor condição para que a planta manifeste seu máximo potencial genético.

A baixa produtividade do tomateiro levou os agricultores a procurar novas tecnologias em busca de se obter frutos em maior quantidade e de melhor qualidade além de redução do custo de produção a afim de abastecer o mercado consumidor crescente, entre elas estão o cultivo em estufa plástica e o uso de irrigação por gotejamento.

Considerando-se a influência da cobertura plástica nos elementos meteorológicos, conhecer a amplitude das variações em ambiente protegido torna-se importante para o entendimento das necessidades hídricas da cultura do tomate. Neste contexto, realizou-se a caracterização energética e hídrica do desenvolvimento do tomate caqui, cujos objetivos específicos, foram: (i) Analisar os componentes da radiação em cultivo de tomate sob condições de ambiente protegido; (ii) Determinar e comparar os valores de fluxo de calor sensível e latente, pelos métodos de Balanço de energia Bowen e pelo método de Penman-Monteith; (iii) Determinar e comparar o coeficiente da cultura através dos métodos de Linacre, Penman-Monteith e Radiação; (iv) Determinar o balanço hídrico na cultura; (v) analisar e comparar a evapotranspiração do tomate caqui, utilizando-se os métodos de balanço hídrico e Penman-Monteith, e (vi) Determinar e comparar a evapotranspiração de referência, através dos métodos de Radiação, Linacre e Penman-Monteith.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultivo em ambiente protegido

O cultivo do tomate e de outras olerícolas em ambiente protegido é muito comum e vem atraindo importantes estudos na área de irrigação localizada e seu manejo. Em regiões secas da Jordânia o ambiente protegido está sendo utilizado com uma ampla aceitação pelos produtores (Amayreh & Al-Abed, 2005). No Brasil, o tomate é uma das olerícolas mais difundidas nos mais diversificados tipos de solo, sistemas de produção e climas, permitindo uma série de vantagens: aumento da produtividade, melhoria na qualidade dos produtos, precocidade, controle mais eficiente de pragas e doenças e proteção contra intempéries climáticas (Oliveira et al., 1989; Cunha et al., 2001).

Em ambiente protegido ocorre um aumento na temperatura interna, mesmo durante a noite, provocado pela refração da luz solar sobre o filme de cobertura, transformando as ondas curtas em ondas longas, retendo-as em seu interior e alterando o balanço de energia em relação ao ambiente externo (Braga & Klar, 2000; Atrassi, 2004); deste modo, segundo Braga & Klar (2000) variáveis climáticas, como a evaporação (Eo) e a evapotranspiração (ETo), também apresentam comportamentos diferenciados que necessitam ser quantificados para um manejo mais adequado da irrigação.

Alguns trabalhos realizados no Rio Grande do Sul mostram a modificação na temperatura do ar promovida pelas estufas plásticas. Farias et al., (1993b) demonstraram que o maior efeito da estufa ocorre sobre a temperatura máxima diária, enquanto o efeito sobre a temperatura mínima diária do ar, no entanto, ainda é conflitante. Farias et al., (1993b) obtiveram valores médios de temperatura mínima semelhantes no interior e fora da

estufa. Por outro lado, Buriol et al., (1993) relataram diferenças de até 6,4°C entre a temperatura mínima interior e exterior da estufa, em Santa Maria.

Esses trabalhos mostraram, também, que há dias em que a temperatura mínima do ar dentro da estufa, é menor que fora, fenômeno denominado "inversão térmica", mas em condições atmosféricas distintas. A temperatura do ar no interior das estufas difere da externa e depende da densidade de fluxo de radiação solar incidente no seu interior e do seu manejo.

A medição de componentes da radiação solar em ambientes protegidos sofre alteração de diversos fatores, em que o principal é o sombreamento do sensor do radiômetro através das estruturas de sustentação da casa de vegetação. O filme de polietileno de baixa densidade permite a passagem de, em média, 59 a 90% da radiação solar (Souza, 1996; Frisina & Escobedo, 1999; Cunha et al., 2001). O balanço de radiação representa a contabilidade dos fluxos radiativos à superfícies e o seu conhecimento é fundamental para melhor planejamento das atividades agrícolas. O fluxo de R_n é a principal variável de entrada no modelo de Penman-Monteith e pode representar entre 50 e 60% da evapotranspiração de referência (ET_o) em climas úmidos e subúmidos (Jensen et al., 1990). Para se obtêrem estimativas corretas de evapotranspiração é imprescindível se ter o saldo de radiação medido ou estimado, de forma correta e precisa.

2.2. Exigências bioclimáticas da cultura do tomate

O tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) é originário da América do Sul e Central, tendo-se adaptado a climas frios e aos trópicos. Segundo a FAO (2002), a produção hortícola se concentra nas áreas quentes e bastante secas: aproximadamente 34% da produção mundial vêm dos países ao redor do mar mediterrâneo e em torno de 14% da Califórnia e do México. A cultura é exigente em luz para que se desenvolva e produza de maneira conveniente, mas, por outro lado, é considerado indiferente ao fotoperíodo.

A temperatura é fator limitante para o cultivo do tomateiro em estufa sendo que, a máxima permitida é 30°C e a mínima, 12°C. A planta exige, também, uma termoperiodicidade ao redor de 6°C para que ocorra um desenvolvimento vegetativo

moderado e desejado (Pereira et al., 2000). A planta pode tolerar até 38°C; entretanto, os frutos são intensamente afetados por esta temperatura, diminuindo seu tamanho e a qualidade, tendo-se observado que o mesmo ocorre em temperaturas abaixo de 10° C.

Outra condição meteorológica climática que influencia o ciclo produtivo do tomateiro é a radiação solar. A radiação solar é o elemento ambiental que mais contribui para as flutuações de florescimento e formação de frutos. O valor limite de radiação solar estabelecido pela FAO e que permite, à planta, seu pleno desenvolvimento, é de 8,4 MJ.m⁻². No Sul do Brasil, Andriolo et al., (1997), trabalhando com tomateiro no inverno, confirmaram perda de matéria seca quando a radiação atingiu valores menores que esse limite. Radin (2002) verificou que tomateiro cultivado em estufas plásticas, onde ocorreu uma redução de aproximadamente 30% da radiação fotossinteticamente ativa, apresentou aumento na eficiência de utilização da radiação em aproximadamente 33% na época de primavera-verão e 43% na época de verão-outono.

O Balanço de Energia está intimamente relacionado com o balanço hídrico, visto que os processos que envolvem o balanço hídrico requerem energia e, também, pelo fato de que as propriedades térmicas do solo dependem do conteúdo de água do solo (Lima, 2004). Segundo Fontana et al., (1991) o balanço de energia das superfícies vegetadas permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-água, através do estudo da partição do saldo de radiação nos diversos estágios de crescimento que ocorrem na cultura. O fluxo do saldo de radiação (Rn) disponível é a força principal, que determina as perdas de água de uma cobertura vegetal quando a água no solo não é limitante. (Ortega-Farias et al., 2004).

A altura das plantas de tomateiro cultivadas no ambiente de menor disponibilidade de radiação solar foi maior que nas cultivadas fora da estufa. Este resultado foi observado nas duas épocas e inclusive, as plantas apresentaram tendência de maior altura na segunda época devido, possivelmente, à menor disponibilidade de radiação em relação à primeira (Reisser Junior et al., 2003).

O sombreamento promove o aumento do uso da radiação pelo tomateiro (Radin 2003). Como a fração de área foliar sombreada apresenta uma elevação com o decorrer do ciclo da cultura aumenta, também, a eficiência de uso da radiação, o que se deve ao fato de uma maior contribuição das folhas sombreadas para o acúmulo de

biomassa da cultura à medida que aumenta a fração da radiação difusa, propiciando maior uniformidade da radiação dentro do dossel.

A radiação tem efeito maior na fase de maturação da cultura que na fase vegetativa; Joilet & Bailey (1992) encontraram que um aumento na radiação solar de $1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ provocava aumento na transpiração de $0,408\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ da cultura do tomateiro cultivado em ambiente protegido. No sul da França, Boulard & Wang (2000) encontraram que a contribuição advectícia representa 43% do total de transpiração, mostrando a importância da radiação e o déficit de saturação do ambiente.

Os altos níveis de umidade e baixos níveis de luz provocam diminuição na transpiração da cultura do tomate cultivado em estufa e promovem perdas na produtividade. A umidade relativa do ar pode afetar a evapotranspiração pelas interações com a fotossíntese e produção de matéria seca, afetando o desenvolvimento do índice de área foliar ou por mudança na condutância. Joilet & Bailey (1992). Segundo Duarte et al., (2004) quanto menor a umidade relativa do ar, maior a transpiração dos vegetais, acelerando o movimento da água através do sistema solo-água- planta. As raízes dos vegetais retiram água e sais minerais do solo e devolvem essa água na forma de vapor para a atmosfera; quando a umidade relativa do ar estiver muito alta, deve-se proceder à ventilação do ambiente, provocando troca do ar.

O efeito da estufa sobre a temperatura do ar está relacionado com o balanço de energia (Martinez Garcia, 1978) dependendo, portanto do tipo de cobertura, do ângulo de incidência da radiação solar, do tipo de solo e, sobretudo, do tamanho e do volume da estufa. Farias et al., (1993) verificaram que o maior efeito da cobertura plástica ocorreu sobre as temperaturas máximas com valores variando $1,2^{\circ}\text{C}$ a $4,4^{\circ}\text{C}$ acima das observadas externamente.

2.3. Necessidade de água das culturas

A necessidade de fornecimento adequado de água para bom crescimento e desenvolvimento dos vegetais, decorre das múltiplas funções que ela desempenha na fisiologia das plantas, pois praticamente todos os processos metabólicos são influenciados pelo conteúdo

de água (Benicasa, 1984). A água na planta tem função como constituinte, como via de transporte, como reagente e na turgescência celular.

A quase totalidade das perdas de água pelas plantas se dá na forma gasosa, pelo processo de transpiração. Segundo Joilet & Bailey (1992) no ambiente protegido os altos níveis de umidade relativa e diminuem a radiação diminuindo também a transpiração e ainda provoca perdas na produção. Esses efeitos adversos podem ser controlados com o manejo adequado dos elementos climáticos dentro do ambiente protegido. Para a definição das técnicas apropriadas é necessário conhecer a relação da transpiração com a radiação solar, umidade relativa, movimento do ar temperatura e a concentração CO₂ que são capazes de determinar esta transpiração.

Várias correlações entre transpiração e os parâmetros climáticos têm sido determinados experimentalmente, Joillete & Bailey (1992); Dalsasso et al., (1997); Valandro et al., (1999), avaliaram a transpiração do tomateiro quando ficou evidente a dificuldade de se determinar um modelo para estimativa do consumo d'água pelas plantas no cultivo outono – inverno, em Santa Maria; esta dificuldade advém do fato de que existem entradas de frentes frias.

Na condição de Santa Maria, Righi et al., (2002) constataram que no período de outono-inverno o déficit de saturação de vapor d'água no interior é a variável meteorológica com melhor correlação, indicando boa potencialidade de uso na determinação da transpiração pelo tomateiro nessas condições. Segundo Boulard et al., (1991) nas condições de clima quente no Mediterrâneo a transpiração do tomateiro é dependente da advecção, que representa 43% do total da transpiração.

Estudos demonstram que a produção de uma cultura é diretamente proporcional à sua taxa de transpiração. Como fator importante no balanço de energia, a transpiração representa uma medida significativa do rendimento da cultura. Para realizar o processo de transpiração as plantas transportam a água do solo e a lançam na atmosfera, em cujo processo a água é utilizada como meio de transporte de sais minerais da solução do solo para o tecido da planta, onde é utilizada na fotossíntese. Os carboidratos são translocados, em solução e armazenados em diversos órgãos, tais como: sementes, raízes ou tubérculos Silva (1996).

A utilização de técnicas de aplicação e manejo da água torna-se indispensável quando o objetivo é o incremento da produção e melhor rentabilidade econômica para o

produtor; e isto se torna mais importante quando o suprimento de água às plantas não é completamente atendido pela precipitação, como ocorre no semi-árido. Com o estudo da resposta da cultura a diferentes níveis de umidade, é possível estabelecer o manejo adequado da irrigação, mesmo sob condições de limitada disponibilidade de água, ou seja, quantificar a produção a ser alcançada considerando-se algumas limitações de insumos necessários à produção (Lima et al., 1999; Tormena et al., 1999).

Para um crescimento ativo da cultura, a quantidade de água aplicada e os intervalos de irrigação são fatores de grande importância, sendo que somente um bom número de experimentos poderá fornecer uma estimativa melhor dos valores a serem adotados para esses fatores. Em busca da produtividade máxima é que se procura manter o solo em condições de umidade que permitem a taxa ideal de absorção de água do solo pelas plantas. Logo após uma irrigação ou chuva, a taxa de evapotranspiração (ET) atende à demanda evaporativa do ar. Com o esgotamento da água do solo, a taxa de evapotranspiração tende a diminuir, sendo esta tendência dependente da cultura, da magnitude da demanda evaporativa do ar e da capacidade de retenção de água pelo solo.

O padrão de uso da água por uma cultura é diretamente relacionado ao desenvolvimento de “stress” nas plantas. A evapotranspiração interage com o teor de umidade do solo e este, segundo Klar (1984) perdendo água, pode atingir condições hídricas que inabilitam a planta de continuar seu ciclo de crescimento de modo satisfatório, em virtude de atingir condições de tensão de água inadequadas; assim, os estudos de evapotranspiração são de real importância nas relações da planta com o solo e a atmosfera.

Para se estudar o ciclo da água em uma cultura de modo geral é necessário considerar-se o balanço hídrico, o qual nada mais é que o somatório das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume de solo e, em dado intervalo de tempo, o resultado é a quantidade líquida de água que nele permanece (Reichardt, 1996) é realmente a própria lei da conservação das massas e está intimamente ligado ao balanço de energia, haja vista que os processos envolvidos requerem energia (Rana & Katerji, 2000); entretanto do ponto vista agrônomo o balanço hídrico consiste em avaliar o fluxo de água na zona radicular durante certo período, tornando-se fundamental para se definir em que condições hídricas se desenvolveram as culturas.

Geralmente a evapotranspiração da cultura (ETc) é determinada a partir de medidas diretas baseadas no balanço hídrico, em volume de solo conhecido. Os lisímetros têm sido utilizados por mais de um século para estudos das relações água-solo-planta. Inicialmente, os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água percolada no solo, em estudos hidrológicos. Thornthwaite (1946) foi o primeiro pesquisador a usar esse equipamento para medidas das condições de evapotranspiração no campo. A característica principal de um lisímetro é a intenção de imitar a realidade (Poss et al., 2004); contudo, o controle preciso de todas as variáveis importantes é tarefa difícil e cara, mas, segundo Silva (1996), a precisão desses sistemas vai depender da manutenção e da semelhança das condições do ambiente, fora e dentro do lisímetro, para que seja possível monitorar as irrigações, os volumes de água de drenagem, a qualidade da água, a umidade do solo, o armazenamento de água, a evapotranspiração e o coeficiente da cultura. Liu et al., (2002), trabalhando com lisímetro e micros lisímetros concluíram que o uso do lisímetro combinado com a equação de Penman, é suficiente para determinar o coeficiente da cultura e a necessidade de água da cultura.

Por outro lado, Miranda et al., (1999) trabalhando com a cultura da melancia, na determinação da evapotranspiração de referência e da cultura, encontraram valores subestimados para a evapotranspiração devido, segundo o autor, ao pouco tempo de instalação do lisímetro e à alteração na estrutura do solo, resultados que foram confirmados por Montenegro et al., (2002), em Paraipaba, CE, onde encontraram valores de evapotranspiração de referência na cultura do mamoeiro, inferiores àqueles estimados pelo método de Penman–Monteith.

Diversos pesquisadores realizaram estudos com balanço hídrico no solo para determinação da evapotranspiração e coeficiente da cultura, visando ao manejo de água para as culturas (Dalsasso et al., 1997; Silva et al., 2001; Junqueira et al., 2004), entretanto, o uso desses coeficientes é exclusivo para as regiões estudadas, em que cada componente é determinado através de técnicas diferentes (Moura et al., 1994) e, apesar das inúmeras dificuldades e erros experimentais envolvidos na estimativa de componente do balanço hídrico, constitui importante forma de ajudar em um manejo da cultura, em razão de permitir medições “in situ”, dos vários processos que envolvem a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera.

Por outro lado, Timm (2002) discute a variabilidade espacial das propriedades físicas que, apesar de serem significativas no processo, as suas implicações não são discutidas em nenhum cálculo do balanço hídrico. A drenagem é o termo mais difícil de se avaliar no balanço hídrico, e para Antonino et al., (2000), ela pode ser desprezada em regiões muito secas; há ainda um problema: o da variabilidade espacial dos componentes do balanço hídrico (armazenamento da água no solo, condutividade hidráulica, gradientes de potencial total).

Vilagra et al., (1995) ressaltam que a variabilidade desses parâmetros conferiu um coeficiente de variação da ordem de 40% nas estimativas da evapotranspiração, tendo concluído que em extensas áreas a melhor escolha para o cálculo da evapotranspiração seria por métodos aerodinâmicos ou empíricos. Apesar disso, o balanço hídrico vem sendo utilizado com muito sucesso por diversos autores, na estimativa da evapotranspiração de algumas culturas, quando comparada com método micrometeorológico, como a razão de Bowen (Azevedo et al., 2003; Lima 2004).

Nas condições de Santa Maria, RS, Dalsasso et al., (1997), utilizando o balanço hídrico no solo para o tomateiro em estufa plástica, concluíram que o consumo de água foi de 247 mm e de 189 mm para o cultivo de primavera e o de outono, respectivamente. Para Silva et al., (2001) o balanço hídrico permitiu determinar a quantidade de água drenada, que foi de 178,3mm e ainda a quantificar a ascensão capilar, que atingiu um volume de apenas 2,7 mm, sendo a média semanal da irrigação de 54,5 mm, totalizando no período, 1144,5 mm na cultura de manga, em Petrolina. Essas informações são necessárias para o planejamento de drenos no projeto de irrigação para a cultura e ainda para o desenvolvimento de técnicas que não desequilibrem o ambiente. O balanço hídrico, associado ao mulching (Amayreh & Al-Abed, 2005) apresenta maior precisão para determinação da evapotranspiração da cultura, porém o método não deve ser considerado para períodos inferiores a uma semana (Silva et al., 2001), pois comprometeria, assim, sua confiabilidade.

2.4.1 Estimativa da evapotranspiração

A evapotranspiração da cultura é um processo de perda de água para a atmosfera através da evaporação da superfície do solo somada à transpiração pela planta (Ortega-Farias et al., 2000). O conhecimento da evapotranspiração ou do fluxo convectivo de calor latente, segundo Cunha et al., (2002), contribui para uma utilização mais racional da água em uma determinada cultura em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico.

A evapotranspiração da cultura pode ser medida através de lisímetro e estimada por diversos métodos, tais como: Penman-Monteith, o da Razão de Bowen, Balanço de energia, Fluxos turbulentos, dentre outros, entretanto o uso de método de razão de Bowen e fluxo turbulentos é de alto custo e requerem sensores sofisticados, sendo de difícil manutenção. Perez et al., (1999) tem discutido amplamente os problemas apresentados pelo método de Razão de Bowen, pois é de conhecimento, entre os pesquisadores, que os dados de evapotranspiração obtidos sob condições de adveccção devem ser desprezados. Outro problema muito comum que, segundo Teodoro (2004), ocorre em regiões muito úmidas, se refere aos gradientes de temperatura e pressão, que são muito baixos.

O método do balanço de energia se destaca na estimativa de evapotranspiração de uma superfície, o qual mede a energia disponível em uma comunidade vegetal e separa as frações usadas nos diferentes processos; o conhecimento da evapotranspiração ou do fluxo convectivo de calor latente contribui para a utilização mais racional da água em determinada cultura (Pezopanne et al., 2003); entretanto o melhor método para estimar a necessidade hídrica da cultura é, segundo alguns autores (Alves Sobrinho et al., 1996; Tyagi, et al., 2000; Kashyap & Panda, 2001), o de Penman-Monteith e, deste modo, determinar os coeficientes de cultura (K_c), em diferentes condições edafoclimáticas; para isto, o modelo de Penman-Monteith requer medições simultâneas de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar; estas variáveis podem ser obtidas através do uso de estações meteorológicas automáticas que não são caras, e mais fácil de manter, quando comparadas com outros métodos, servindo, portanto, para ser utilizado satisfatoriamente na determinação da ET_c , além de recomendado para calibrar outros métodos, entretanto segundo Radin, (1998) a equação subestima a evapotranspiração

quando a cultura apresenta um IAF pequeno, e o superestima quando a velocidade do vento é superior a $2\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

É difícil separar a ação de cada um dos elementos meteorológicos na evapotranspiração, visto que eles agem simultaneamente. De maneira geral, em uma região, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar, velocidade do vento e menor a umidade relativa, maior também deverá ser a taxa de evaporação e evapotranspiração (Villa Nova et al., 2002).

O requerimento de água apresenta uma ampla variação de cultura para cultura, de acordo com o estágio fenológico em que cada uma se encontra. Sendo a evapotranspiração o mais importante parâmetro para determinação das necessidades de água da cultura, é necessário que se tenha um método bastante preciso para estimativa deste parâmetro (Kashyap & Panda, 2001); portanto, o estudo da evapotranspiração e a estimativa dos coeficientes de cultura são de fundamental importância (Montenegro, et al., 2004) para o manejo adequado de projetos de irrigação, contribuindo para o aumento da produtividade e otimização do uso da energia elétrica e dos recursos hídricos, cada vez mais escassos. O coeficiente de cultura serve como fator de agregação das diferenças físicas e fisiológicas entre as culturas (Allen et al., 1998).

Modelos de estimativa da evapotranspiração foram desenvolvidos para as culturas em ambiente protegido por Righi et al., (2002) e Lee & Shin, (1998); esses modelos são baseados em dois grupos principais de variáveis, nas meteorológicas (radiação solar global, déficit de pressão de vapor) e nas específicas das culturas (resistência do dossel da cultura, índice de área foliar) possibilitando uma avaliação mais precisa do requerimento de água pelas culturas.

Correlações entre a evapotranspiração e os elementos meteorológicos têm sido determinadas experimentalmente, para condições de ambiente protegido (Folegatti et al., 1997; Viana et al., 2003) encontraram alta correlação entre a evapotranspiração e a radiação solar, dentro da estufa.

Para se obter coeficientes de cultura (K_c) nas diferentes fases fenológicas, é oportuna a utilização de valores diários da evapotranspiração de referência (E_{To}), medidos diretamente pelo lisímetro e estimados pelo método de Penman-Monteith FAO, os valores

da evapotranspiração da cultura obtidos no balanço hídrico e outros métodos, como o lisímetro Penman-Monteith e balanço de energia. .

2.5. Produção de tomate e uso da água

Um dos aspectos primordiais no desenvolvimento de culturas hortícolas é a irrigação, sem a qual a grande maioria não se pode desenvolver, porém, o uso da água deve ser feito de maneira racional e equilibrada, para evitar desperdícios. Deve-se fazer a aplicação da irrigação na cultura do tomate de maneira cuidadosa, já que tanto a escassez como o excesso de água influem na qualidade e na produção dos frutos. Foram encontradas correlações estreitas (Meza & Leos, 2000) entre stress hídrico, rachadura nos frutos, sendo o excesso de água associado aos problemas fitossanitários e, portanto, aos baixos rendimentos.

O tomateiro apresenta três períodos críticos de necessidade hídrica: na emergência das plantas, na floração e na metade do estágio de maturação dos frutos.; esses períodos exigem maior quantidade de água e, conseqüentemente, maior número de irrigações. O excesso de água (Meza & Leos, 2000) provoca também um número maior de brotações e diminui a produtividade. A água deve estar disponível no solo para atender à demanda hídrica, às perdas por evaporação do solo e por transpiração dos cultivos, embora seja bastante difícil manter este conteúdo no nível ótimo de umidade, durante todo o ciclo da cultura. É interessante saber que as necessidades de água da cultura e sua utilização dependem de fatores climáticos, botânicos e edáficos.

O consumo de água para a cultura do tomateiro em campo (Dorenbos & Kassam, 1979), oscila de 400 mm para climas úmidos e de 600 mm para regiões mais secas. O valor encontrado para o cultivo dentro de ambiente protegido se tem apresentado bem inferior ao cultivo de campo; Dalsasso et al., (1997) encontraram valores de consumo de água para a cultura do tomateiro, de 247 mm e de 187 mm para cultivos de primavera e de outono, respectivamente, com um consumo médio diário de 1,29 mm. Segundo Meza &

Leos (2000) a aplicação da água na cultura do tomate deve ser cuidadosa, pois tanto o excesso como o déficit hídrico provocam diminuição e na produção e qualidade dos frutos.

O tomateiro suporta moderado grau de stress hídrico; Hatz & Hanson (2005) monitorando o tomateiro encontraram uma faixa ideal de depleção de água no solo em torno de 30% da capacidade de campo e, segundo os autores, esta depleção não afeta a produção. Por outro lado Valandro et al., (2004) mostraram que a relação entre o conteúdo de água, estado hídrico e o potencial hídrico do tomateiro diminuíram quando submetidos a deficiência hídrica, e a resistência estomática, aumentou proporcionalmente, a intensidade e a duração da restrição hídrica.

Mancine & Calandro (1989) mediram a evapotranspiração máxima do tomateiro em lisímetro instalados no interior da estufa e obtiveram valores que variaram 132 a 272 mm ao longo do ciclo conforme o ano. Ortega-Farías et al., (2001) uma aplicação correta de água, baseada no cálculo da evapotranspiração nos diferentes períodos fenológicos do tomate, permitiu melhorar a qualidade, reduzir desordens fisiológicas e diminuir a incidência de doenças. Conforme Amayreh & Al-Abed (2005) o valor médio encontrado para a cultura de tomate em ambiente protegido, foi um $K_c = 0,65$.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Nesta secção apresenta-se a área onde foi desenvolvido este trabalho, a construção do ambiente protegido e instalação dos lisímetros, como também às medições feitas no ambiente e na planta.

3.1.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento foi realizado no Campus Delza Gitáí, no Centro de Ciências Agrárias no Município de Rio Largo (09°28' S, 35°49' W 127m de altitude), o qual está localizado em áreas de tabuleiros costeiros, pertencentes ao Grupo Barreiras; possui clima quente úmido (B1). com deficiência de água moderadamente no verão (s), e grande excesso de água no inverno(w), segundo a classificação de Thorntwaite-Mather; a precipitação pluvial média anual varia 1500 a 2000 (Souza & Lima, 1995), e média mensal entre 41 a 262 mm (Toledo, 2001). Quanto à disponibilidade térmica, apresenta temperaturas médias de 25,4 °C (Souza et al., 2005) e se torna uma faixa ideal para o cultivo da cultura, não limitando isoladamente o seu desenvolvimento. A umidade relativa média do ar é de 85%. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Amarelo Coeso Argissólico, com textura média argilosa, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Embrapa (1999), com relevo plano. As principais características físicas do solo da são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise granulométrica, Classificação Textural e Massa específica do solo dentro da área experimental

Horizonte	prof.	Composição Granulométrica					Relação		Densidade	
		AG	AF	SIL	ARG	ADA	GGF	SIL/ARG	dp	ds g.cm ⁻³
Bruno escuro	0-11	51	10	7	32	13	59	0,32	2,60	1,37
Bruno aciz. escuro	11-22	47	17	5	31	0	100	0,16	2,66	1,46
Bruno	22-47	43	14	6	37	0	100	0,16	2,71	1,60
Amarelo brunado	47-82	32	12	2	54	21	61	0,04	2,60	1,58
Amarelo brunado	82-153	33	13	1	53	33	38	0,02	2,60	1,50
Amarelo brunado	153-200	22	10	15	53	14	74	0,28	2,60	1,40

AG= areia grossa; AF areia fina; SIL =silte; ARG=argila;ADA= argila dispersa em água;GF grau de Floculação; DP=densidade de partículas; DS=densidade do solo. Fonte LABAF-CECA-UFAL

3.1.2. Caracterização do Ambiente Protegido

O ambiente protegido foi construído com 6,5 m de largura por 17,5 m de comprimento, perfazendo uma área de 113,75 m² e laterais a 2,2 m acima do nível do solo e arco central de 4 m. O polietileno usado foi o de 120 µm de espessura na cobertura e as

laterais de “sombrite”, a 50%. Para sustentação das laterais, foram colocadas 11 estacas de madeira, com espaçamento de 1,6m. Uma pequena base de alvenaria foi construída para proteger todo o ambiente (Figura 1); Nas estacas se fixaram os canos galvanizados, que foram previamente envergados, formando um arco; só então foram presos com parafusos na madeira. Para colocação do sombrite (Figura 2) algumas ripas foram postas ao redor de todo o ambiente protegido em dois pontos: a 0,30m do solo e a 2m; para fixação do plástico agrícola foi necessária a instalação de vergalhões que tinham a função de evitar a formação de “bolsas” na cobertura plástica; enfim, a cobertura plástica foi colocada sobre os mesmos e fixada nas laterais, com prego.

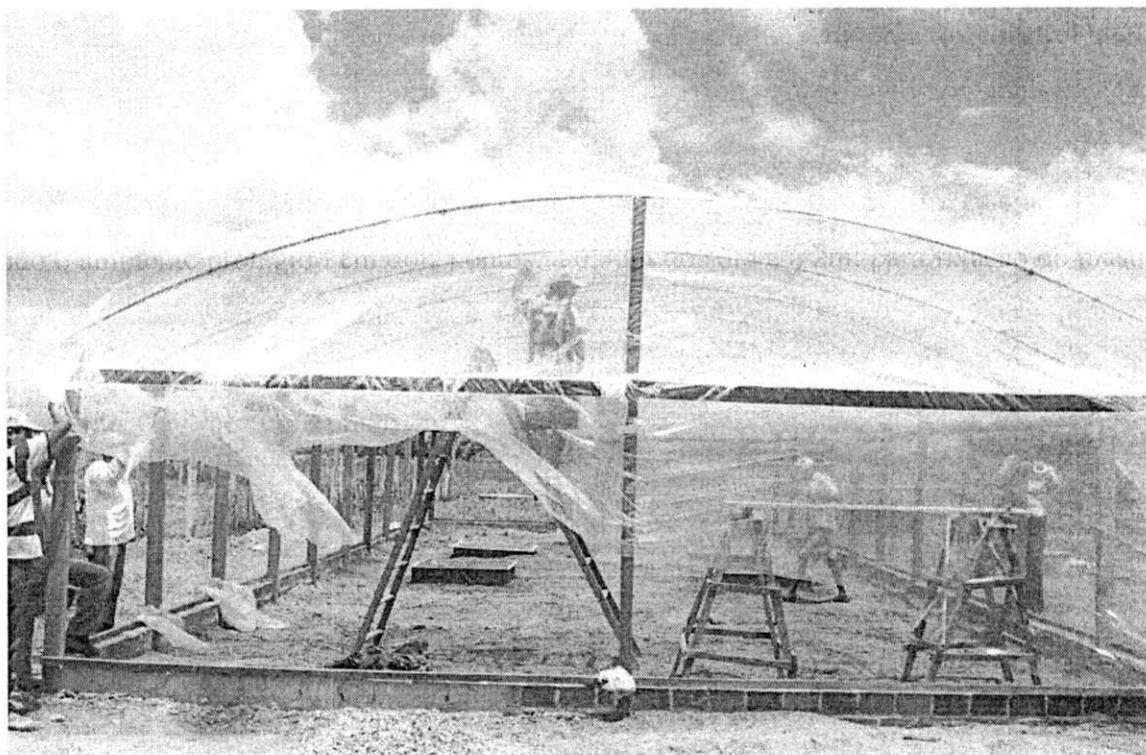


Figura 1. Visão geral da construção do ambiente protegido.

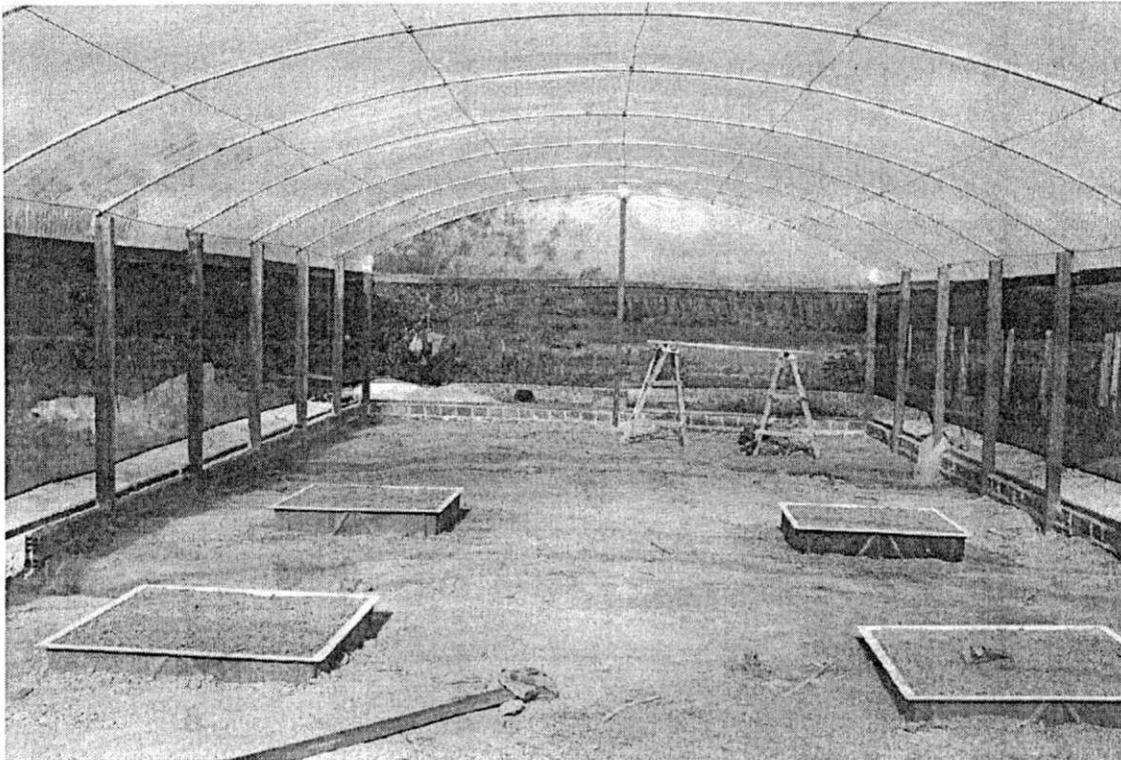


Figura 2 . Detalhes do sombrite nas laterais e lisímetros no ambiente protegido

Os lisímetros foram confeccionados com fibra de vidro, com 1,0 m de largura e 1,0m de comprimento, profundidade de 0,7 cm e 0,6 cm na outra extremidade (formando um declive entre as extremidades, que permitia o escoamento da água.)

A instalação do lisímetro demandou um tempo muito grande devido às suas particularidades; começou-se com a escavação do solo, manualmente, até se atingir a profundidade de 1m; as camadas de solo foram retiradas e separadas em lonas plásticas, identificadas e armazenadas no próprio local (Figura 3); instalaram-se após a separação do solo os lisímetros nas valas e então se conectaram os canos para drenagem; o próximo passo foi o preenchimento das laterais para que os mesmos ficassem bem fixados no solo .

A tubulação conectada aos lisímetros conduziu a água drenada até recipientes graduados que estavam localizados abaixo do nível dos lisímetros, fora do ambiente protegido, com acesso por uma escada aberta no solo, conforme Figura 3.

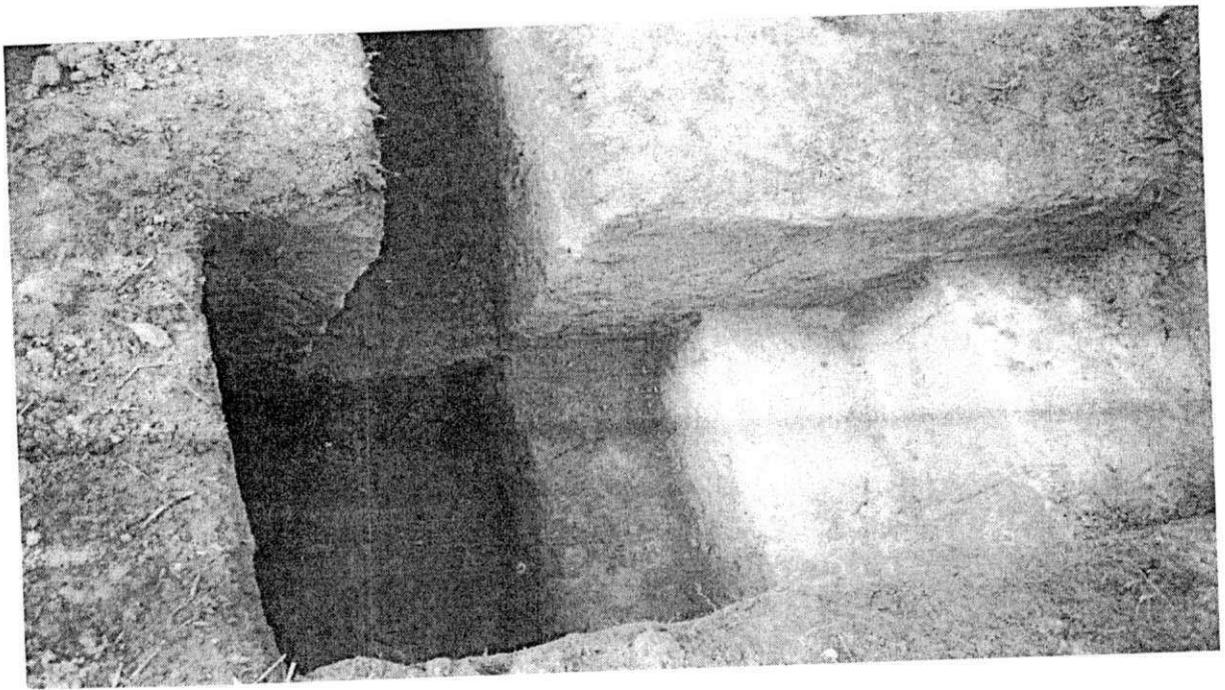


Figura 3 - Detalhes da construção do sistema de drenagem dos lisímetros

Adicionou-se no fundo de cada lisímetro, uma camada 10 cm de brita nº 1, com a finalidade de promover a drenagem de água; sobre esta camada de brita se colocou areia, que, a partir daí, foi adicionada às camadas de solo, na ordem inversa da sua retirada.

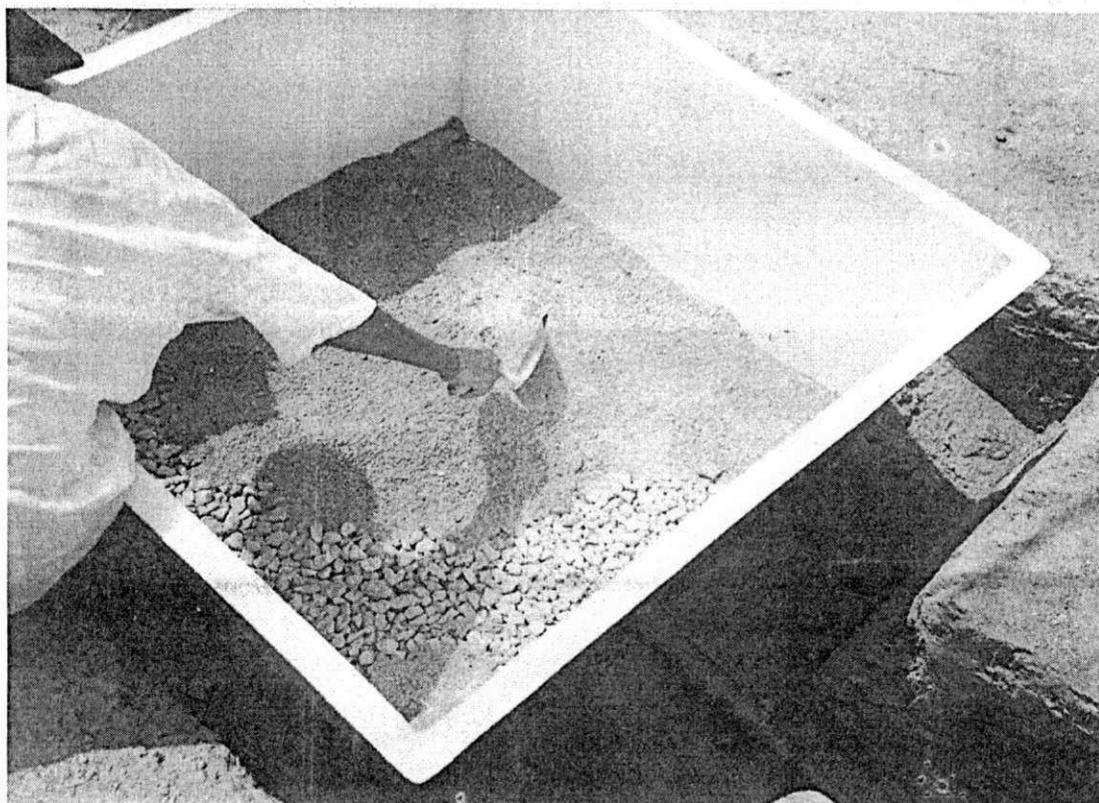


Figura 4 . Fases de preenchimento dos lisímetros: camada de brita, areia e solo retirado da área

Após a instalação se fez uma irrigação até ocorrer a drenagem, com a intenção de promover a acomodação do solo. Fez-se o tutoramento colocando-se um arame a 2m de altura e fios de ráfia amarrados a este arame, que também amarrados as plantas garantiram a sustentação evitando tombamento (Figura 5); essa estrutura foi reforçada com estacas a medida em que a cultura crescia, devido ao peso dos frutos.

A irrigação por gotejamento foi efetuada com mangueiras espaçadas 1m entre si e 0,40m entre emissores (Figura 6), e vazão média de 8 l.h^{-1} por emissor, determinados após teste de vazão; em cada lisímetro funcionavam dois gotejadores.

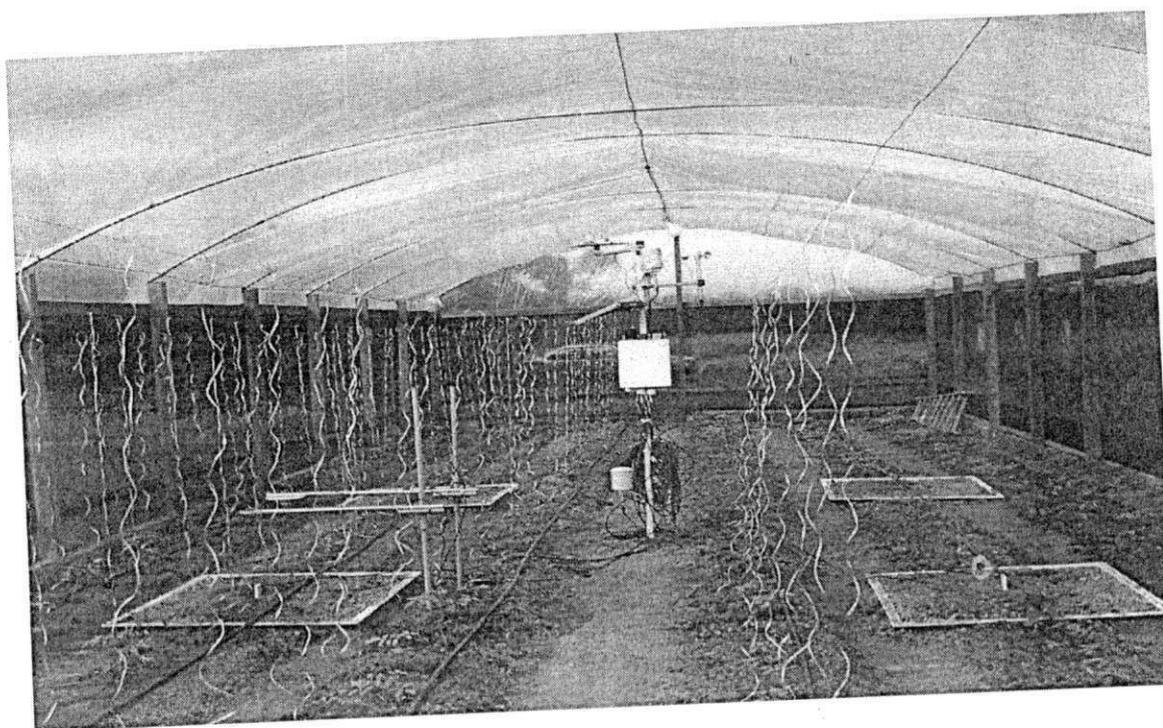


Figura 5 . Visão geral do ambiente protegido com a cultura do tomate, e equipamentos para as medições microclimáticas e ambientais.

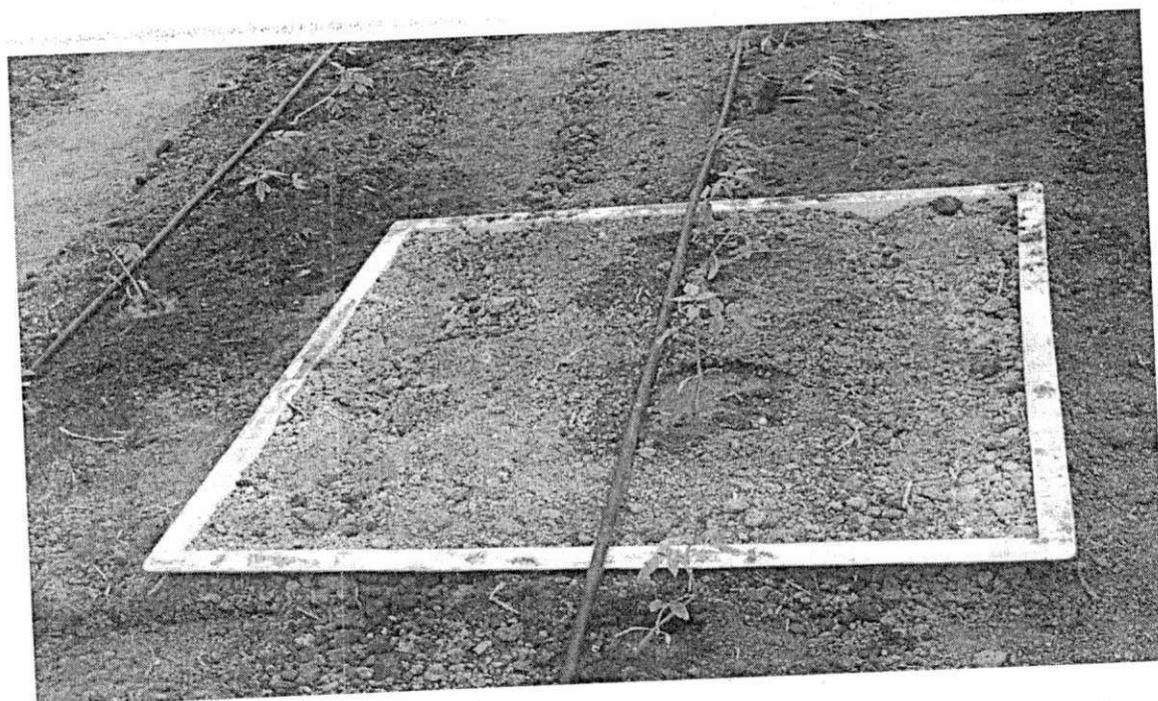


Figura 6. Detalhe do sistema de irrigação por gotejamento no ambiente protegido.

No fase inicial da cultura, (período em que as plantas encontravam-se nos tubetes), A irrigação foi realizado diariamente. O período que a cultura esteve no ambiente protegido, a irrigação foi realizada a cada dois dias, com base na evapotranspiração de referência encontrada na área experimental, que foi de 3 mm dia^{-1} (Souza et al., 1998) e, considerando-se esta lâmina determinou se um turno de rega de dois dias por gotejamento.

3.1.3. Descrição do experimento

De início, o preparo do solo foi feito com uma aragem na área e em seguida, colocou-se uma camada de torta de mamona; só então, os canteiros foram preparados para a colocação das mudas de tomateiro caqui (var. Letícia). As mudas foram plantadas previamente em tubetes preparados com substrato industrial (BIOPLANT) no dia 2 de maio de 2005. A adubação foi feita utilizando-se 2g de Biofertilizante com a formulação 03-12-06 mais micronutrientes, para cada tubete. O transplântio ocorreu no dia 02 de junho de 2005, para o ambiente protegido, quando as mudas foram plantadas em camalhões (Figura 7) com aproximadamente 10 cm de altura e 40 cm de largura na sua base, com espaçamento de 0,4 m entre plantas e de 1,0 m entre as fileiras, em 6 fileiras de plantas orientadas no sentido do comprimento da estufa.



Figura 7. Linha de plantio da cultura do tomateiro na estufa plástica

Realizou-se uma adubação de fundação com biofertilizante e torta de mamona; após 15 dias do transplantio, aplicaram-se 10g de uréia por planta, em meia lua, e se completou a aplicação, uma semana após. A fim de evitar a podridão apical dos frutos, aplicaram-se 5 g por cova de nitrocálcio no dia 21 de julho e se repetiu a aplicação trinta dias depois.

Os tratos culturais, como desbrotas, desfolhamento abaixo da primeira inflorescência, foram realizados semanalmente. Durante o experimento se observou todas as plantas, que apresentaram folhas com danos causados por pragas; a cada semana se avaliou o grau de ataque, que sempre foi considerado leve, não havendo, portanto, necessidade de aplicação de inseticidas.

3.1.4. Observações na planta

As observações fenológicas foram realizadas semanalmente, logo após o transplantio.

3.1.4.1. Altura de plantas

A altura das plantas foi determinada semanalmente, tomando-se as medidas a partir do colo até a gema apical, em vinte plantas marcadas previamente

3.1.4.2. Diâmetro do caule

Quinzenalmente, foram observadas algumas medidas do diâmetro do caule (mm), a uma distância de 5,0 cm do colo.

3.1.4.3. Comprimento e largura das folhas

O comprimento e a largura das folhas também foram medidos semanalmente ,para determinação da área foliar e do índice de área foliar (IAF).

3.1.4.4. Número de folhas

A determinação do número de folhas se deu durante o mesmo período de avaliação da leitura e serviu para a determinação do fator de correção para obtenção da área foliar, pelo método não destrutivo.

3.1.4.5. Início da floração e da frutificação

Definiu-se o início da floração a partir da contagem do número de dias após o transplante, e o da frutificação a contagem dos dias para o aparecimento dos primeiros frutos (Figura 8).



Figura 8. Início do aparecimento das primeiras flores e os primeiros frutos

3.1.4.6. Produção

Após cada colheita se mediu o diâmetro, o comprimento dos frutos e a massa dos frutos. Determinou-se o número de frutos por planta e o peso médio de frutos por planta. A classificação dos frutos foi feita nesta fase, de acordo com a classificação sugerida por (Ortega-Farias et al., 2001).

3.1.5 - Observações meteorológicas

O saldo radiômetro (LITE) foi instalado na área gramada nas condições padrões de ETo. As observações meteorológicas obtidas no ambiente protegido, cultivado com a cultura do tomate, foram feitas com sensores acoplados a um sistema automático de aquisição de dados, modelo CR10X da Campbell Scientific, programado para fazer medições a cada dez segundos e armazenar dados a cada dez minutos, instalados no centro da área cultivada (Figura 8)

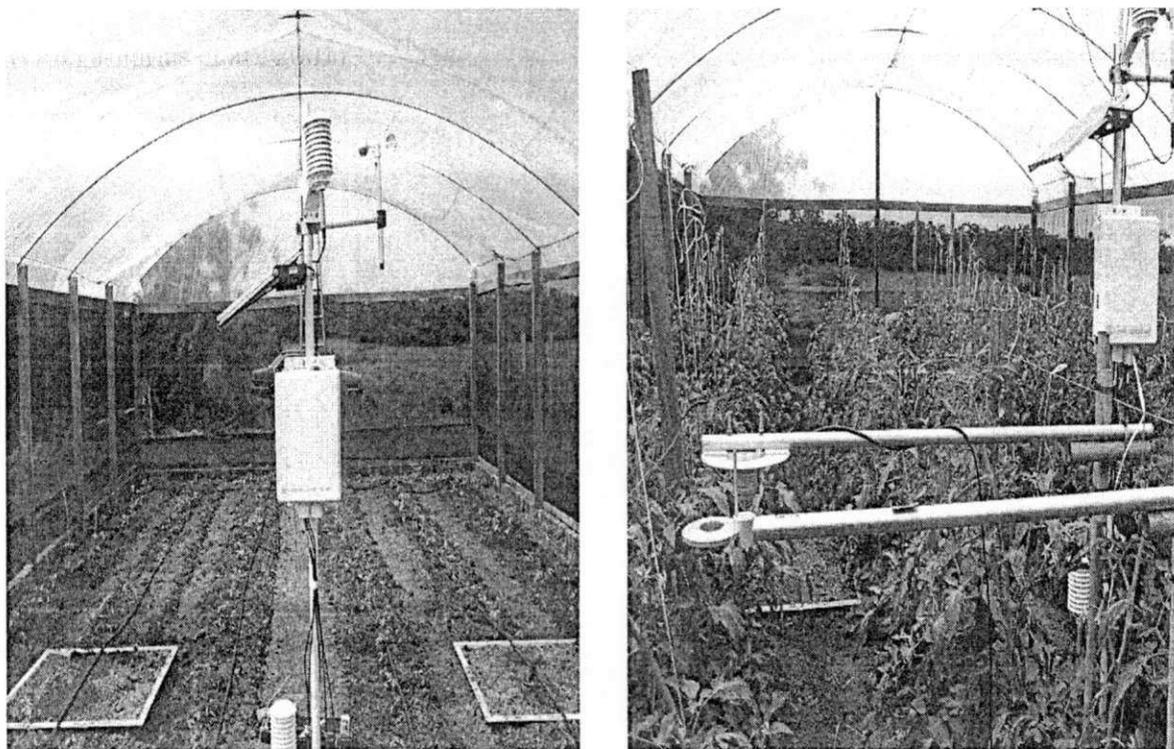


Figura 9. Estação automática para o monitoramento das condições micrometeorológicas, localizada no centro da área

Para medições de temperatura (T) e umidade de ar (UR) em dois níveis (Z_1 = altura do dossel e $Z_2 = 2,0$ m) instalaram-se dois sensores automáticos, modelo HPM 45C. Com a evolução da altura da cultura, elevavam-se os sensores, de modo que os níveis de medição se mantivessem nas alturas estabelecidas, isto é, sempre acima do dossel.

A velocidade do vento (Vv) foi medida a 2,0 m do dossel vegetativo, por um anemômetro. Além desses sensores, dois piranômetros (CM3, Kipp Zone) foram instalados para medida de radiação solar global (R_g) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) Li-Cor, e um saldo radiômetro (NR LITE, Kipp e Zone) para as medições do saldo de radiação (R_n). Radiação solar refletida (R_r) (Figura 9)..

Uma vez descarregadas, os valores de radiação gerados pelos radiômetros eram armazenadas no computador do laboratório de meteorologia, para análise dos dados; em $W m^{-2}$ foram convertidos em $MJ m^{-2}$ diurnos através de integrações.

As medidas de precipitação foram realizadas com um pluviômetro-CSI Modelo es 700L da Hidrological Services Pty, LTD instalado na Estação Agrometeorológica do Centro de Ciências Agrárias (CECA), que se localizava ao lado do ambiente protegido.

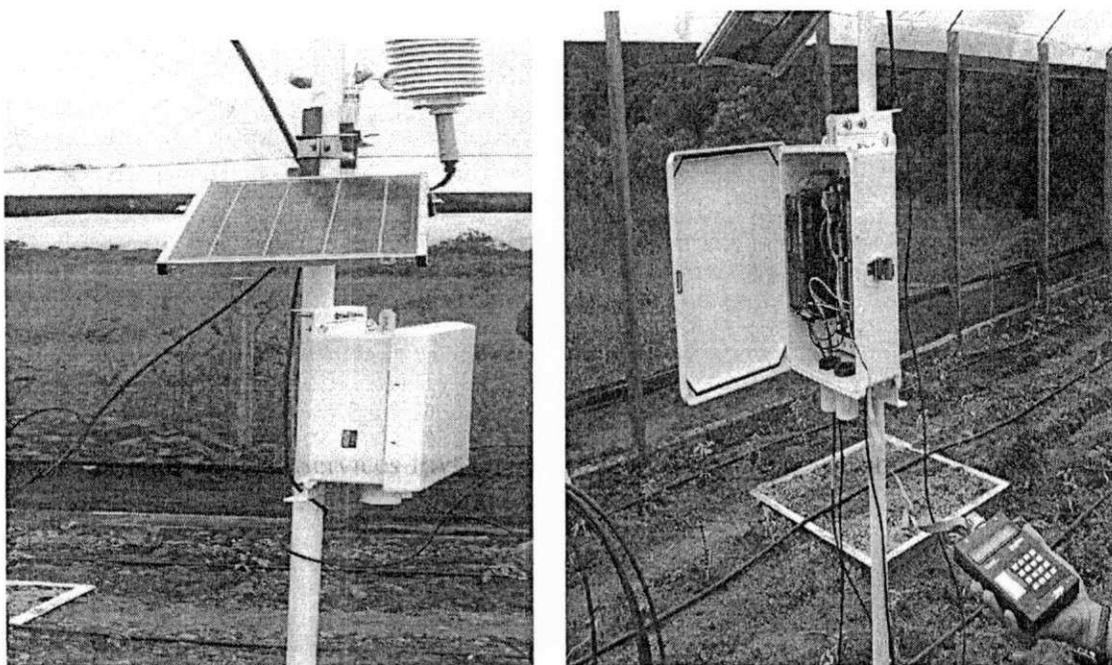


Figura 10. Detalhes do posicionamento da estação automática para o monitoramento micrometeorológico.

A umidade do solo foi monitorada pelo sensor de umidade volumétrica, o reflectometro de conteúdo de água (CS615 Water Content Reflectometers) da Campbell (Figura 10) instalados: no lisímetro cultivado e outro no lisímetro sem plantas, medindo-se a umidade do solo média entre a superfície e 30cm profundidades, cuja calibração foi feita com um modelo encontrado para o solo da área de estudo e ajustado por um fator obtido entre as densidades do solo, em condições naturais e o solo do lisímetro.

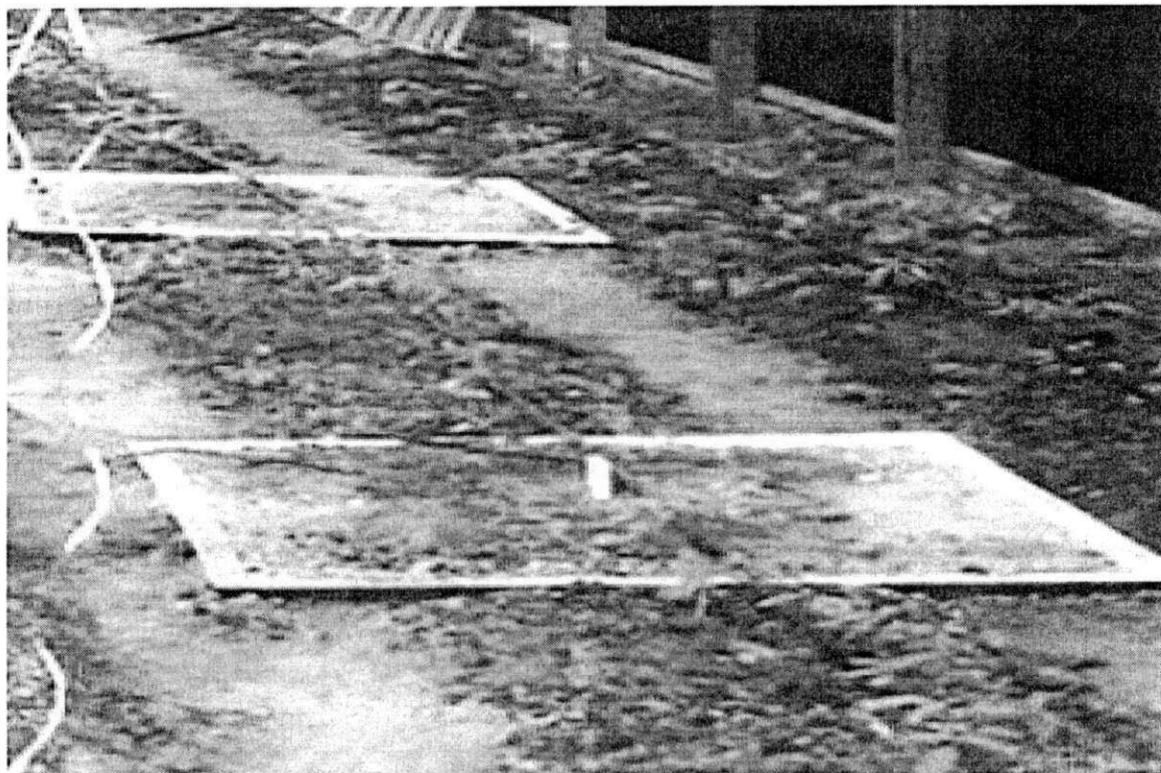


Figura 11. Detalhe da torre do sensor automática para o monitoramento da umidade do solo

3.2 Métodos

Apresentam-se nesta secção, métodos usados nas determinações de evapotranspiração de referência e da cultura, K_c da cultura, e as medidas fenológicas dentro e fora do ambiente protegido.

3.2.1 Balanço de radiação no ambiente protegido

O saldo de radiação de ondas curtas ($R_{n,oc}$), definido pela diferença entre a radiação de onda curta que incide na superfície terrestre (R_g) e a radiação de onda curta que é refletida (R_r), pode-se apresentar $R_{n,oc}$ segundo a expressão:

$$R_{n,oc} = R_g - R_r \quad (1)$$

em que:

R_g é a radiação solar global e R_r é a radiação refletida, que corresponde ao produto do albedo (α) pela radiação solar global.

O saldo de radiação de ondas longas ($R_{n,oc}$) foi obtido pela diferença entre o saldo de radiação total (R_n) e o saldo de radiação de ondas curtas ($R_{n,oc}$), conforme a equação:

$$R_{n,oc} = R_n - R_{n,oc} \quad (2)$$

3.2.2 Balanço de energia

As atividades relacionadas ao monitoramento dos termos do balanço de energia foram realizadas simultaneamente com o balanço hídrico. Neste trabalho o fluxo de calor no solo foi considerado nulo. O balanço de energia da superfície vegetada foi calculado em termos de fluxos verticais, segundo a equação abaixo:

$$R_n = G + LE + H + P \quad (3)$$

R_n é o saldo de energia diário (MJ. m^{-2}); G é o fluxo de calor no solo (MJ. m^{-2}); LE é o fluxo convectivo de calor latente (MJ. m^{-2}) e H é o fluxo convectivo de

calor sensível (MJ. m^{-2}); ambos estimados pelo método de Bowen (1926) e pelo método de Penman-Monteith; P é a energia gasta nos processos fotossintéticos. Este termo foi considerado desprezível pois o termo raramente excede 2 a 5% (Frisina & Escobedo, 1999) e G foi desprezado.

3.2.2.1. Razão de Bowen

A partição de energia disponível entre os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) pode ser obtida pelo método de balanço de energia (razão de Bowen), baseado na razão das densidades de fluxo de H e LE, em função dos gradientes de temperatura e da pressão de vapor, mediante a expressão citada por Perez et al., (1999):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (4)$$

LE = fluxo de calor latente, (W m^{-2}),

H = fluxo de calor sensível, (W m^{-2})

ou

A equação acima pode ser escrita da seguinte forma:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{(t_c - t_a)}{(e_c - e_a)} \quad (5)$$

em que γ = constante psicrométrica,

t_c = temperatura do ar na altura da copa, °C

t_a = temperatura do ar obtida a dois metros acima do dossel da cultura, °C

e_c = pressão de saturação de vapor d'água a nível do dossel da cultura, kPa

e_a = pressão de saturação de vapor d'água a 2m acima do dossel da cultura, kPa

A partir das medições de saldo de radiação (R_n) juntamente com a equação do balanço de energia (Eq. 5) utilizou-se a equação de Bowen (Eq. 6) e procederam-se os cálculos de fluxo de calor latente (LE) equação 6 e fluxo de calor sensível (H), equação 7:

$$LE = \frac{(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (6)$$

e

$$H = R_n - LE \quad (7)$$

3.2.2.2 Método combinado de Penman-Monteith

Todo fluxo possui uma resistência e se torna importante descrever como uma superfície controla ou responde a esses fluxos. No caso de um cultivo agrícola Monteith (1965) considera o dossel das culturas como sendo uma grande folha (big leaf); assim, a troca de calor sensível e de calor latente pode ser descrita com base na analogia do conceito de resistência elétrica. Neste modelo (big leaf), o fluxo, a diferença de potencial e a resistência, serão descritos entre a altura na qual estão localizados a “grande folha” e o ar na camada limite turbulenta, condições em que se observa um fluxo entre o estômato e a camada limite das folhas e outro fluxo entre a camada limite da folha e o escoamento atmosférico; o primeiro é controlado pela resistência da cultura à perda de água, enquanto o segundo é controlado pela resistência aerodinâmica; assim ambos são controlados pela demanda atmosférica (Pereira et al., 1977).

Neste contexto, a derivação do método de Penman-Monteith, apresentada abaixo, foi usada para escala de um dia (Monteith & Unsworth, 1990):

$$LE_{PM} = \frac{\Delta (Rn - G) + Nc_p \rho \frac{[e_s - e_a]}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_e}{r_a}\right)} \quad (8)$$

em que LE é densidade de fluxo de calor latente (MJ m^{-2}), Rn é o saldo de radiação sobre a comunidade vegetal (MJ m^{-2}); G é a densidade de fluxo de calor no solo (MJ m^{-2}); \bar{T} é a Temperatura média diária do ar a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$); e_s é a pressão de saturação do vapor média diária (kPa); e_a refere-se à pressão atual de vapor média diária (kPa); Δ é a tangente à curva de pressão de vapor no ponto de Tmed ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); r_a é a resistência aerodinâmica para difusão de calor e vapor (s.m^{-1}); r_c a resistência do dossel vegetativo (s.m^{-1}).

Nc é um fator de conversão de unidade de tempo da resistência do ar com valor de 86400 para diário.

A pressão de saturação de vapor e_s foi obtida de acordo com a equação da (Murray, 1967):

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 t}{237,3 + t}\right) \quad (9)$$

e_s = pressão de saturação de vapor d'água (kPa)

e_a = pressões de atual do vapor d'água (kPa)

t = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

UR são os valores para a umidade relativa do ar, no período de 24 horas (%)

A pressão atual do vapor d'água foi obtida através da expressão:

$$e_a = \frac{esUR}{100} \quad (10)$$

UR é a umidade relativa do ar, obtida por meio de psicrômetro.

A declividade (Δ) da curva de pressão de vapor em função da temperatura, foi obtida a partir da equação (Allen et al., 1998).

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(t + 237,3)^2} \quad (11)$$

3.2.2.3 Resistência estomática

Dentro da estufa o parâmetro aerodinâmico da cultura pode ser considerado dependente do nível de radiação global, temperatura de ar e umidade do ar, com base em leis exponenciais. Para a cultura do tomate em estufa, os efeitos da radiação na resistência estomática são cruciais e apresentam a seguinte relação (Boulard et al., 1991).

$$r_s = 200 \left(1 + \frac{1}{\exp(0,05(\tau Rg - 50))} \right) \quad (12)$$

em que:

R_s = resistência estomática ($s\ m^{-1}$)

R_g = radiação global ($MJ\ m^{-2}$)

τ = transmissividade. Como se trata de um ambiente protegido utilizou-se, neste trabalho, o R_{gi} para substituir R_g e Transmissividade.

3.2.2.4 Resistência aerodinâmica

Os valores de resistência aerodinâmica foram medidos através do comprimento médio da folha e velocidade do vento dentro da estufa; de acordo com Boulard et al (2000).

$$r_a = 220 \frac{d^{0,2}}{V_i^{0,8}} \quad (13)$$

sendo:

r_a = resistência aerodinâmica ($s\ m^{-1}$)

d = comprimento da folha m

V_i = velocidade do vento dentro da estufa ($m\ s^{-1}$)

3.2.3. Estimativa da Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cultura foi determinada pelo balanço hídrico nos lisímetros e pelo método de Penman-Monteith.

3.2.3.1. Balanço hídrico

Os componentes do balanço hídrico foram determinados dentro dos lisímetros com planta e sem planta, no ambiente protegido, no período de 11/julho a 16/setembro. Fez-se a determinação do balanço de água realizado com base na lei de conservação das massas, através de determinações de irrigação, drenagem profunda e variação de armazenamento de água no solo, a partir da instalação de um hidrômetro para medição da água que entrava na área do experimento. Obtiveram-se a drenagem coletada nos drenos, instalados na saída dos lisímetro, e a umidade, por meio de um medidor automático instalado nos lisímetros.

A partir da equação do balanço hídrico a evapotranspiração da cultura pode ser obtida através da equação:

$$ET = P + I - D - R \pm \Delta A \quad (14)$$

em que:

ET = evapotranspiração da cultura, mm

P = Precipitação, mm

I = - irrigação, mm

D = Drenagem profunda, mm

R = escoamento superficial

ΔA = variação do armazenamento da água do solo na camada de profundidade de zero a Z (mm), para o intervalo de tempo considerado no balanço.

O termo precipitação foi nulo, uma vez que o trabalho foi realizado em condições de ambiente protegido, e calculou-se a evapotranspiração do seguinte modo:

$$ET = I - D \pm \Delta A \quad (15)$$

A variação no armazenamento de água no perfil do solo (ΔA) foi determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo, obtidos do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte expressão:

$$\Delta A = [\theta_{(f)} - \theta_{(i)}]Z = A_f - A_i \quad (16)$$

em que:

$\theta_{(f)}$ = umidade do solo final, $m^3 m^{-3}$

$\theta_{(i)}$ = umidade do solo inicial, $m^3 m^{-3}$

A_f e A_i são os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

3.2.3.2. Método de Penman-Monteith (FAO)

Para se calcular a evapotranspiração da cultura, utilizou-se a Eq. (8) de Penman-Monteith, a seguir (Monteith & Unsworth), 1990:

$$ET_c = \frac{LE}{L} \quad (17)$$

em que ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm d^{-1}) e $L = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3})$ é o fluxo de calor latente (MJ m^{-2}), L é o calor latente de evaporação (MJ m^{-2}).

3.2.4 Estimativa da evapotranspiração de referência

Estimou-se a evapotranspiração de referência (ET_o) através dos métodos de Penman-Monteith (FAO), Linacre e de Radiação da FAO (Pereira et al., 1997).

3.2.4.1 - Método de Linacre

O modelo de foi utilizado como segue:

$$ET_o = \frac{\frac{500(T + 0,006z)}{100 - \phi} + 15(T - T_d)}{80 - T} \quad (18)$$

Sendo que z é a altitude em metros, ϕ é a latitude em graus, T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) T_d é a temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$), determinado pela seguinte equação:

$$Td = \frac{237,3 \log(e_a) - 156,8}{8,16 - \log(e_a)} \quad (19)$$

observando-se que nesta equação a pressão de vapor (e) entra em mm de Hg.

3.2.4.2. Método de Penman-Monteith FAO (Allen,1993)

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(Rn - G) + \left(\gamma \frac{900}{T + 273} \right) V_v (e_s - e)}{\Delta + [\gamma(1 + 0,34V_v)]} \quad (20)$$

em que:

ET_o = evapotranspiração de referência (mm d^{-1})

Rn = saldo de radiação sobre a grama ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G = densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

\bar{T} = temperatura média diária do ar a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

e_s = pressão de saturação do vapor média diária (kPa)

e_a = a pressão atual de vapor média diária (kPa)

Δ = tangente à curva de pressão de vapor no ponto de T_{med} ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ = coeficiente psicrométrico (kPa)

V_v = é a velocidade do vento (m.s^{-2})

3.2.4.3 Método de radiação (FAO)

O modelo de radiação apresenta a seguinte equação:

$$ET_o = C(W.Rg) \quad (21)$$

Contudo, Segundo Frevet et al (1983) pode-se evitar interpolações usando-se a equação:

$$ET_o = C_o + C_{1W} (R_g/\lambda) \quad (22)$$

$$C_o = 0,3 \text{ (mm d}^{-1}\text{)}$$

$$C_1 = a_0 + a_1UR + a_2Ud + a_3URUd + a_4UR^2 + a_5Ud^2$$

em que UR é a umidade relativa do ar (%) e Ud a velocidade média do vento no período diurno, a 2,0 m de altura; com $a_0 = 1,0656$, $a_1 = -0,0012795$, $a_2 = 0,044953$, $a_3 = -0,00020033$, $a_4 = -0,0031508$, $a_5 = -0,0011026$.

$$W = 0,483 + 0,01T_u \quad (23)$$

Considerando-se

$$\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$$

$$R_g = \text{MJm}^{-2}$$

3.2.5 Coeficiente da cultura

O coeficiente de cultura foi obtido por meio da expressão apresentada por Doorenbos & Kassam (1979), como:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (24)$$

em que:

$$ET_c = \text{evapotranspiração da cultura, mm dia}^{-1}$$

$$ET_o = \text{evapotranspiração de referência, mm dia}^{-1}$$

Para comparação entre os métodos, o k_c da cultura, foi calculado utilizando-se a ET_o obtida pelo método de Linacre e Radiação.

3.2.6 Umidade do solo

A curva característica de retenção de água do solo foi obtida no perfil do solo até 30 cm, pelo Laboratório de Água e Solo do Centro de Ciências Agrárias cujas características são as de um solo com um horizonte Ap1 (Bruno escuro: Bruno acinzentado escuro: franco argilo arenosa) com Capacidade de campo (CC) de $0,21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e no horizonte Ap2 (Bruno acinzentado escuro e Bruno acinzentado, franco argiloarenosa) $0,23 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ sendo o horizonte AB (Bruno, e mosqueado comum) $0,25 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Os valores de umidade na capacidade de campo correspondem aos potenciais entre -10 a -33 kPa. Sendo porém, os valores de umidade solo determinados a -33KPa mais adequados para as profundidades de 0-20 cm. (Costa, 2003) Quando determinado em situ a profundidade de 30 cm a CC correspondeu a $0,27 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. O ponto de murchamento (PM) foi de 0,11 em uma profundidade de 11 cm e 0,13 para 30 cm.

3.2.7 Análise de crescimento e desenvolvimento da cultura do tomate

3.2.7.1 Altura de plantas

As 24 plantas selecionadas no início do trabalho foram medidas semanalmente da superfície do solo até a última inserção; referidas medições ocorreram até o aparecimento do sétimo racemo visto que, a partir deste momento, as plantas já tinham atingido 2m de altura; fez-se então poda apical.

3.2.7.2 Área foliar

A área foliar foi determinada medindo-se o comprimento (C) e a largura (L) de todas as folhas das plantas marcadas, em que comprimento foi definido como a distância

entre o ponto de inserção do pecíolo no limbo foliar e a extremidade oposta da folha, enquanto a largura, como a maior dimensão perpendicular ao eixo do comprimento, com um fator de forma "f". A área foliar foi calculada pela seguinte expressão:

$$AF = C.L. f \quad (25)$$

Af = área foliar, (m²)

C = comprimento (cm)

L = largura da folha, (cm)

f = fator de correção

O fator de forma "f" foi determinado pela análise de regressão simples entre a área de uma amostra de folhas e o produto de suas dimensões; neste caso, a reta ajustada ao conjunto de dados possui uma equação do tipo $Y = bx$, em que "b" corresponde ao fator "f". A área das folhas amostradas foi determinada pela digitalização das respectivas imagens, que após serem digitalizadas, foram recortadas respeitando-se a forma e se realizou a pesagem dessas folhas obtendo-se então, uma relação do peso das folhas com a área da folha.

3.2.7.3 Índice de área foliar

O IAF (m² m⁻²) foi calculado por meio da relação funcional entre a área foliar (AF) e a área disponível às plantas, dada pelo espaçamento (2,5m x 1,0m), e, posteriormente, relacionou-se o IAF, através de regressão linear simples, com as variáveis observadas.

$$IAF = Af. NP/AT \quad (26)$$

em que:

Af = área foliar média de três plantas (m^2)

AT = área do terreno ocupada pela cultura ($1m^2$)

NP - número de plantas por metro quadrado (5 plantas)

3.2.8. Análise estatística

Os valores diários das variáveis meteorológicas internas e externas, foram coletados, armazenados e analisados, usando-se o modelo de Willmott.

Os modelos foram selecionados segundo seus coeficientes de determinação (r^2) e a significância dos seus coeficientes angulares, pelo teste t a 5% de probabilidade de erro. O desempenho dos modelos gerados foi avaliado de acordo com os índices propostos na literatura, por Willmott (1985).

-Diferença média normalizada:

$$DMN = \frac{(\bar{O} - \bar{P})}{\bar{O}} \quad (27)$$

em que:

O = média aritmética dos valores de observados

P= média aritmética dos valores estimados.

- Raiz quadrada do quadrado médio do erro sistemático erro não sistemático (RMSEn)

$$RMSEs = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_{obs} - \bar{P}_{est})^2 \right)^{0.5} \quad (28)$$

- Raiz quadrada do quadrado médio do não sistemático (RMSEn)

$$RMSEn = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{P}_{st} - P)^2 \right)^{0.5} \quad (29)$$

Coeficiente de correlação (r)

Usou-se o coeficiente de correlação como indicativo do grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média

Teste de Willmott

Segundo Willmott (1985) para um bom modelo, a porção não sistemática do erro deve ser muito maior do que a sistemática. Quanto maior o erro sistemático tanto mais pobre o modelo.

- coeficiente de concordância (d)

Usado para quantificar o afastamento dos valores estimados dos observados de acordo com a equação:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^N (|O_i| - |\bar{P}|)^2} \right] \quad (30)$$

em que:

$$O'_i = O_i - \bar{P}$$

$$P'_i = P_i - \bar{P}$$

Em que d=0 sem concordância,

d=1 concordância perfeita entre observações e estimativas. (Heldewin et al., 2004).

4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Condições meteorológicas do ambiente protegido e campo

Apresentar-se-ão, nesta seção os dados referentes as condições meteorológicas no período experimental, foram levados em consideração os elementos que mais afetam o crescimento da cultura do tomateiro. Entre eles destacam-se temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento dentro do ambiente protegido e no campo no ano de 2005.

4.1.1 Temperatura

Na tabela 2 apresenta-se o resumo das variações climáticas observadas no interior da estufa e no campo no período de junho-setembro.

Tabela 2. Média das variáveis microclimáticas; Umidade do ar (%), Temperatura a 2m (°C), Radiação Global, Saldo de radiação (MJ m⁻²) e velocidade do vento (ms⁻¹) observado no interior do ambiente protegido durante todo ciclo do tomateiro

Ambiente	Estufa Plástica					Campo					
	Períodos	T °C	Rg MJ m ⁻²	Rn MJ m ⁻²	V v m s ⁻¹	UR %	T°C °C	Rg MJ.m ⁻²	Rn MJ.m ⁻²	V v m.s ⁻¹	UR %
	Noturno	22,0	-	0,00	0,46	93,2	20,4	-	0,00	1,2	94,5
	Diurno	25,9	10,78	6,68	0,71	73,3	24,6	17,0	11,4	3,3	78,7
	Fase I	24,6	8,71	4,55	0,54	86,7	22,9	12,3	5,0	1,9	90,3
	Fase II	24,0	10,45	6,28	0,65	83,6	22,2	16,3	10,4	2,3	86,5
	Fase III	23,7	11,80	7,13	0,48	81,4	22,7	19,1	14,0	2,4	85,3

A temperatura média no interior do ambiente protegido foi maior que a temperatura fora da estufa. Entretanto os valores de Radiação solar global, saldo de radiação, velocidade do vento e Umidade Relativa do ar apresentaram valores inferiores aos observados fora da estufa. As temperaturas mais altas ocorreram nos meses de junho e julho e estão apresentadas na Figura 12, na qual se nota um aumento no valor da temperatura média do ar, no interior da estufa plástica (T_{di}) no dia 171(19/06), atingindo $26,7^{\circ}\text{C}$. Um acréscimo de $3,4^{\circ}\text{C}$ em relação à temperatura no campo, o que já era esperado em virtude da interrupção do processo convectivo em função da velocidade reduzida do vento e ao maior armazenamento de calor sensível pelo ar atmosférico, no interior da estufa, em função da retenção de radiação de onda longa aumentando, assim, a temperatura máxima em relação ao campo.

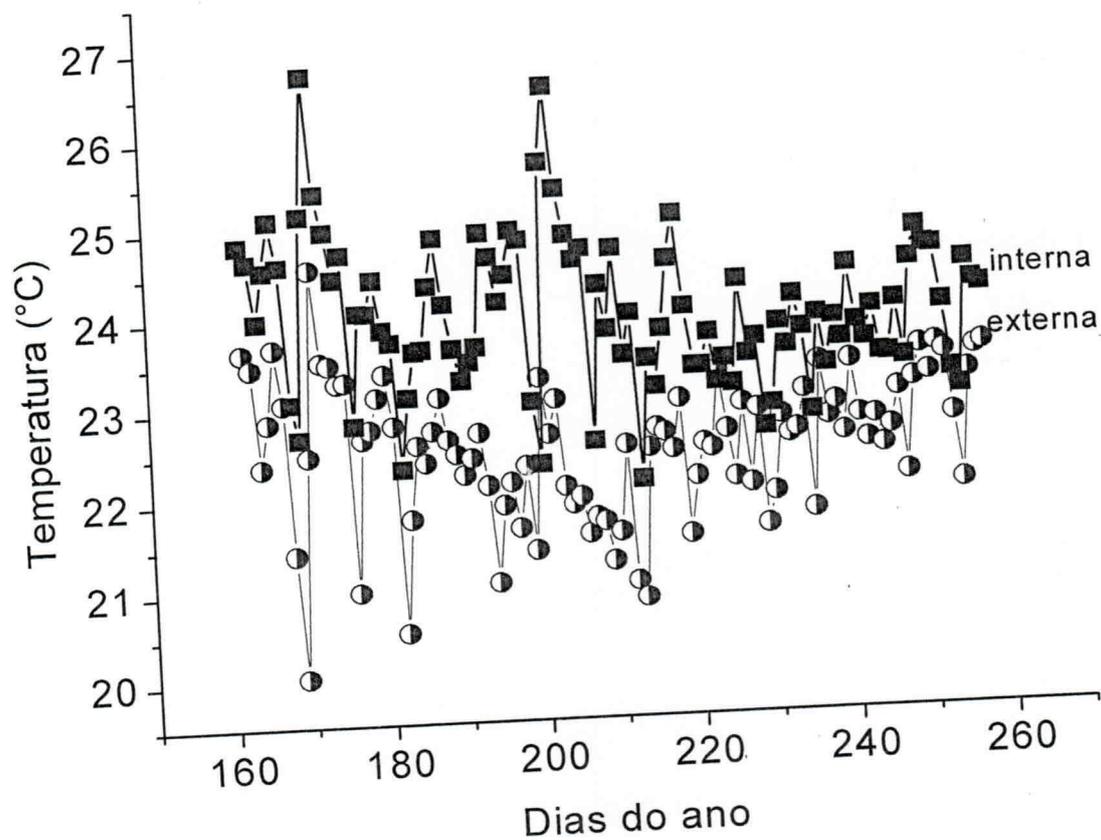


Figura 12. Temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$), no interior da estufa e no campo

A temperatura média diária encontrada no ambiente protegido foi de 23°C, ocorrendo variações apenas no início do período experimental; Esses valores estão de acordo com os encontrados por Cunha et al., (2003), Evangelista et al., (2003); Vasquez et al., (2005); além disso, deve-se considerar o menor volume de ar a ser aquecido; pode-se observar que não existe grande amplitude térmica durante o ciclo da cultura.

Os valores temperatura mínima diária (Figura 13) no interior da estufa foram bem maiores no período de 170-210, que os observados no campo, e atingiram o valor mínimo de 17°C; neste dia, o valor da temperatura fora da estufa foi 16,85°C . Os valores de temperatura máxima estão apresentados na Figura 14 e chegaram a atingir até 37° (dia mais quente) com diferenças de até 10°C entre os dois ambientes.

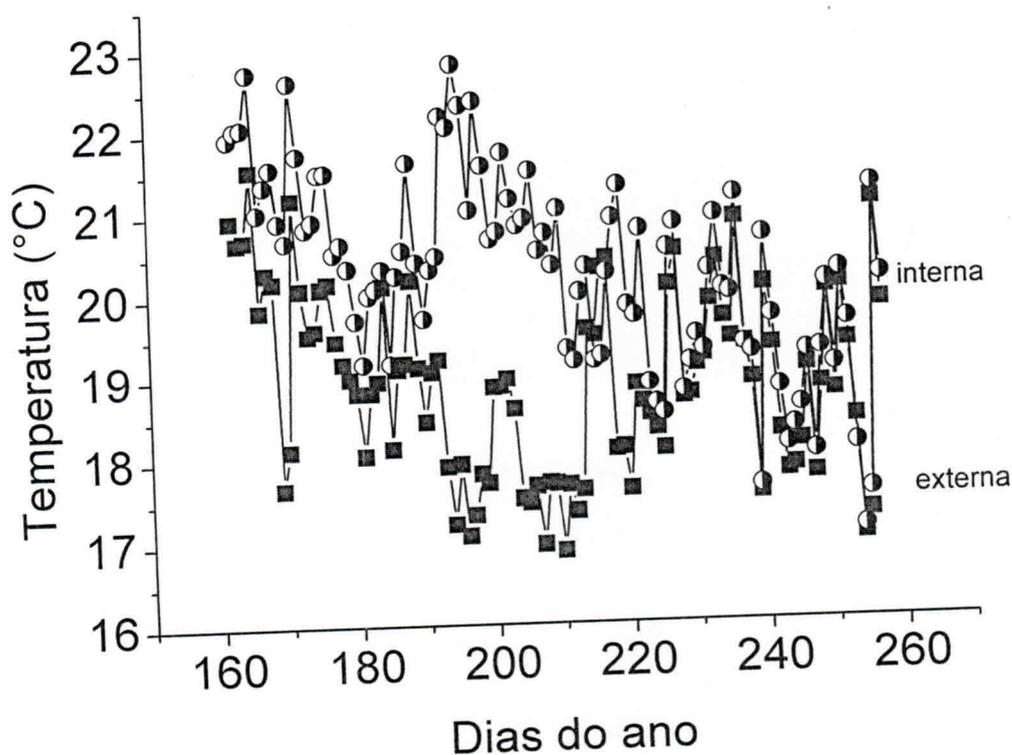


Figura 13. Temperatura mínima diária (°C) no interior e fora da estufa

Observa-se que os maiores valores de temperatura diária ocorreram no início do período experimental até 40 dias após o transplante (DAT) no restante do

período, que coincide com a maturação dos frutos; as temperaturas diárias apresentaram temperaturas amenas com menores variações. Os resultados encontrados neste experimento estão de acordo com os resultados obtidos por Furlan & Folegatti (2002), que estudando a distribuição da temperatura do ar em ambiente protegido, concluíram que a ela não é homogênea e a escolha do local ideal para a instalação de sensores e equipamentos é muito importante para obtenção de dados mais precisos.

No ambiente protegido a elevação da temperatura do ar é o principal problema de manejo sendo, portanto, um dos elementos climáticos que mais influenciam o consumo de água. Folegatti et al. (1997) observaram que na primavera os valores das temperaturas máxima, média e mínima do ar, dentro do ambiente protegido, foram sempre superiores aos do exterior (14,8%, 8,5% e 5,9%, respectivamente), com o menor valor das mínimas de 12,2°C e o maior valor das máximas de 42,2°C.

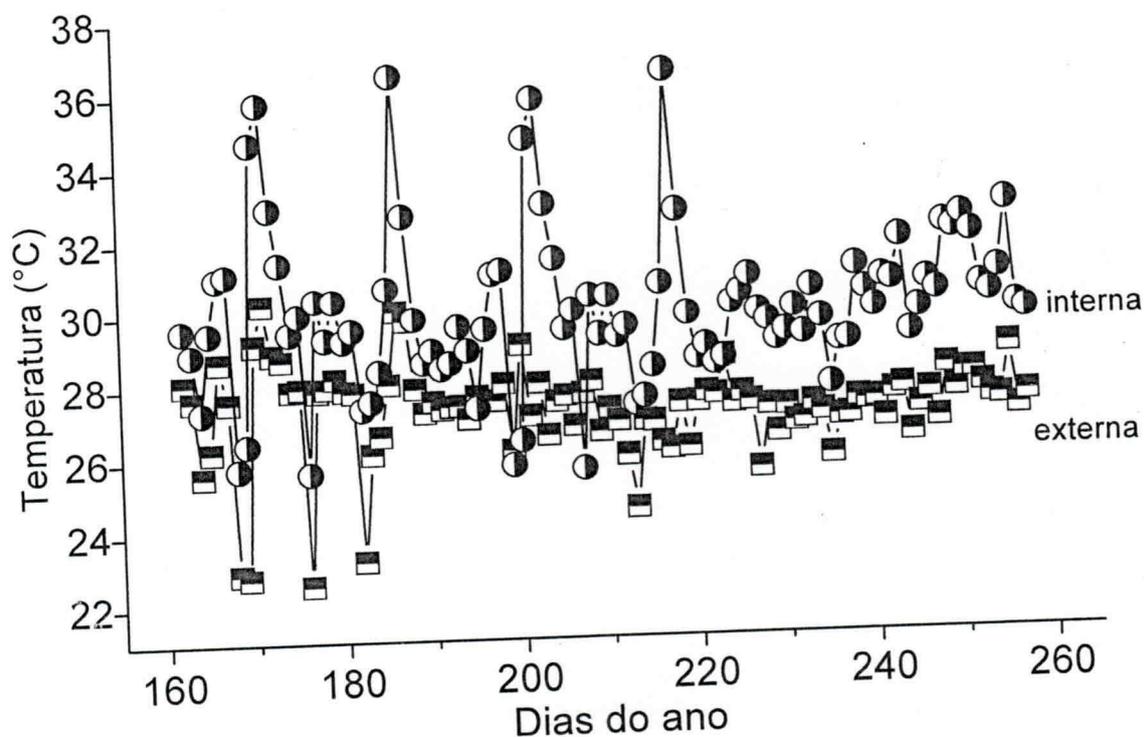


Figura 14. Temperatura máxima (°C) no interior da estufa e no campo

Os dados de temperatura diurna e noturna dentro do ambiente protegido são mostrados na Figura 15. O menor valor diurno dentro da estufa plástica foi de

22,1°C, ocorrido no dia 213 (20/08); neste dia, a temperatura externa foi superior em 3,6°C do ambiente protegido em relação ao ambiente externo. De acordo com Pereira et al., (2000), essas condições térmicas não são limitantes para a cultura do tomate.

Para se determinar o manejo adequado da cultura do tomate, foram levados em consideração os elementos que mais afetam o desenvolvimento da cultura; as variáveis foram analisadas em função do estágio de desenvolvimento das plantas, determinado pelos dias após o transplantio.

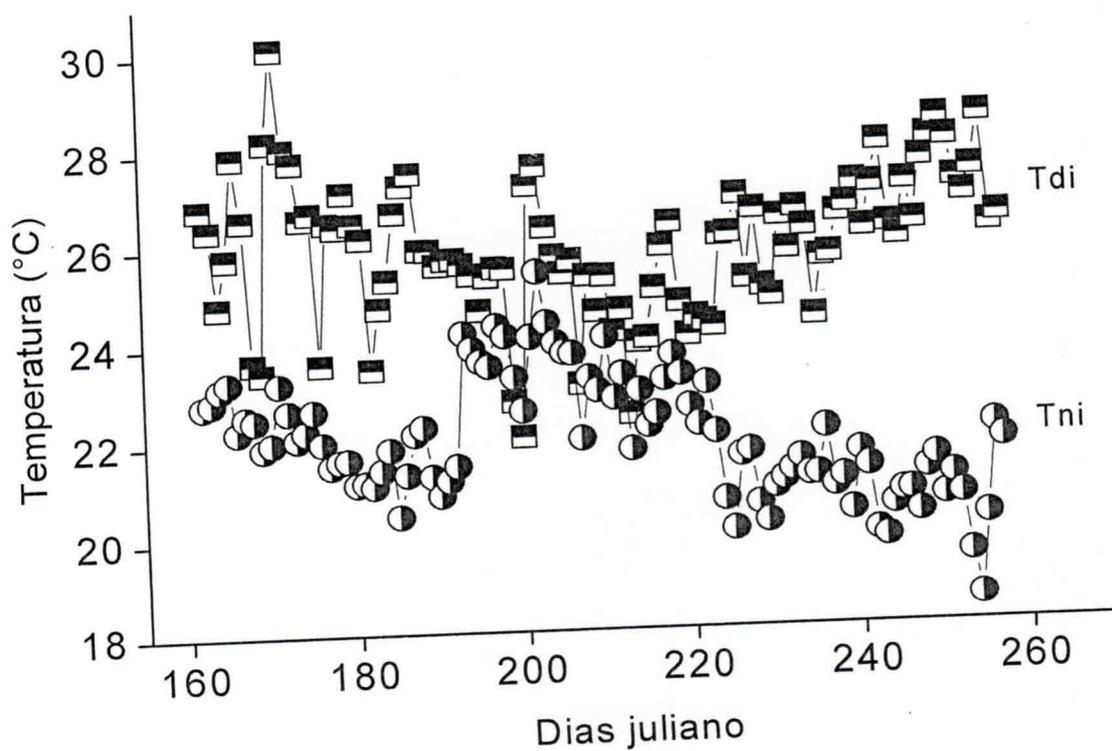


Figura 15. Temperatura média do ar diurna (tdi) e noturna (tni) no interior do ambiente protegido durante todo o ciclo fenológico do tomate

Na fase vegetativa a temperatura diurna apresentou grandes variações durante o dia; entretanto, no período noturno a temperatura variou em menor escala apresentando-se, na maioria dos dias, inferior aos valores encontrados no período diurno; nota-se, porém, que em alguns dias os valores foram semelhantes, ou seja, a temperatura diurna decresceu e permaneceu em torno de 22 °C até o período noturno, no mês de julho; a partir desta data os valores se mantêm próximos durante os dois períodos e se vão afastando a partir do mês de agosto, quando as temperaturas diurnas apresentam

estabilidade, mas, sempre acima da temperatura noturna, que chega a atingir 18,5 °C, o valor mais baixo obtido neste período e que coincide com o período de maturação dos frutos.

A relação dos valores de temperatura do ar dentro do ambiente protegido e no campo, encontra-se na Figura 16; esta relação apresentou um ajuste cuja equação foi $T_i = 1,05504T_e$ com $R^2 = 0,49$, indicando que os valores acima de 24°C estão mais próximos da reta 1:1 e os valores abaixo de 24°C apresentam maior dispersão dos dados em relação à linha 1:1. Os maiores valores foram encontrados dentro do ambiente protegido; esses resultados estão de acordo com o trabalho de Furlan & Folegatti (2002).

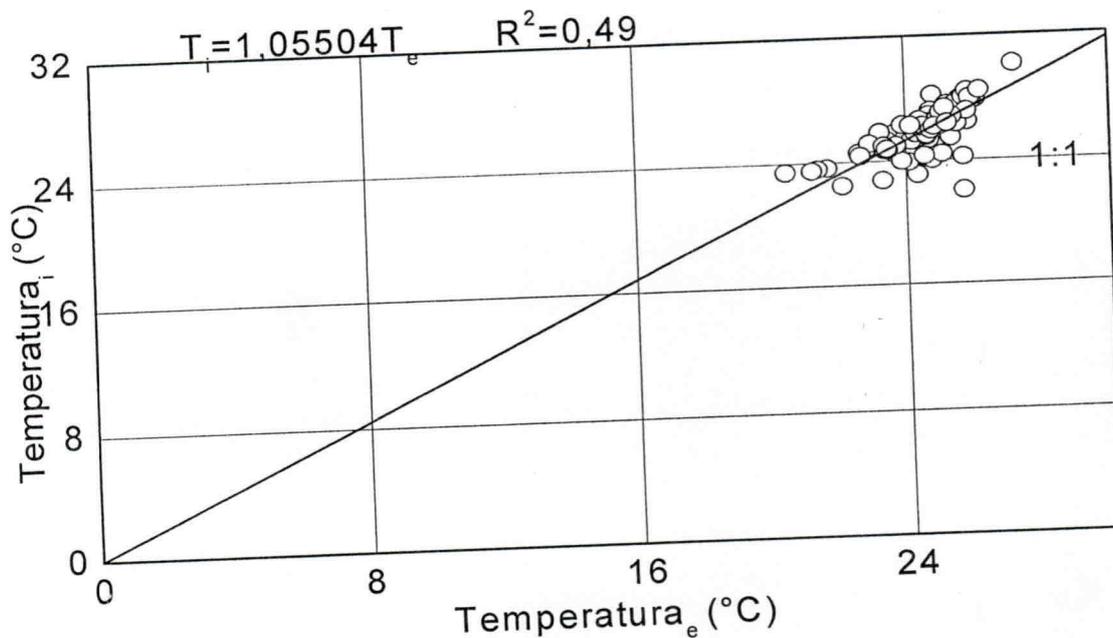


Figura 16. Relação entre a temperatura média interna (°C) e a temperatura média externa durante todo o ciclo da cultura

4.1.2 Umidade Relativa

Tem-se na Figura 17, os dados de umidade relativa do ar (UR) notando-se que a amplitude de variação dentro da estufa foi maior que no campo; ou seja de 19,36% e 13,4%, respectivamente. A umidade se apresenta inversamente proporcional à temperatura do ar para os dois ambientes pois, a medida em que a temperatura do ar

aumenta em função do aumento da disponibilidade de Radiação solar global, a umidade diminui em função do aquecimento do ar o que, conforme Cunha & Escobedo (2003), este fato ocorre devido a inibição do processo convectivo resultante da barreira física imposta pela presença do filme plástico utilizado na estufa.

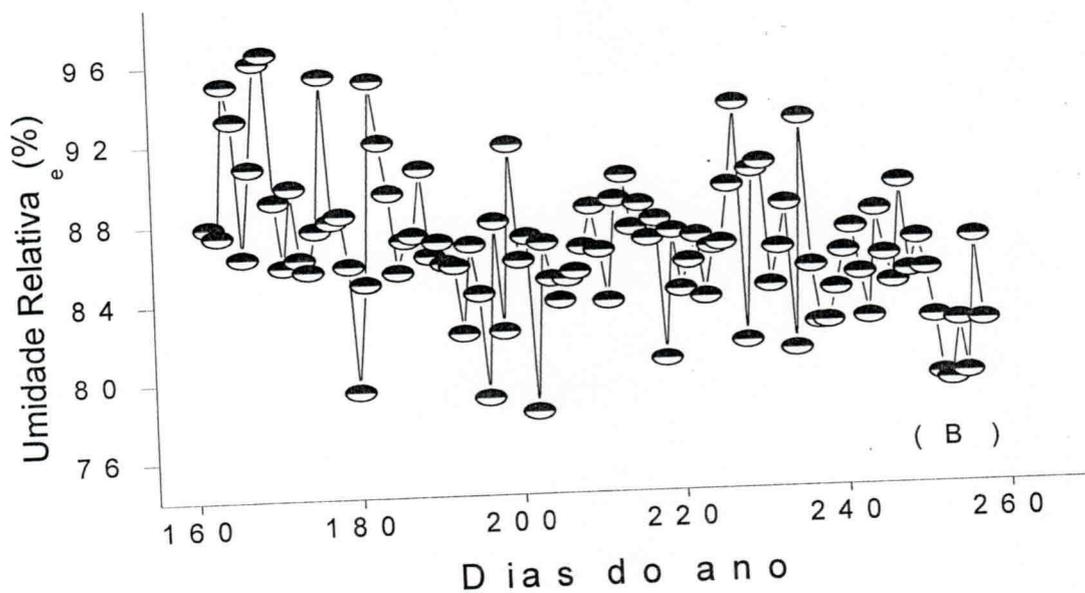
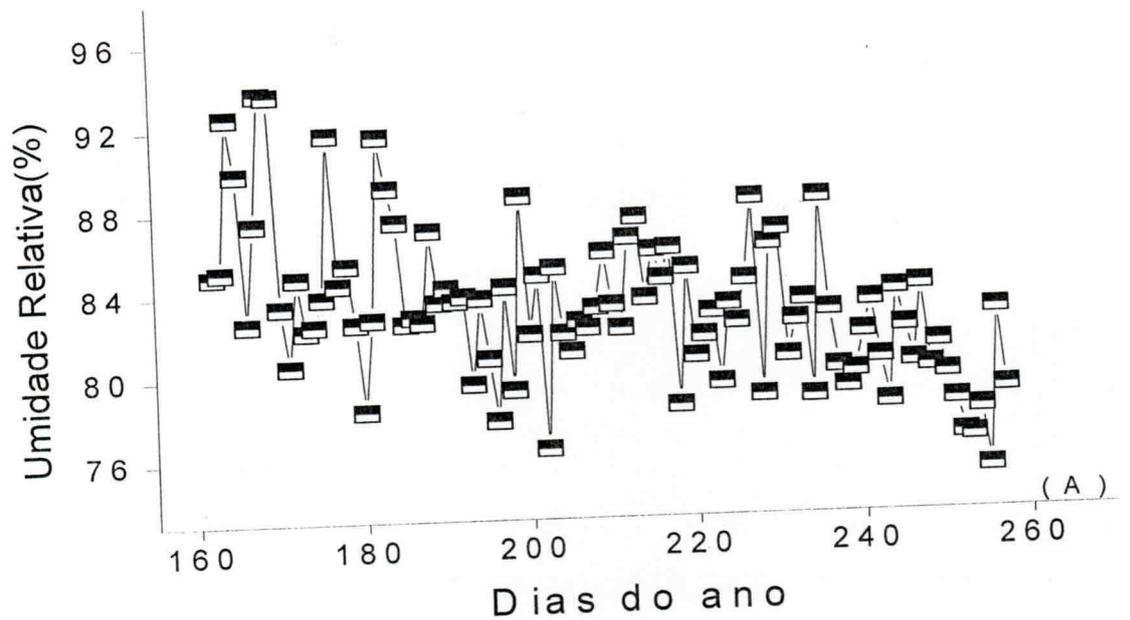


Figura 17. Umidade Relativa diária dentro (A) do ambiente protegido e no campo (B)

É difícil separar a ação de cada um dos elementos meteorológicos na evapotranspiração, haja vista que os mesmos agem simultaneamente; a explicação, segundo Joliet & Bailey (1992), é que a umidade relativa do ar pode afetar a evapotranspiração pelas interações com a fotossíntese e produção de matéria seca, afetando o índice de área foliar ou provocando mudanças na condutância estomática, apesar dos valores médios de umidade relativa encontrados no interior da estufa plástica terem sido inferiores aos observados fora da estufa.

Os resultados concordam com os valores encontrados por Farias et al., (1993) ao observarem que a umidade relativa dentro da estufa apresentou valores muito próximos dos encontrados no ambiente externo.

Os valores médios de umidade relativa obtidos no interior da estufa plástica apresentaram uma amplitude menor quando comparados com a Umidade Relativa fora (U_{re}), justificando um ajuste polinomial de $U_{ri} = 1,04047U_{re}$ e coeficiente de correlação $R^2 = 0,93$ (Figura 18); encontraram-se diferenças de 5,7% entre os dois ambientes em termos médios, ao longo do ciclo. A umidade relativa no interior da estufa apresentou maiores variações no início do experimento com média diária de 80%.

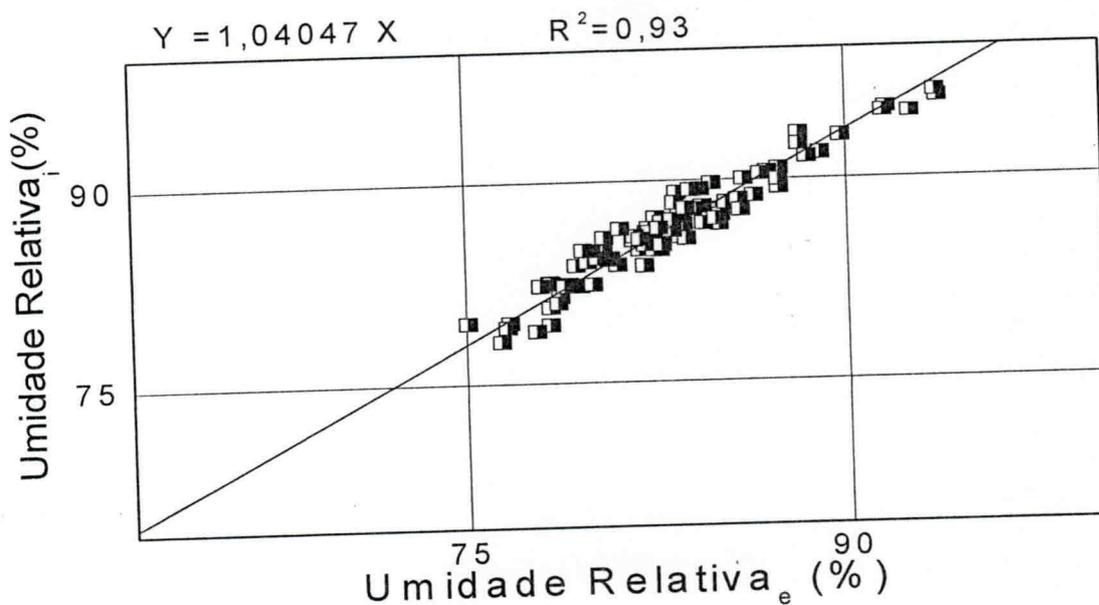


Figura 18. Relação entre Umidade Relativa encontrada no interior da estufa plástica e no campo, durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate

Como existe uma tela preta fixa (sombrite 50%) nas laterais da estufa plástica ocorreu uma razoável renovação de ar noturno, fazendo com que houvesse perdas energéticas armazenadas durante o dia, propiciando a condensação do vapor de água no interior da estufa aumentando, desta forma a umidade relativa dentro da estufa plástica no período noturno.

A variação da umidade no interior da estufa apresentou valores menores durante o dia (Figura 19), permanecendo inferior aos valores obtidos no ambiente externo mesmo durante o período noturno (Figura 20), exceto para os valores mínimos; esses resultados também foram encontrados por Duarte & Henkel (2004); entretanto Evangelista & Pereira (1999) e Vasquez et al., (2004) encontraram valores de Umidade Relativa em média 3,04% maiores em relação ao ambiente externo.

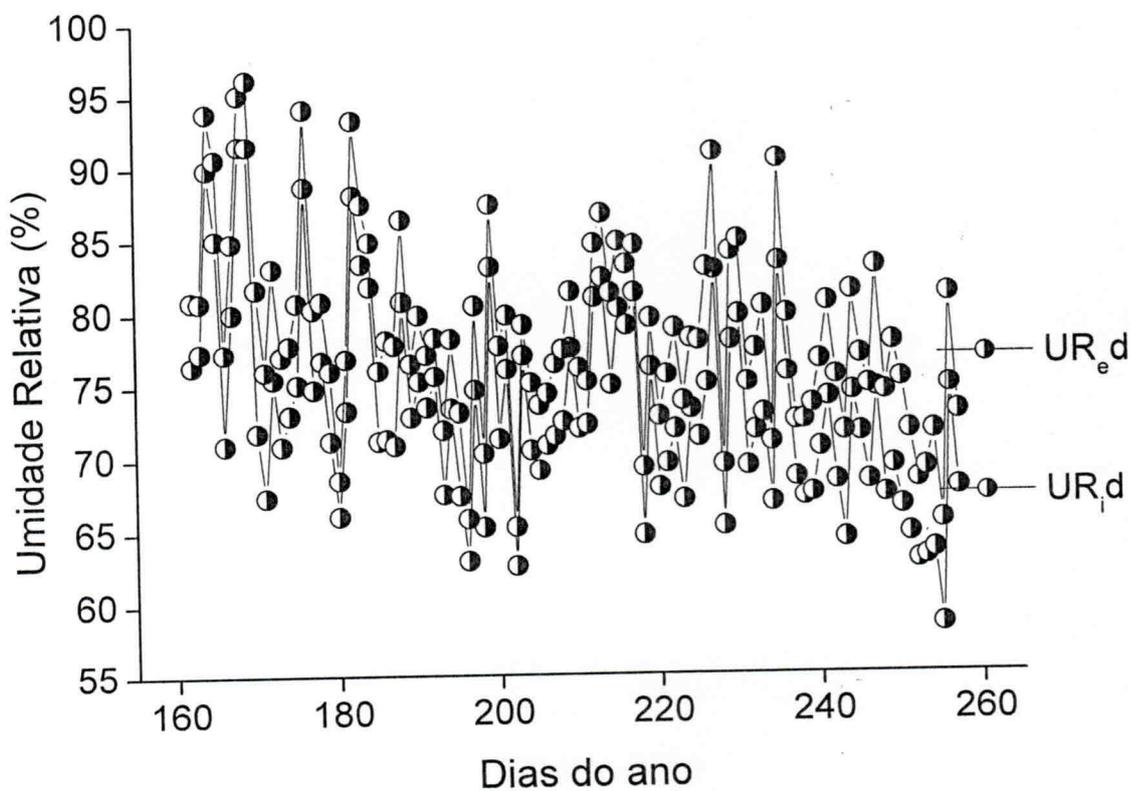


Figura 19. Umidade Relativa diurna no interior da estufa plástica e no campo durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate

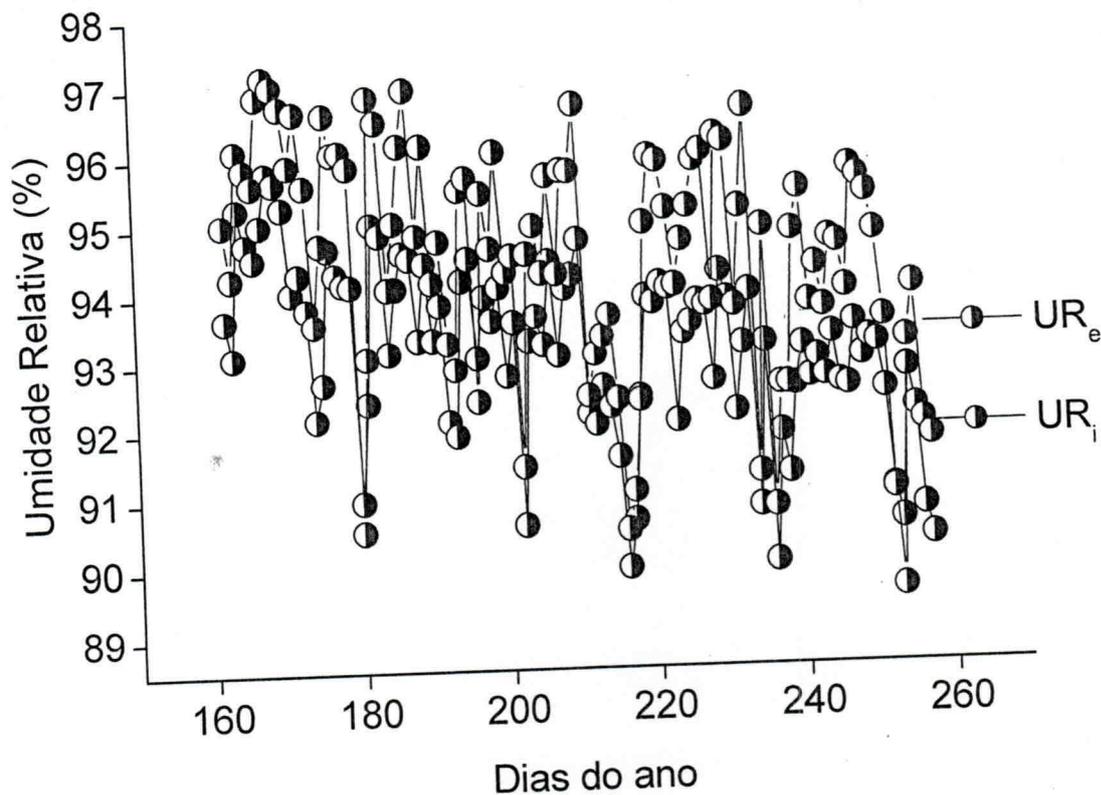


Figura 20. Umidade Relativa noturna encontrada no interior da estufa plástica e no campo durante todo o desenvolvimento da cultura do tomate

4.1.3 Velocidade do vento

Verificou-se que a velocidade do vento dentro do ambiente protegido atingiu um valor máximo de $0,88 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 21) mas se observou também que os valores decresceram chegando a valores mínimos de $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ no período de maturação dos frutos, o que se deu no final do experimento; entretanto, fora do ambiente protegido a velocidade do vento atingiu $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ e os valores sempre estiveram bem acima dos encontrados no ambiente protegido, confirmando os resultados de Furlan & Folegatti (2002) que ressaltaram em seu estudo a importância do controle do vento dentro da estufa para minimizar os efeitos da temperatura.

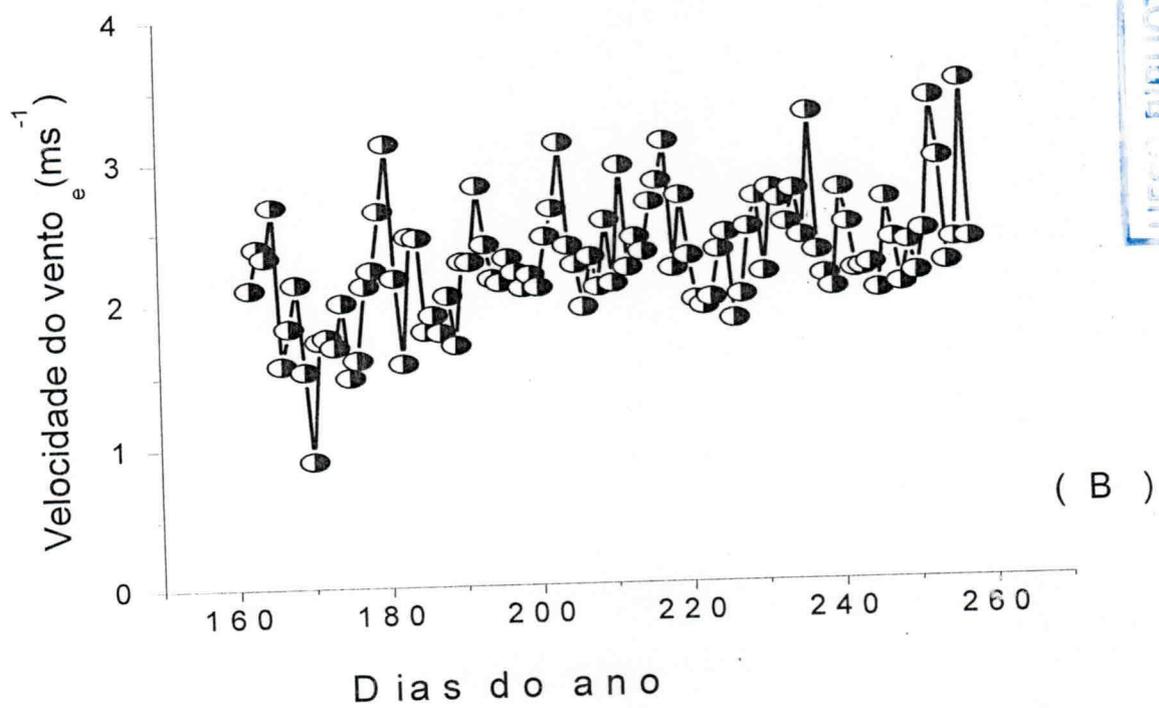
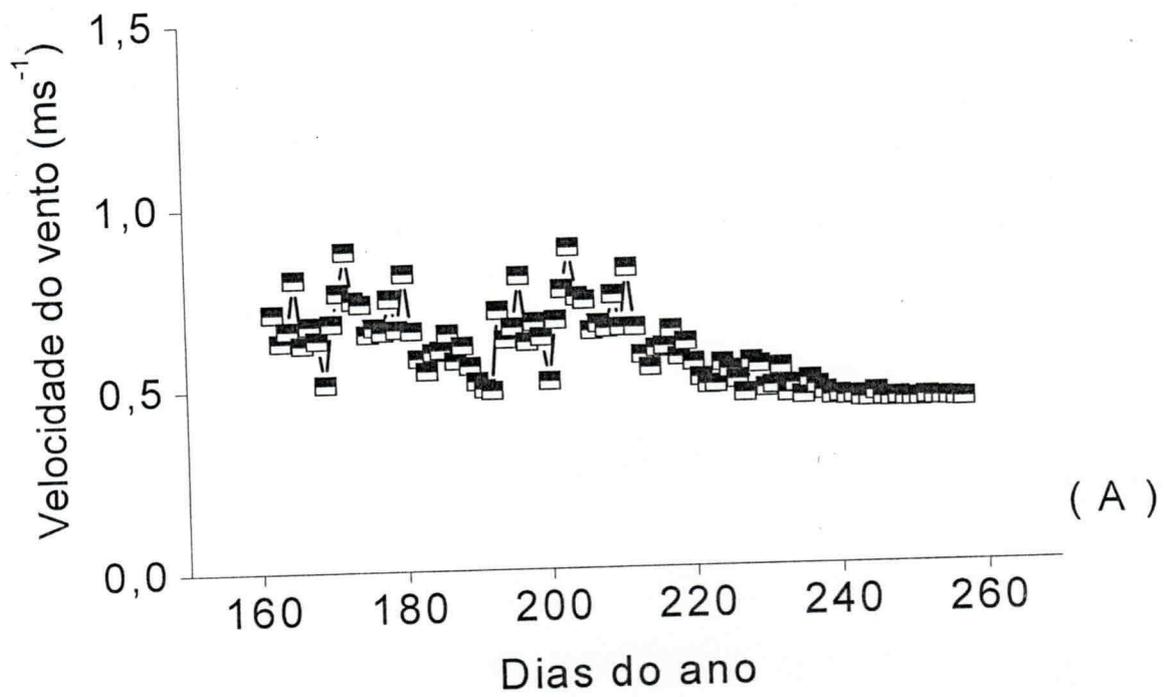


Figura 21. Velocidade do vento diária encontrada no interior da estufa plástica (A) e no campo (B)

4.2 Radiação Solar

Os valores integrados durante o período estudado para a radiação solar global interna (Rgi) foram de 1035,18 MJ. m², com média diária de 12,4 MJ m⁻² e os valores de radiação solar global externa (Rge) foram de 1629,34 MJ m⁻², com média diária de 16,97 MJ m⁻².

A Rgi apresentou alta variação nos primeiros 30 dias, com valores entre 14,0 MJ m⁻² e 2,0 MJ m⁻² (Figura 22A); após este período, deu-se um aumento gradativo com variações menores entre a máxima e a mínima, dos 31 aos 60 dias.

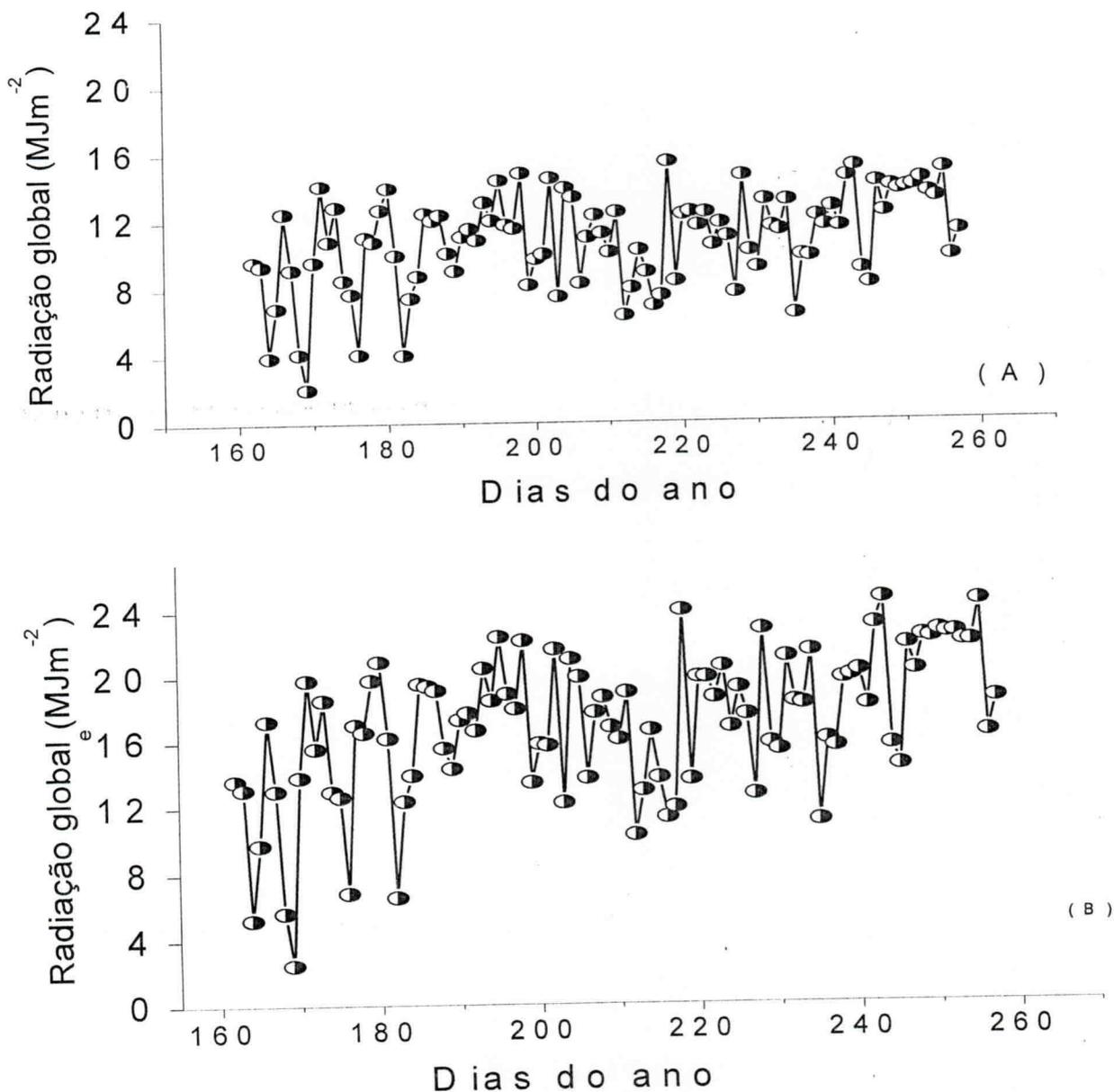


Figura 22. Radiação solar global diária no interior da estufa plástica (A) e no campo (B)

Para Sandri et al., (2003), os valores limítrofes de radiação para as culturas hortícolas se encontram em média diária de $8,4 \text{ MJ m}^{-2}$. Embora a R_{gi} tenha atingido, na 1ª semana após o transplante, valores bem menores que os já citados, a temperatura média esteve sempre em torno de 25°C não interferindo no desenvolvimento das plantas. Comparando-se a Radiação global externa (R_{ge}) e a Radiação global interna (R_{gi}) percebe-se que a R_{ge} atingiu um valor mínimo de 2 MJ m^{-2} , valor este que ficou bem próximo do obtido dentro do ambiente protegido, que foi de $2,2 \text{ MJ m}^{-2}$; entretanto, os valores máximos de radiação no ambiente externo (Figura 22 B) atingiram valores bem maiores que os de dentro da estufa plástica, $24 \text{ MJ. m}^{-2} \text{ dia}$ e $15,42 \text{ MJ.m}^{-2} \text{ dia}$, respectivamente. A relação R_{gi} e R_{ge} permaneceu constante todo o ciclo com transmissividade de 63,5%, indicando, portanto, mostrando redução de 36,5%, provocada pela cobertura de polietileno.

Sandri et al (2003) trabalhando com a cultura do tomate em estufa plástica no Rio Grande do Sul, encontraram valores de R_g média diária de $12,4 \text{ MJ m}^{-2}$ e um acumulado de $1362,6 \text{ MJ m}^{-2}$, devido à redução da transmissividade de radiação solar global em até 83%.

A equação de regressão (Figura 23) foi obtida relacionando-se Radiação global interna (R_{gi}) e Radiação global externa (R_{ge}) com a seguinte equação: $R_{gi} = 0.623 R_{ge}$, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0.96$; este coeficiente mostrou ser uma boa relação para estimativa do R_{gi} a partir do R_{ge} .

Alguns estudos têm comprovado que a Radiação global no interior de casas de vegetação é menor que no ambiente externo mas, em contrapartida, ocorre uma relação maior entre saldo de radiação/radiação global no ambiente interno (Frisina & Escobedo, 1999; Galvani et al., 2001; Cunha et al., 2002) explicado pelo efeito da contra-irradiação da cobertura, especialmente de onda longa, que reduz a perda de energia ao longo do dia, sendo mais pronunciado durante a noite. O saldo de radiação ainda é afetado pelo estágio da cultura, ligado principalmente ao aumento do índice de área foliar, que aumenta a porção da radiação interceptada e reduz a porção que atinge o solo.

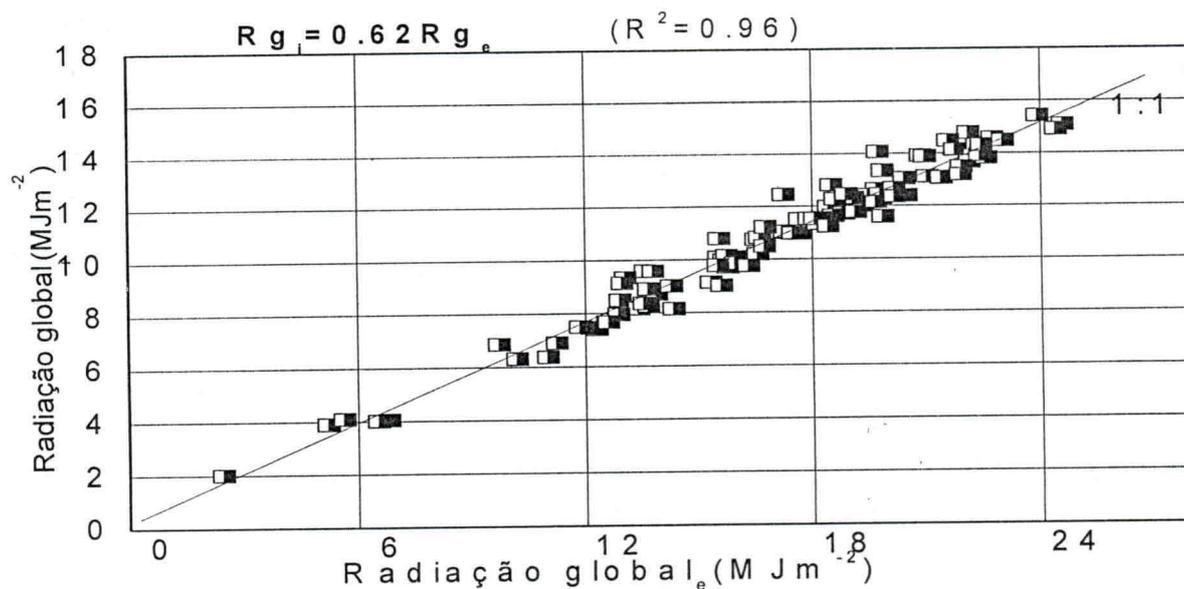


Figura 23. Razão entre Radiação solar global no interior da estufa e fora do ambiente protegido .

O saldo de radiação total encontrado no ambiente protegido foi de $615,53 \text{ MJ m}^{-2}$, representando em termos energéticos de 60% da componente da Radiação solar global (Figura 24); esses resultados estão de acordo com Galvani et al., (2001) que encontraram uma relação de R_n de 61,2% de R_g dentro do ambiente protegido, cultivado com pepineiro.

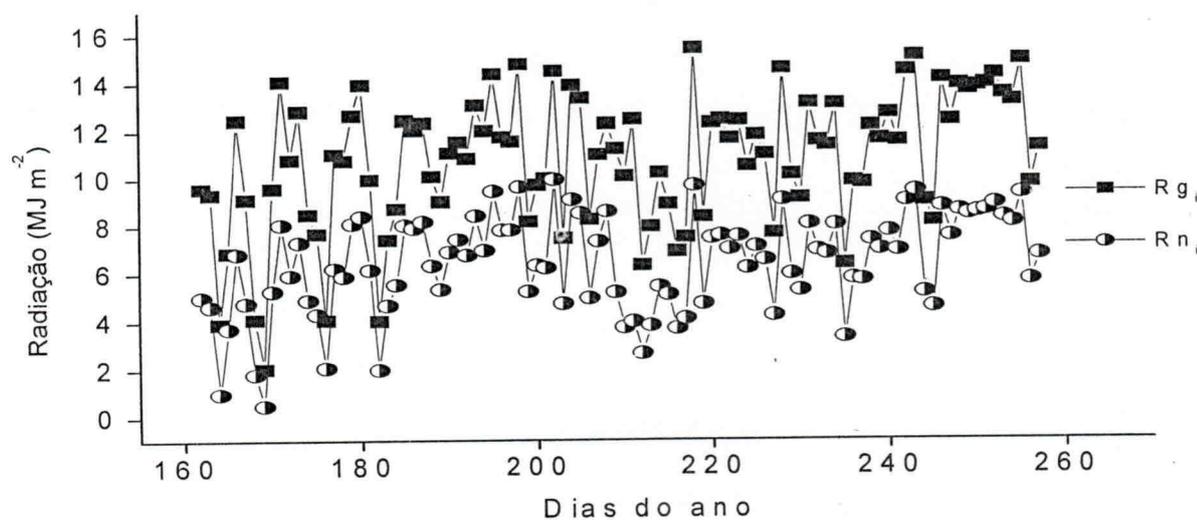


Figura 24. Saldo de radiação e radiação global interna no período experimental.

Durante o período de medições a razão entre o saldo de radiação e a radiação solar global (R_n/R_g) variou entre 0,6478 - 0,2418. A equação de regressão (Figura 25) foi obtida relacionando-se o saldo de radiação e a radiação solar global com a seguinte equação: $R_n = 0,6015R_g$, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,92$.

Segundo alguns autores (Toledo, 2001; Atarassi 2003), o coeficiente de determinação é sempre acima do 0,9, quando se relacionam saldo radiação e radiação global, mostrando ser uma boa relação para estimativa do R_n a partir do R_g .

Observa-se que a fração de radiação solar global transformada em energia disponível ao sistema, ou seja, o saldo de radiação, apresenta uma distribuição regular e um valor médio de $0,5819 \pm 0,08$, alcançando valor máximo de 0,70, ocorrido na fase de frutificação aos 45 dias após o transplante. Sendo que os menores valores ocorreram nos primeiros dias do experimento no ambiente protegido.

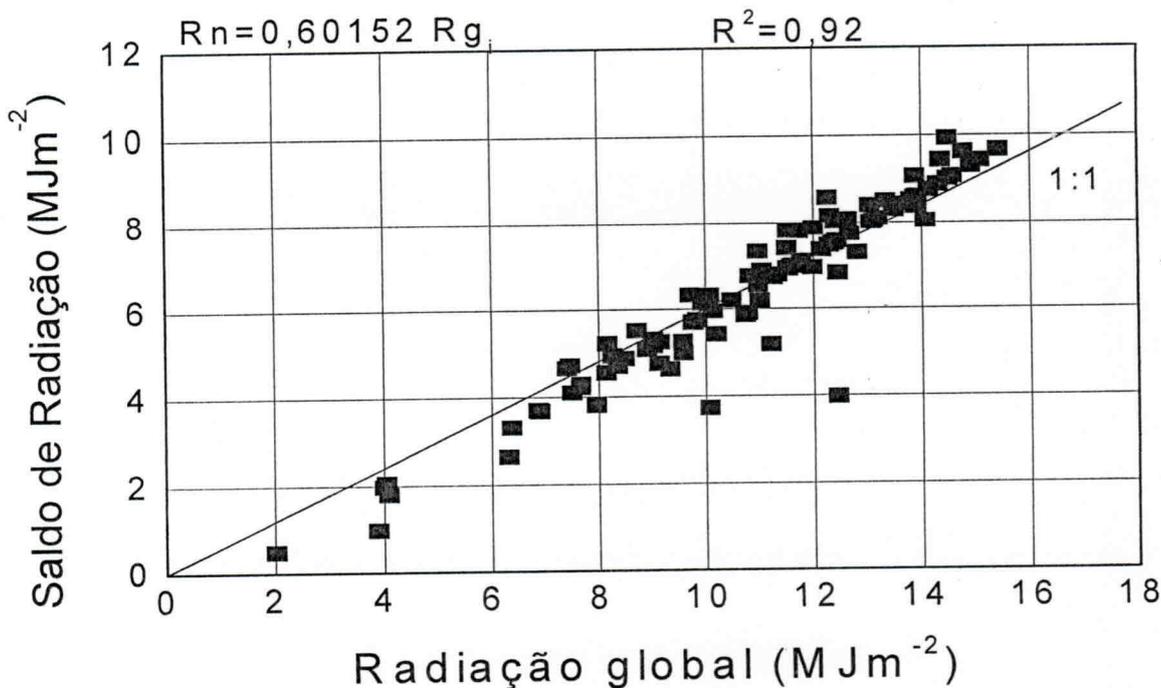


Figura 25. Relação entre saldo de radiação e radiação solar global no interior do ambiente protegido

A radiação refletida está apresentada na Figura 26, na qual se notou comportamento similar ao da radiação global. Os valores de radiação refletida interna (Rr) variaram em um intervalo de 0,12 a 2,58 MJ m⁻² cujos totais observados foram de 156,57MJ m⁻² e 1035,176 MJ m⁻² para radiação solar refletida e radiação solar global, respectivamente, apresentando albedo de 14%.

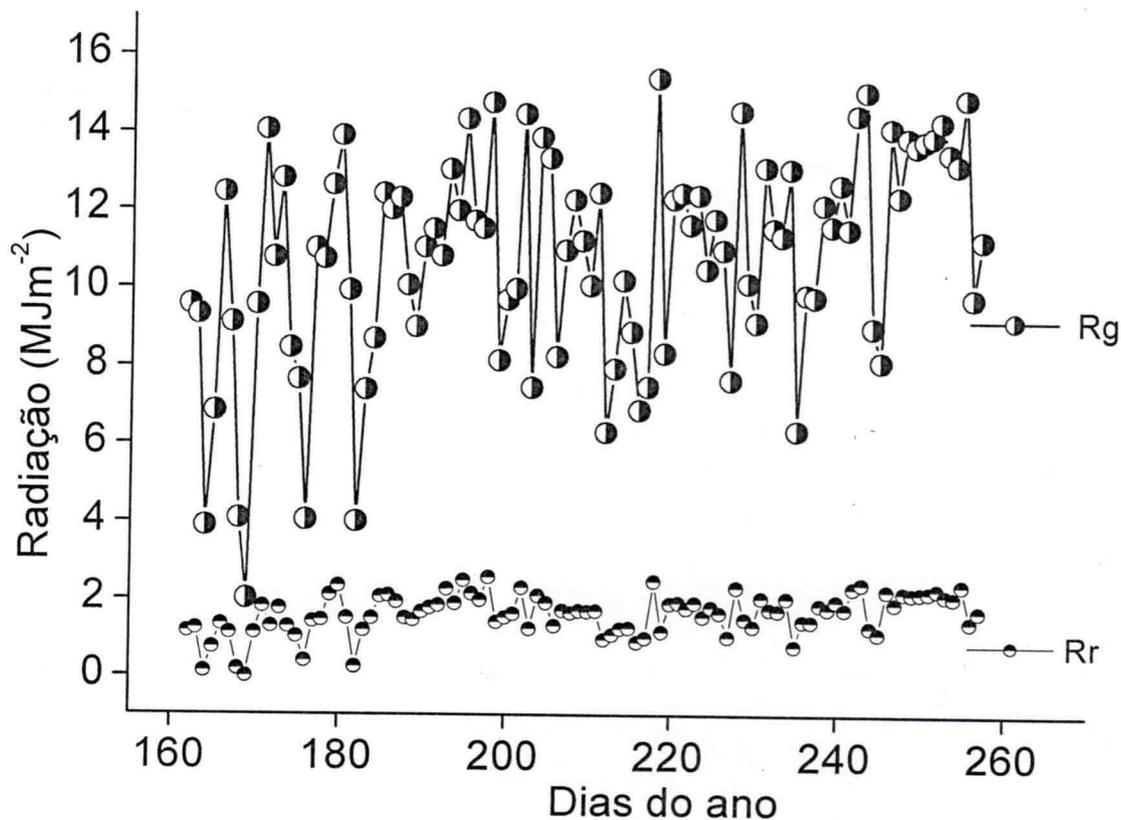


Figura 26. Radiação solar global e refletida no interior da estufa plástica, durante todo o ciclo da cultura do tomateiro

4.2.1. Radiação fotossinteticamente ativa

Os valores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), no interior do ambiente protegido (Figura 27) representam, em média, 45% da radiação solar global (Rg), e 28,4% da Radiação solar global externa, e 75,7% da Rn. (Figura 28)

A absorção da radiação incidente pela cultura depende de seu índice de área foliar (IAF), posição solar, geometria e tamanho da folha mas a eficiência de

conversão decresce gradativamente com o fluxo de radiação solar acima do nível considerado ótimo, podendo ocorrer saturação das folhas superiores. Embora Radin et al., (2003) admitam que o nível de radiação em que ocorre a saturação nas folhas localizadas no interior do dossel é muito mais elevado, e talvez muitas folhas não cheguem a saturação, esses resultados estão de acordo com os encontrados por Guiseline et al., (2004). O conhecimento de pequenas diferenças na transmitância pode exercer efeito significativo no crescimento das culturas.

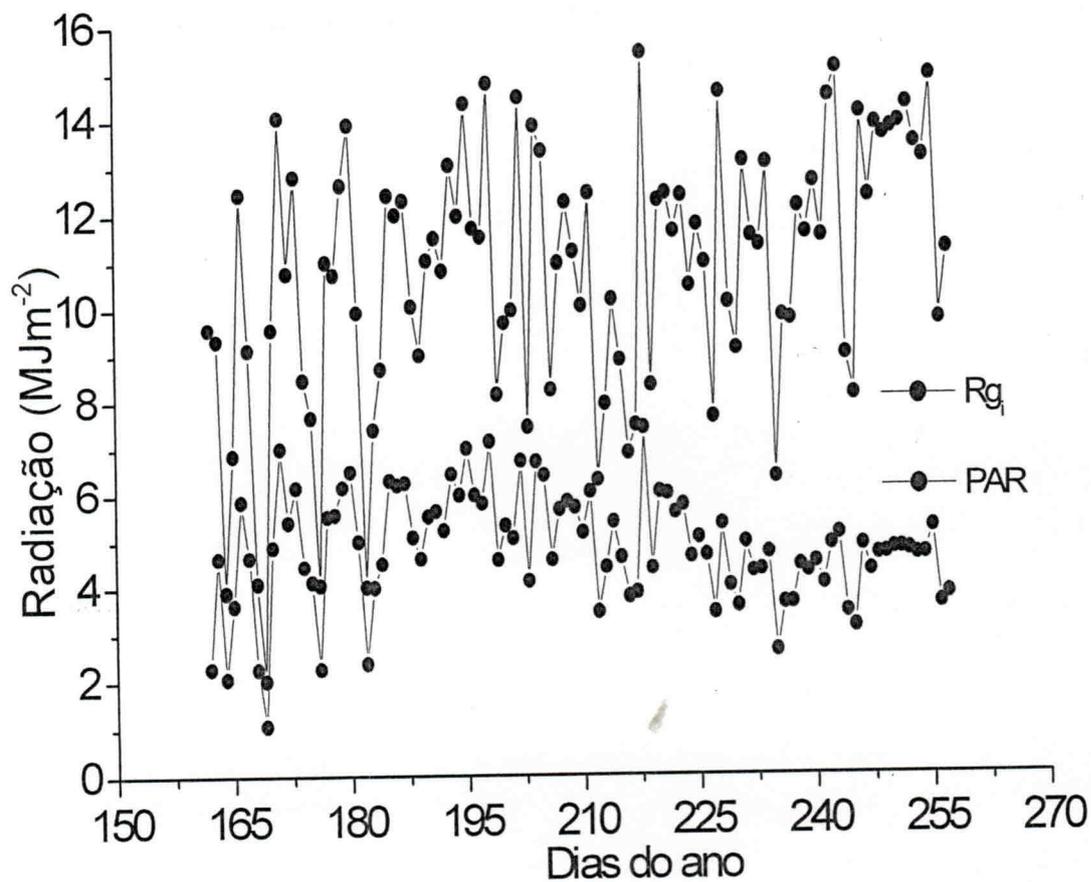


Figura 27. Radiação solar global e PAR no interior do ambiente protegido durante todo o ciclo do tomateiro

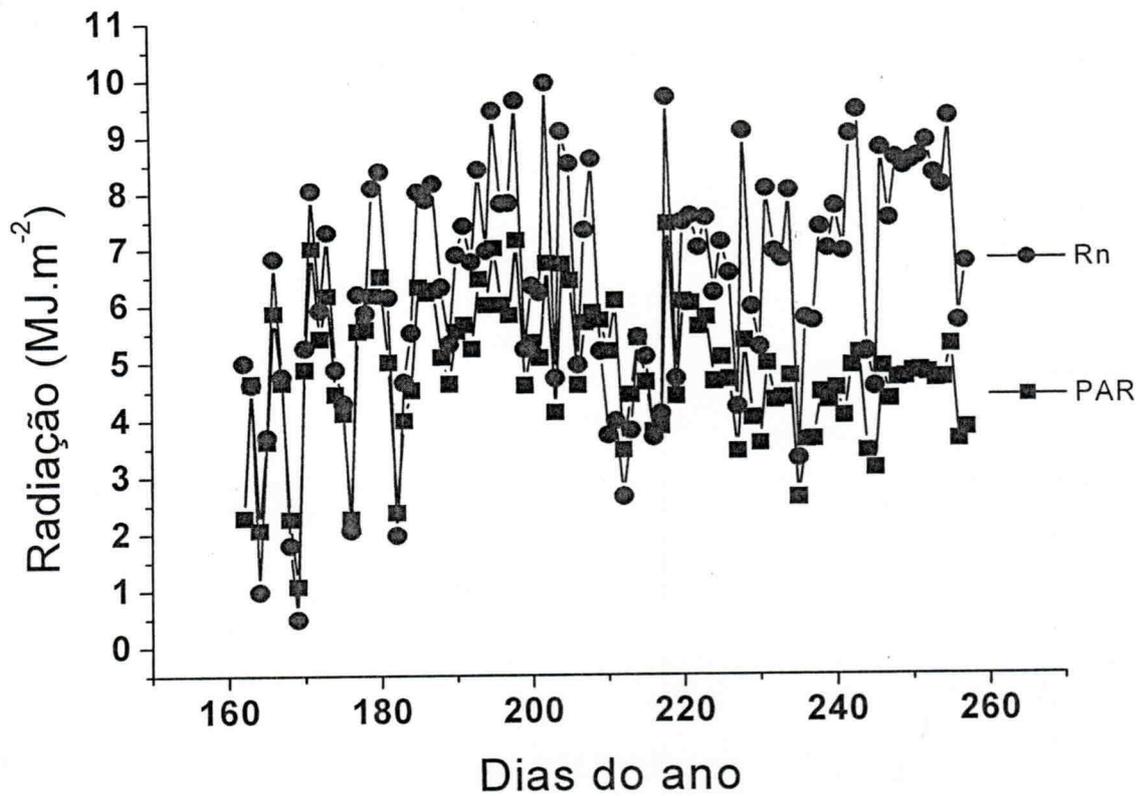


Figura 28. Radiação solar global e PAR no interior do ambiente protegido durante todo o ciclo do tomateiro

Na Figura 29 estão apresentados, a razão entre os valores de PAR e R_{gi} , em que se pode observar que os valores estão mais próximos no início da reta e vão apresentando um afastamento da reta 1:1 no final do período experimental, quando os valores de R_{gi} foram maiores que 12 MJ m^{-2} . $PAR = 0,44R_g$ e $R^2 = 0,61$. A relação da PAR e R_g externa encontra-se na Figura 30, observando-se o maior dispersão dos valores da reta e $PAR = 0,27R_g$ e um $R^2 = 0,52$ indicando, como esperado, um valor menor.

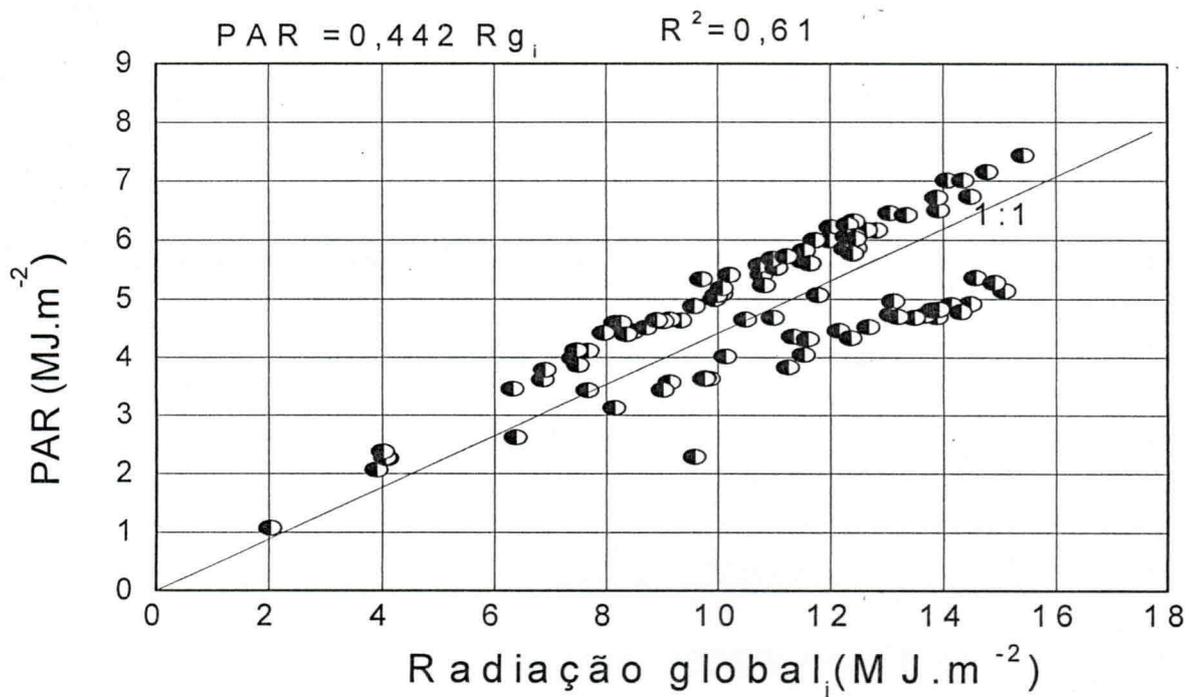


Figura 29. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa diária (PAR) e a Radiação solar global interna

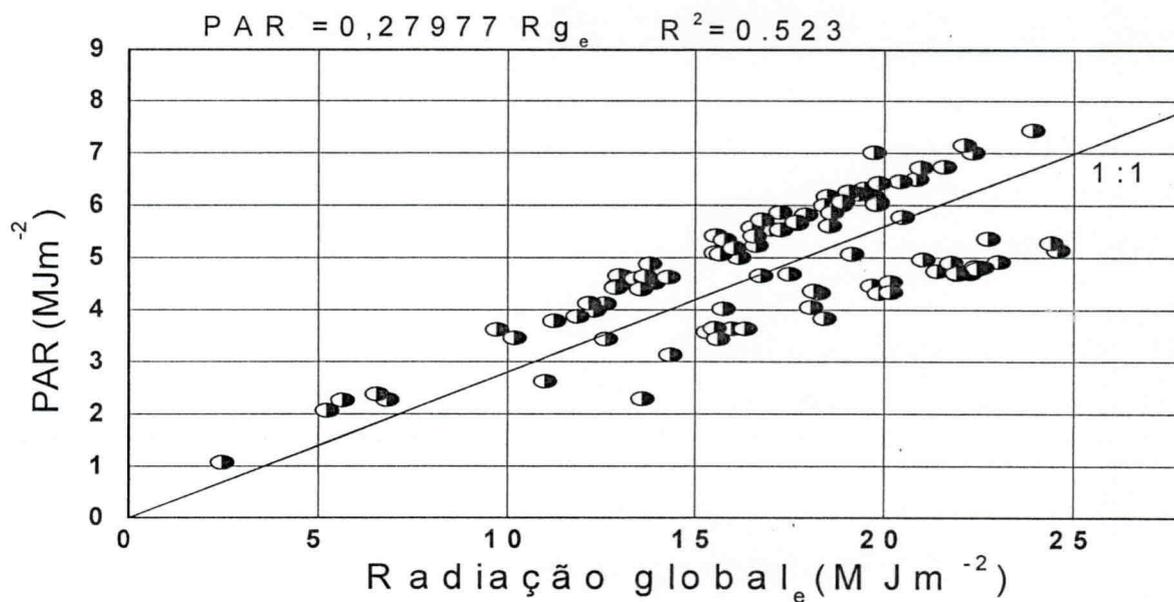


Figura 30. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa diária (PAR) e a radiação solar global diária externa, durante o ciclo do tomateiro

Apresentam-se, na Figura 31 estão apresentados à razão entre os valores de PAR e o saldo de radiação. Os valores encontrados mostraram pequena dispersão nos primeiros dias e se aproximam da reta 1:1, mais próximos quando o saldo de radiação está entre $4,5 \text{ MJ m}^{-2}$ e $6,5 \text{ MJ m}^{-2}$ e vão indicando afastamento da reta a partir desses valores. A eficiência de conversão decresce gradualmente com o aumento do fluxo de radiação solar e pode ocorrer saturação das folhas localizadas no interior do dossel.

O coeficiente angular da equação representa a eficiência do uso da PAR. O baixo valor de $R^2 = 0,57$ provavelmente está ligado ao fato do IAF encontrado ter, sido em média, de 0,6; de acordo com Radin et al., (2003) a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa observada em tomateiro aumentou com o aumento do índice de IAF., atingindo uma eficiência de 70% quando $\text{IAF} = 2$.

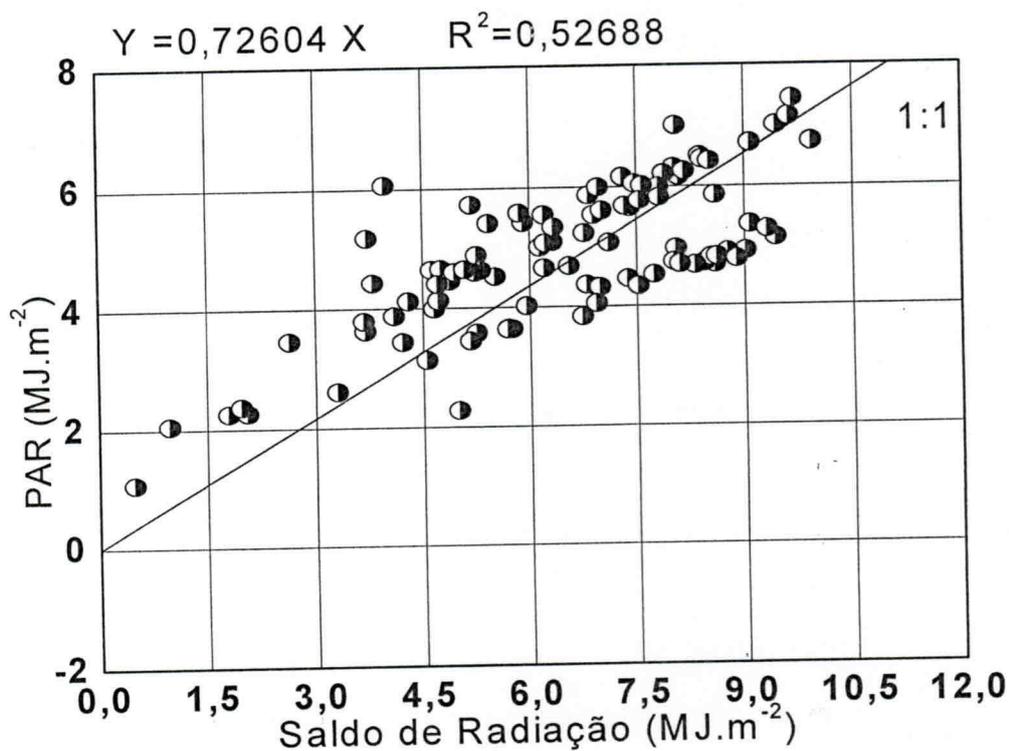


Figura 31. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa diária (PAR) e o Saldo de radiação solar diária externa durante todo o ciclo do tomateiro

4.3 Balanço de Energia

Com objetivo de avaliar o uso dos métodos Penman - Monteith e Razão de Bowen na determinação dos fluxos na fase vegetativa, reprodutiva e maturação da cultura do tomate, se analisaram os dados dos dias 162 a 257 (11/06 a 16/09), em que na Tabela 3 se apresentam os dados de saldo de radiação, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente além da razão entre os valores de fluxo de calor latente e saldo de radiação (LE/Rn) e o fluxo de calor latente e saldo de radiação (H/Rn), pelos métodos de Bowen e Penman - Monteith. Observa-se que, em média, o saldo de radiação (Rn) foi consumido em 71 e 66% para fluxos de calor latente para o métodos de Bowen e Penman - Monteith, respectivamente, considerando-se todo o período estudado; a energia consumida foi de 29 e 34% para fluxos de calor sensível; esses valores estão abaixo dos encontrados por Cunha et al., (2002) que obteve valores de calor latente de 80% e fluxo de calor sensível de 10% para cultura do pimenteira em ambiente protegido.

Tabela 3. Partição do balanço de energia de saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e razão entre os fluxos de saldo de radiação em cultivo protegido durante o ciclo da cultura do tomate

Métodos	Partição		Razão	
	LE	H	LE/Rn	H/Rn
	(MJ. M ² /ciclo)			
Penman-Monteith	434,79	181,70	0,71	0,29
Bowen	403,76	211,77	0,66	0,34

4.3.1 Variação diária dos componentes de balanço de Energia

Constatou-se, que a fração de radiação solar global transformada em energia disponível ao sistema, ou seja, saldo de radiação (R_n/R_g) apresenta distribuição (Figura 32) regular, alcançando valor médio de 0,58 e valor máximo de 0,7 alcançado no dia 237 (25/08) e o valor mínimo foi de 0,24 no dia 164 (13/06); observou-se ainda que a maior porção do saldo de radiação foi utilizada como fluxo de calor latente (LE), e que LE/R_n apresentou um valor médio de $0,70 \pm 0,045$, para todo o período do experimento, enquanto os menores valores foram encontrados na primeira semana logo após o transplante (0,57), ocasião em que o solo se encontrava sem cobertura vegetal, ocorrendo novamente após 15 dias (0,59).

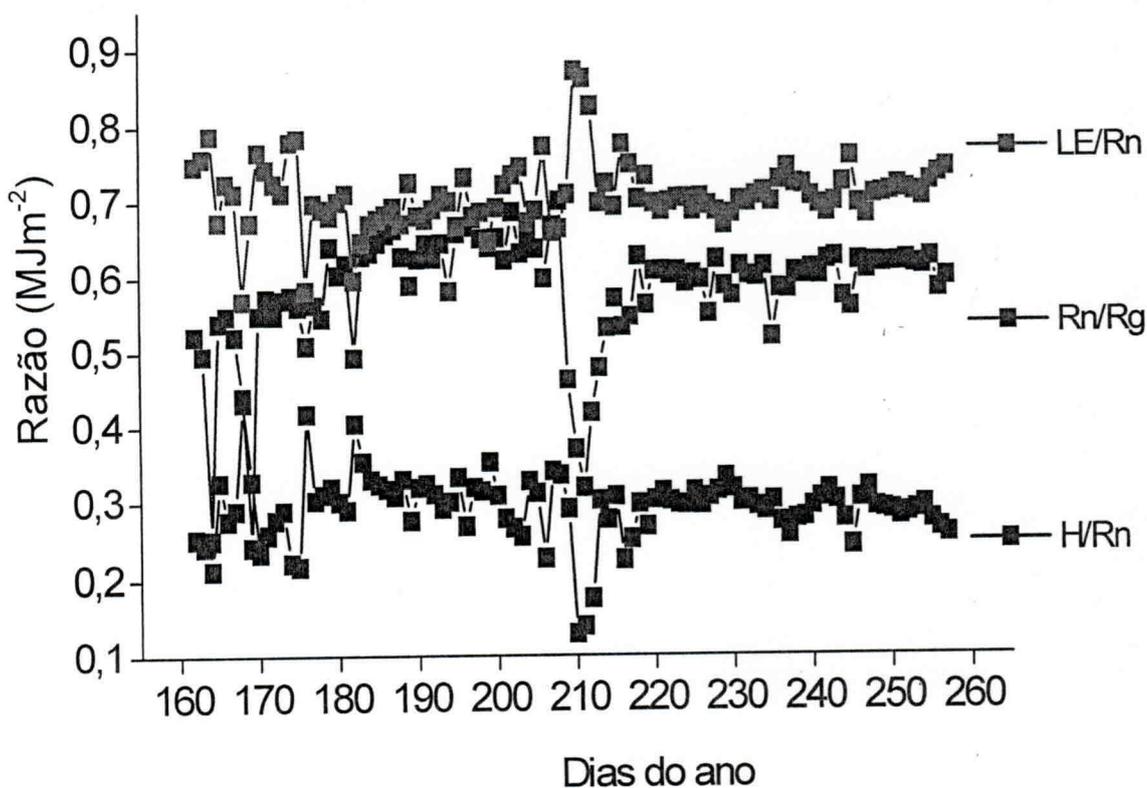


Figura 32. Variação diária da razão entre o saldo de radiação (R_n) e a radiação global (R_g), e entre o saldo de radiação e fluxos de calor latente (LE), sensível (H) no interior da estufa, pelo método de Penman-Monteith

O valor médio do saldo de radiação (Rn) utilizado como fluxo de calor sensível (H), isto é, H/Rn no período estudado foi de $0.30 \pm 0,049$ e valor máximo de 0.432, no dia 17 de junho no início do cultivo, ocorrendo justamente nos períodos em que a relação LE/Rn foi menor; constatou-se, ainda, no dia 176 (25/06) e em 182 (1/07) a ocorrência de uma fase de estabilização aos trinta dias após o transplante, em torno de 0,3 para, em seguida, no dia 210 ocorrer uma queda brusca que atingiu o valor mínimo de 0,12; nota-se então um aumento e estabilização até o final do ciclo da cultura.

Na Figura 33 as variações do fluxo de calor latente (LE) seguem as variações do saldo de radiação (Rn) independente do dia observado, o que pode indicar que a estimativa dos valores de radiação sobre a cultura permite que se determine o consumo hídrico da cultura, e conseqüentemente, seu manejo.

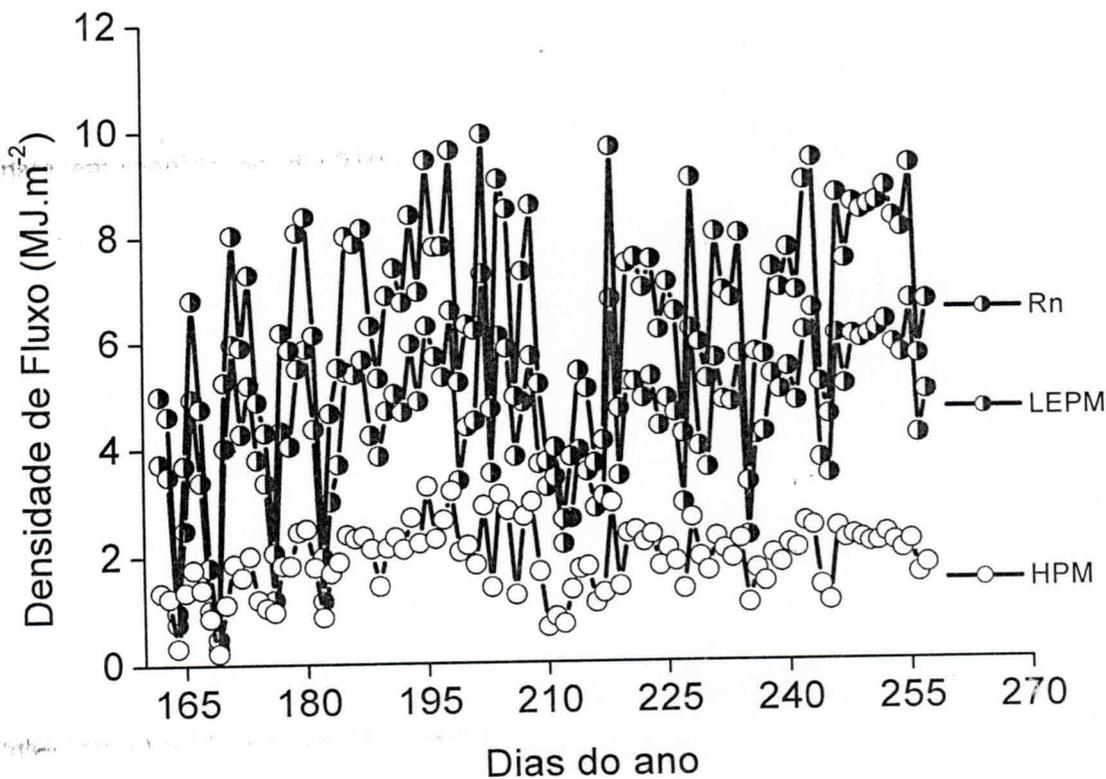


Figura 33. Variação do saldo de radiação (Rn) diária, e fluxos de calor latente (LE), sensível (H) no interior da estufa, na cultura do tomate caqui

A razão entre o fluxo de calor latente e o saldo de radiação, apresentou uma equação da reta (Figura 34) da seguinte forma: $LE = 1,41789 R_n$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$.

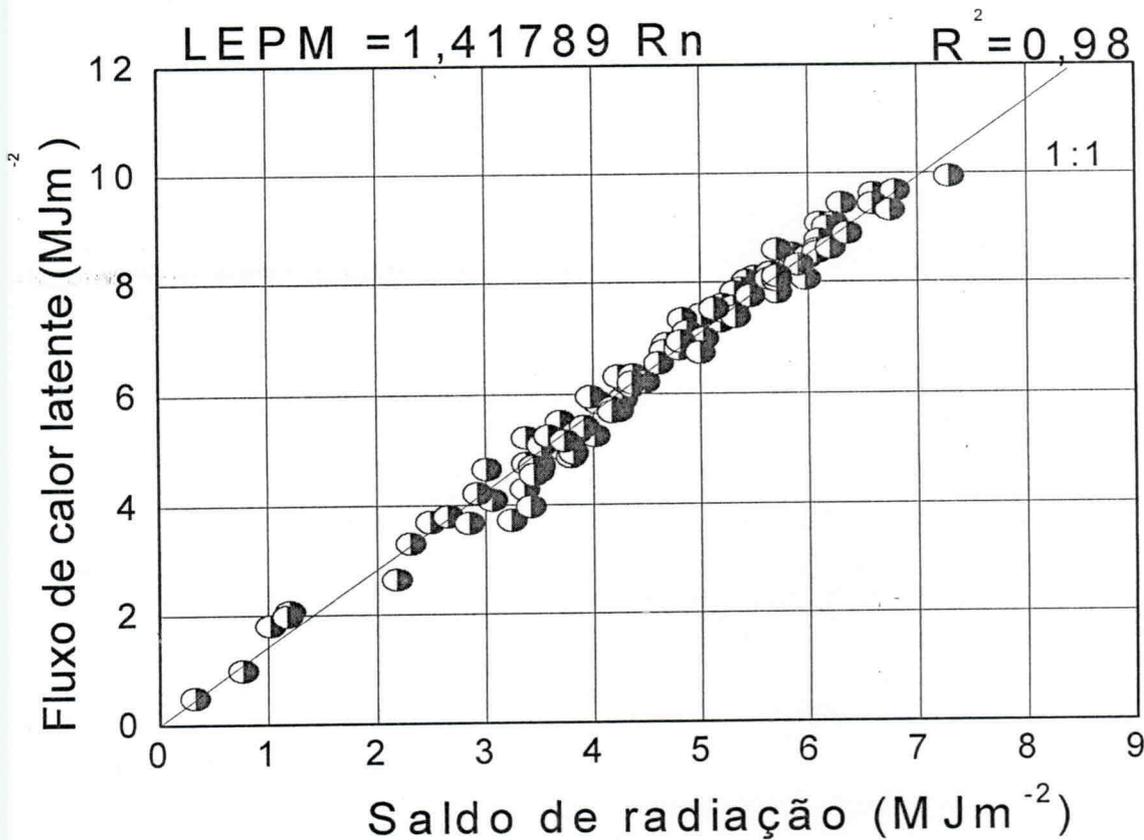


Figura 34. Razão entre saldo de radiação e fluxo de calor latente calculado pelo método de Penman-Monteith, no interior da estufa

4.3.2 Variação horária do saldo de radiação dos fluxos de calor latente de calor sensível obtidos pelos métodos de Bowen e Penman - Monteith

Com o objetivo de se comparar os dados encontrados pelos métodos Bowen e de Penman-Monteith, agruparam-se os dados a cada dez dias, para uma análise mais precisa.

Os valores de fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) determinados pelos dois métodos, estão apresentados a seguir.

Observou-se, no período entre 162-172 (11/06 a 21/06) tempo período no qual a cultura se encontrava com baixo porte e na sua fase vegetativa, na qual ocorreu excelente concordância de LE*B e LE*PM, porém o H*B se apresentou inferior na maioria dos dias e ultrapassou os valores de H*PM no final do período (Figura 35A); na semana seguinte, entre 174-183, o saldo de radiação indicou forte queda, atingindo valores menores que 2 MJ. m^{-2} (Figura 35B); segundo Lima (2004), isto ocorre quando o solo se encontra com alto valor de umidade.

O LE*PM mostrou pequena variação em relação ao LE*B, permanecendo sempre com os valores inferiores aos encontrados pelo método de Bowen; notou-se o inverso para os valores de H*PM que apresentaram valores maiores que os de H*B, durante esta fase.

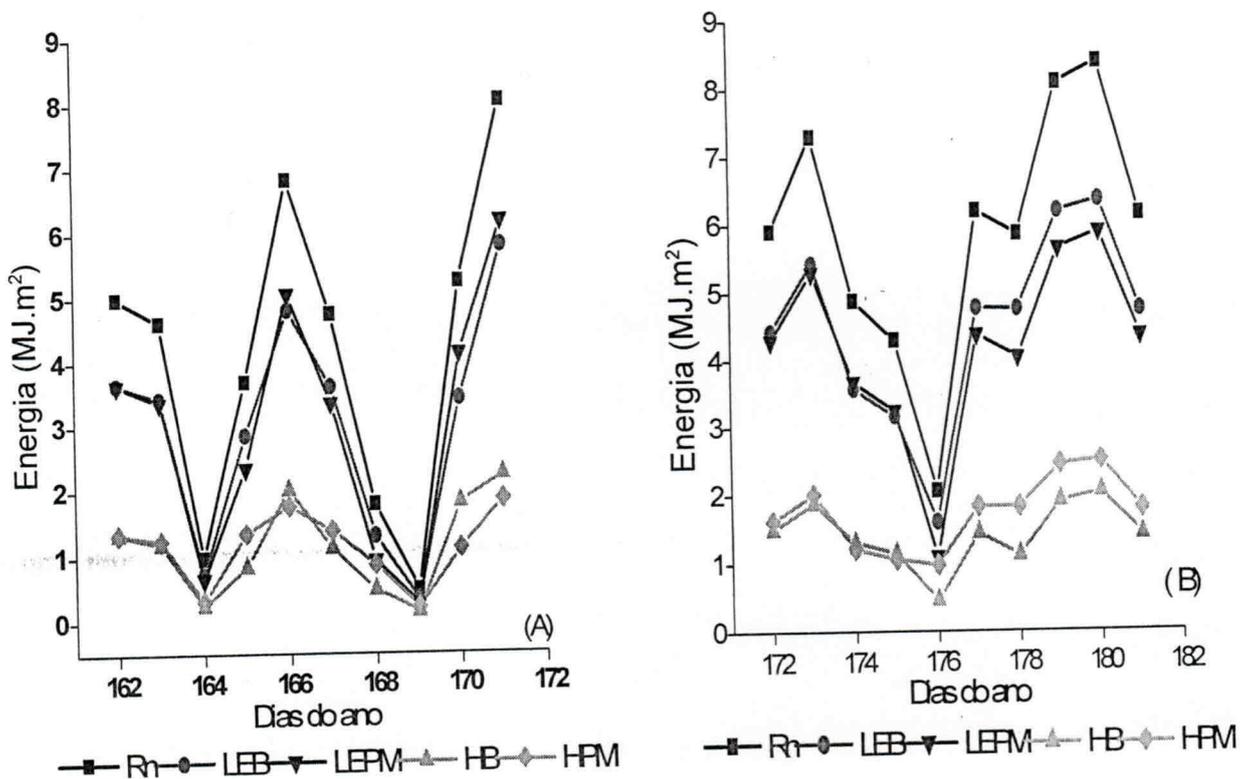


Figura 35. Comportamento do balanço de energia nos períodos de 162-171 e 172-181 calculado pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith

A partir do dia 182-191 (Figura 36A) o saldo de radiação apresenta aumento partindo de valores muito baixo e atingiu 8 MJ. m^{-2} ; neste período, os valores

de calor sensível H^*B e H^*PM chegaram a atingir 2 MJ. m^{-2} e ambos mostraram aumento, chegando a atingir 25% da energia disponível; até então, havia boa concordância entre os métodos.

Na semana seguinte (192-201), o saldo de radiação apresentou forte variação diária mas não a concordância entre os métodos não foi boa, sobretudo para o H^*b e H^*PM (Figura 30 b).

Na semana seguinte, o fluxo de calor sensível apresentou variação semelhante em ambos os métodos, com boa correlação, porém os valores de H^*B foram, na maioria dos dias, maiores que os de H^*PM

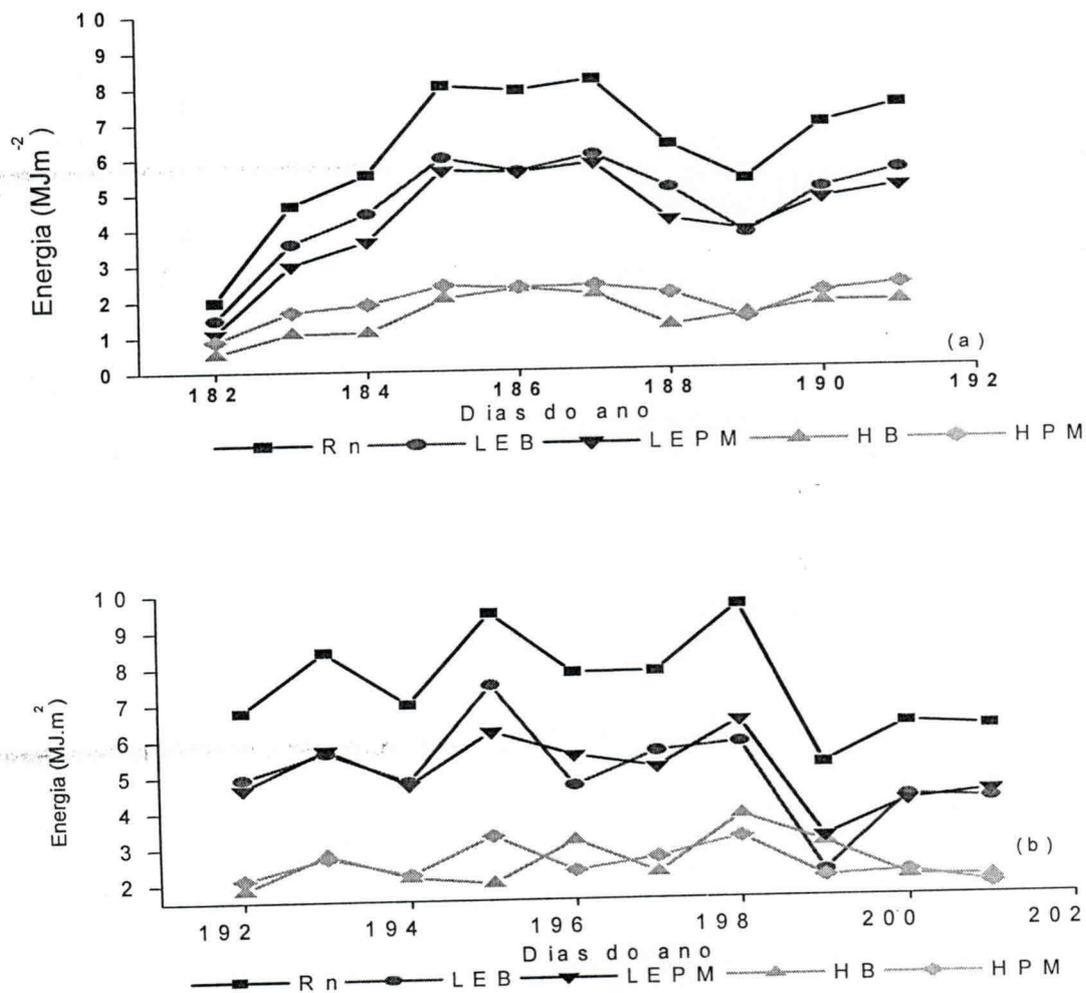


Figura 36. Componentes do balanço de energia nos períodos de 183-191 e 192 -201 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith

A Figura 37 a. mostra a semana de 202-211, que começa com um valor de saldo de radiação bem baixo, de apenas $2,5 \text{ MJ m}^{-2}$; neste dia, os dois métodos apresentaram os mesmos valores, porém, quando a radiação começa a subir, o LE*B acompanha bem de perto o saldo de radiação, o que não ocorre com LE*PM que sobe gradativamente; entretanto, este comportamento muda nos dias seguintes quando LE*PM apresentou, sempre, valor maior e decresceu nos dias 221-222.

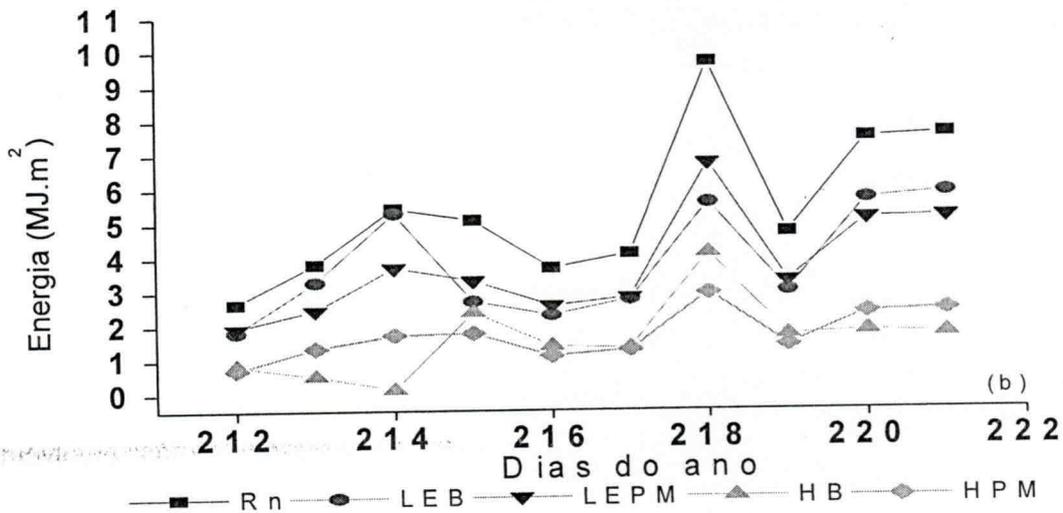
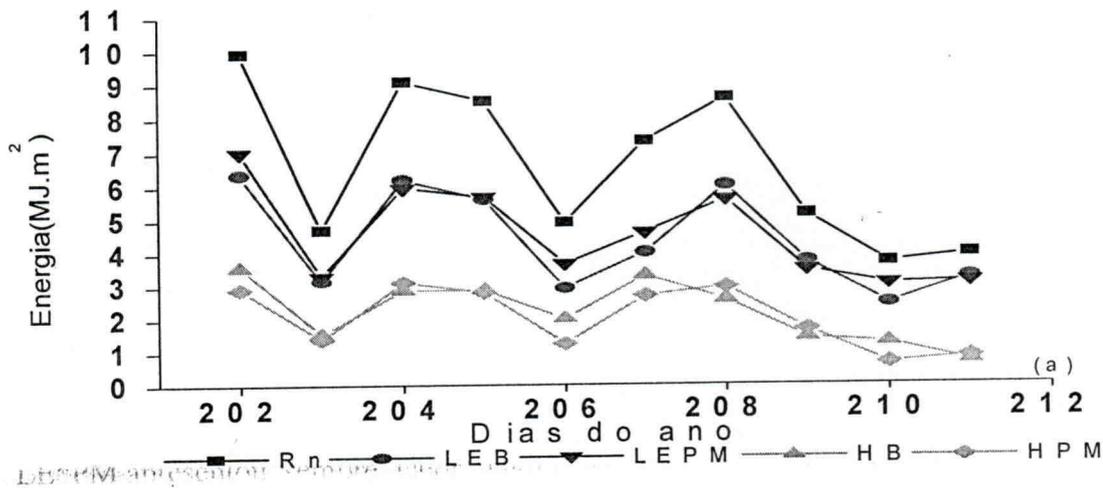
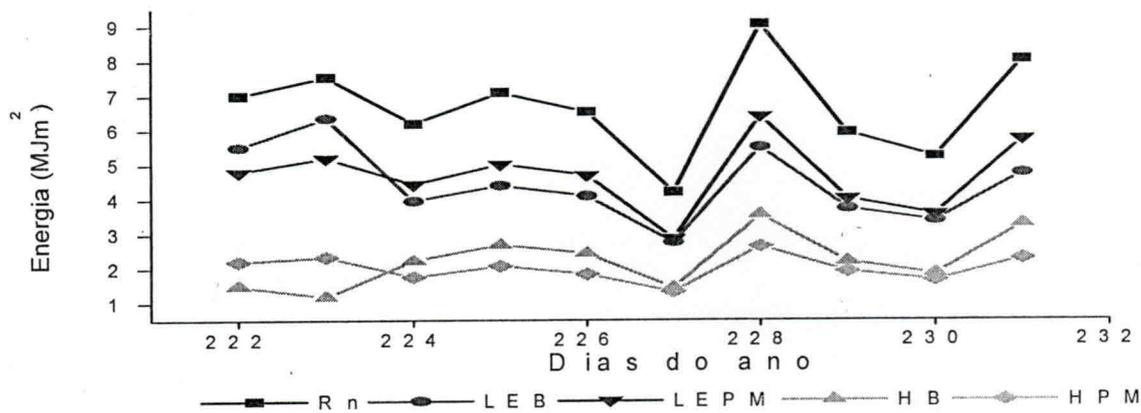


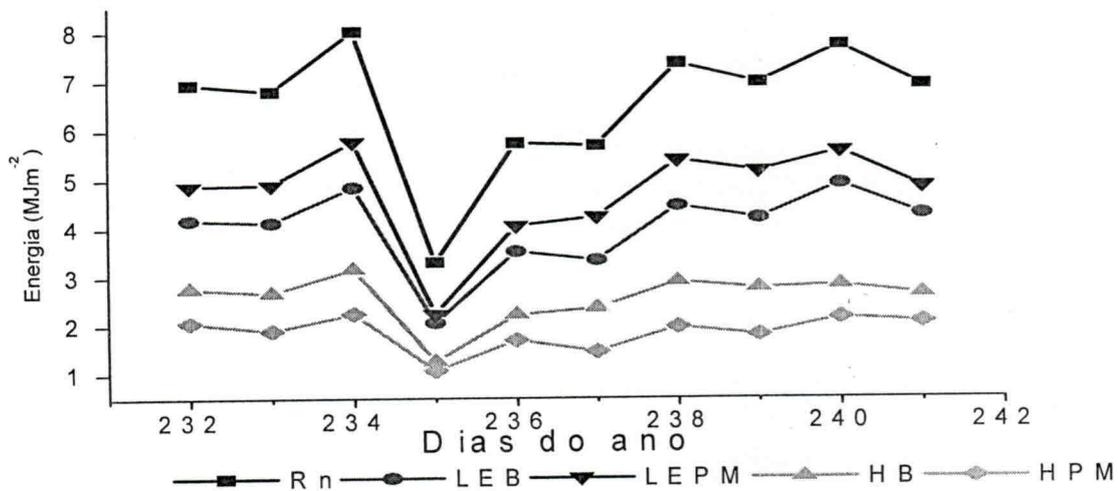
Figura 37. Componentes do balanço de energia nos períodos de 202-211 e 212-221 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith

Observa-se que a partir do dia 223-232 (Figura 38 a) o saldo de radiação variou de 5-7 MJ. m⁻²; neste período, os valores de calor sensível H*B e H*PM chegam a atingir 2 MJ m⁻²; até então havia apenas uma boa concordância entre os métodos; ambos apresentaram um aumento chegando a atingir 25% da energia disponível; no período de 21 -31 agosto (Figura 38 b) o saldo de radiação mostrou forte variação no dia 235, porém se deu uma boa concordância entre os métodos, para LE*B e LE*PM e , principalmente, para o H*b e H*PM.

Os dias que seguem até 16 de setembro apresentaram boa concordância entre os valores encontrados pelos dois métodos, como mostra Figura 39 a e b.



CIUC OS VAARCS ETRUBHEDOS DESIN DEDIN



DETRUBEDO - DEVE DEDIN DEDIN DEDIN

Figura 38. Componentes do balanço de energia nos períodos de 222-232 e 233-242, calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith

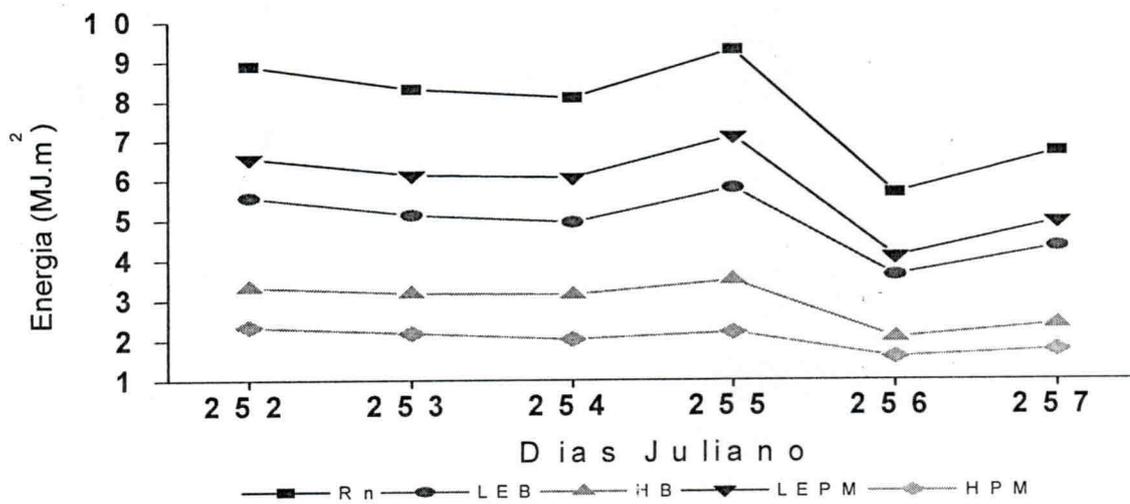
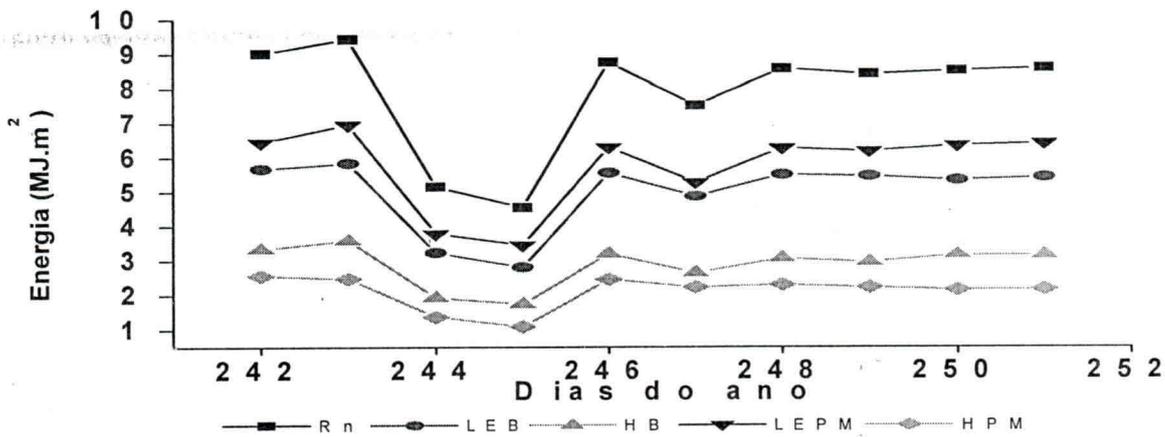


Figura 39. Componentes do balanço de energia nos períodos de 243-251 e 252-257 calculados pelos métodos de Razão de Bowen e Penman-Monteith

4.3.3 - Determinação diária do saldo de radiação do fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível, obtidos pelos métodos de Bowen e Penman - Monteith

As comparações do fluxo de calor latente e calor sensível pelos métodos de Penman-Monteith (LE*PM) e pelo método de Bowen (LE*B) são apresentadas na

Figura 40, com um grau de correlação $R^2 = 0,69$; vê-se que a maior parte dos valores de fluxo de calor latente está próximo da linha, e esses valores são parecidos, mostrando que existiu concordância entre LE^*PM e LE^*B . A densidade de fluxo de calor latente estimada por Penman-Monteith, variou 56,8 a 87,1% do saldo de radiação e LE/R_n apresentou média de 0,7 e Razão de Bowen de 85,3.

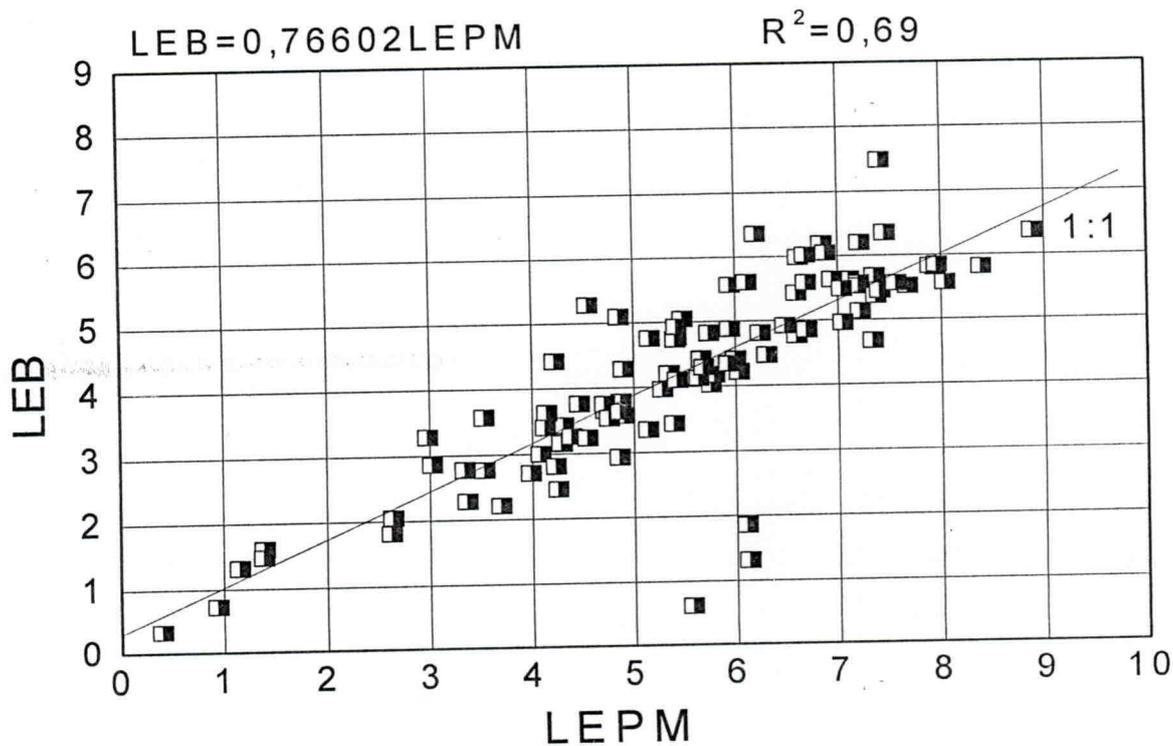


Figura 40. Variação diurna da razão fluxos de calor latente (LE), determinados pelos métodos LE^*B e LE^*PM no interior da estufa na cultura do tomate caqui

Os valores estimados pelo método e razão Bowen ficam em torno de 13% do saldo de radiação enquanto os valores absolutos de LE^* de PM atingiram máximo de $8,89 \text{ MJ. m}^2$ aos 49 dias após o transplantio. Na Figura 41 se apresentam os valores de calor sensível (H^*) obtidos por diferença, entre o LE e R_n .

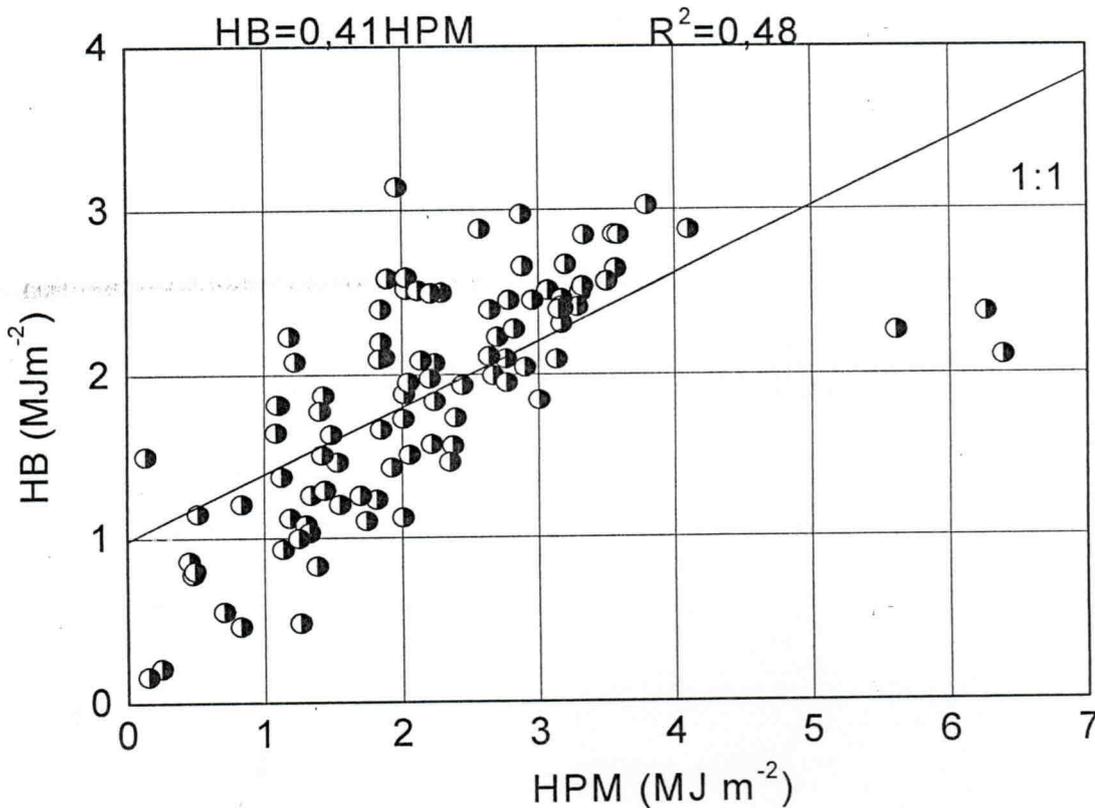


Figura 41. Variação diurna da razão fluxos de calor sensível (H) determinados por H* e H*B no interior da estufa na cultura do tomate caqui

4.3.4 Determinação do saldo de radiação fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível pelos métodos Bowen, em um dia de céu limpo e um dia nublado.

O fluxo de calor sensível (H) apresentou participação mínima no balanço de energia no interior da estufa, correspondendo a $0,9 \text{ MJ. m}^2.\text{dia}^{-1}$; o sinal positivo significa que houve transferência de calor do ar para a superfície do solo. As curvas de energia dos dias 5 de julho e 14 de julho estão apresentadas nas Figuras 42 e 43, cujos dados mostram que no dia 5 de julho o saldo de radiação e calor latente foi máximo às 12 horas e atingiu valores de 1,3 e $1,0 \text{ MJ. m}^2$, respectivamente; às 14 horas, observa-se queda acentuada para saldo de radiação e LE; às 16 horas, Rn apresentou pequena elevação, porém LE não acompanhou e continuou decrescendo. O fluxo de calor

sensível se comportou de modo bem parecido com R_n , apresentando valores bem inferiores.

O dia 15 foi de céu limpo e apresentou diferenças bastante acentuada sobre o dia chuvoso, começando nos valores de R_n que atingiram $2,0 \text{ MJ m}^{-2}$; neste dia, o fluxo de calor latente não acompanhou a variação do saldo de radiação e seus valores não ultrapassam $0,3 \text{ MJ.m}^{-2}$, ocorrendo o inverso com o fluxo de calor sensível, que atingiu o pico às 12 horas, chegando a valores de $1,7 \text{ MJ m}^{-2}$

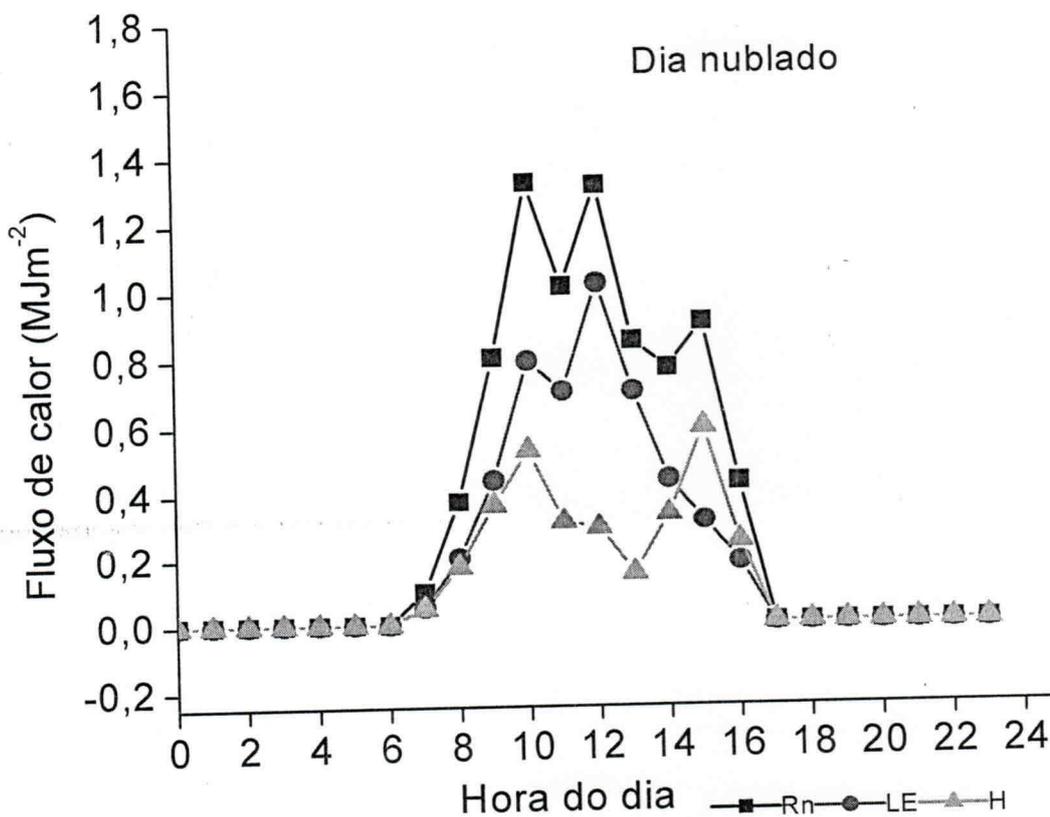


Figura 42. Saldo de Radiação, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente em dia de céu nublado 32 dias após o transplante, calculado pelo método Bowen

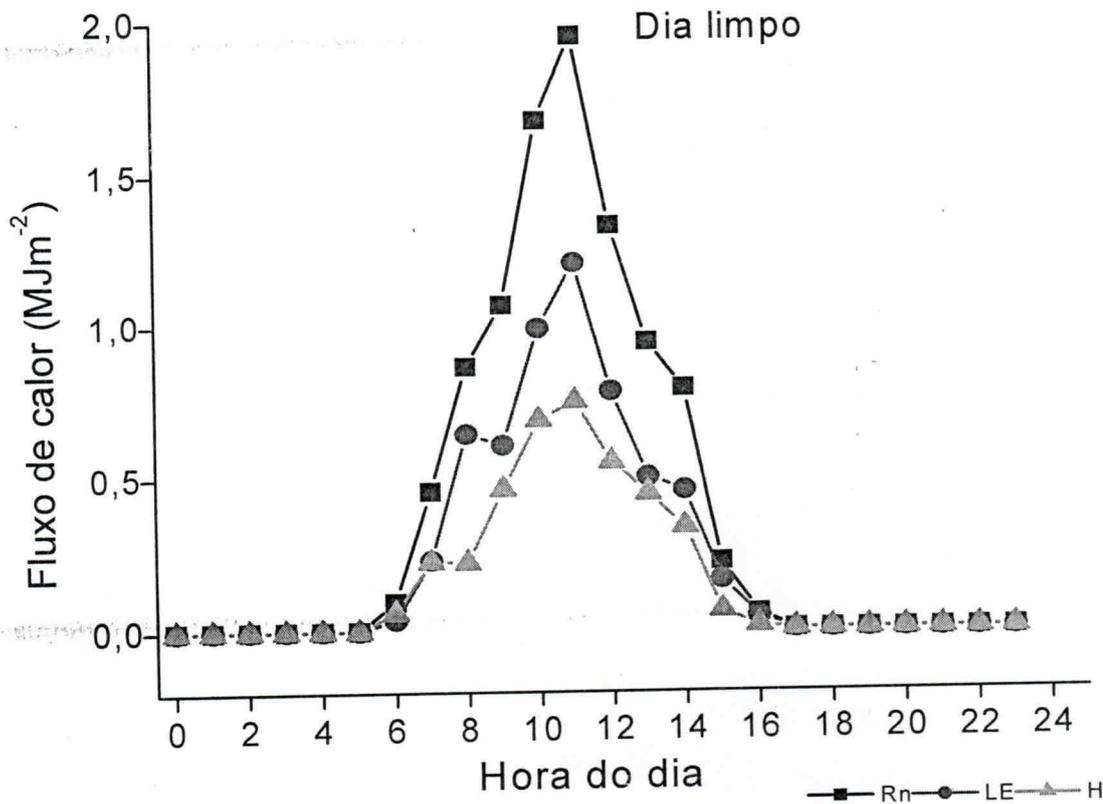


Figura 43. Saldo de Radiação, fluxo calor sensível e fluxo de calor latente em dia de céu limpo 42 dias após o transplântio, calculados pelo método Bowen

4.5 Umidade do solo dentro do ambiente protegido

A umidade do solo encontrada dentro dos lisímetros, com e sem plantas, está apresentada nas Figuras 44, 45 e 46.

A retenção de água do solo no horizonte Ap1a AB apresentou valores de capacidade de campo (CC) de $0,23 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; esses valores correspondem ao potencial - 33 kPa, enquanto o ponto de murchamento foi de $0,12 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Observando-se as curvas de umidade do solo, conclui-se que os valores de umidade estiveram em torno de $0,164 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 71% da capacidade de campo.

Observou-se que na semana de 181-190 (29/06 a 09/07) o solo do lisímetro sem planta (Lsp), apresentou valores bem mais altos em relação ao solo do lisímetro com planta (Lcp), a tendência da curva de umidade foi crescente e atingiu

valores $0,176 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. A umidade do solo no lisímetro com planta atingiu o valor máximo de $0,169 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, uma diferença entre eles de $0,07 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. (Figura 44).

A umidade do solo no período 191-200 (10/07 a 20/07, os valores foram em média $0,176 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e a umidade do solo no lisímetro com planta atingiu o valor máximo de $0,169 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; na semana seguinte, o Lsp apresentou queda brusca no dia 208 e se nota para o Lcp que o mesmo apresentou pouca variação nos valores de umidade ocorrendo, portanto, pequeno aumento no final deste período para $0,168 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, durante o início da maturação dos frutos, ou seja no dia 210 a umidade do solo ficou muito próxima para as duas condições.

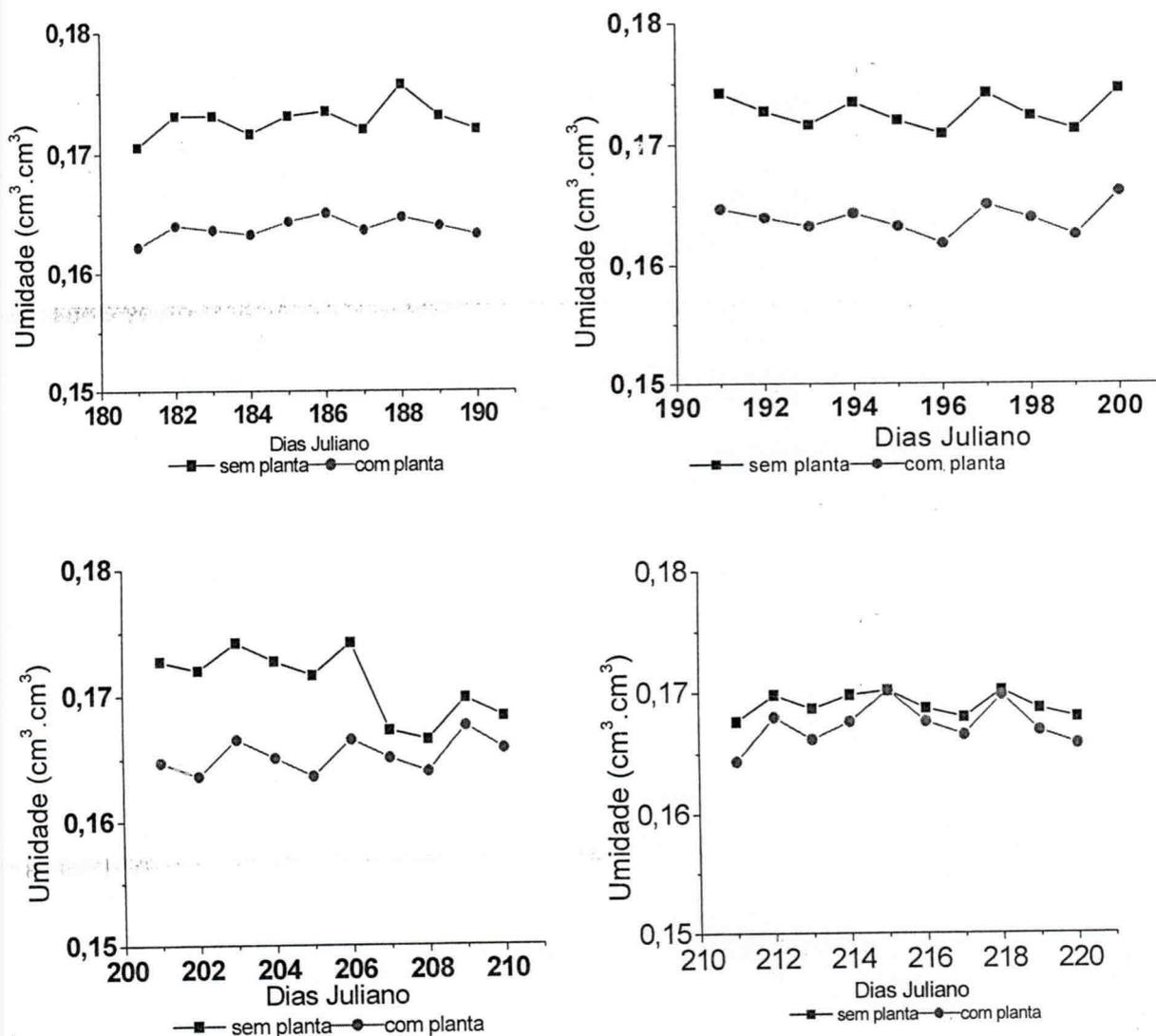


Figura 44. Umidade do solo com e sem planta dentro do lisímetro nos dias 180 a 220.

Observa-se que na semana de 221-230 (09 agosto/18 agosto) o solo do lisímetro Lcp, apresentou valores inferiores aos primeiros dias do ciclo, período em que as plantas começavam a emitir os primeiros frutos e seu crescimento era máximo; na mesma fase, a cultura consome mais água. A umidade do solo no Lsp variou de 0,1675 a 0,1700 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ porém o Lcp apresentou uma variação um pouco mais acentuada mostrando que a umidade variou de 0,1645 a 0,170 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

A umidade do solo no período seguinte (231-240) apresentou apenas uma variação maior no dia 239 para o Lsp ; Lcp indicou um valor máximo de 0,169 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (Figura 45).

O comportamento da umidade do solo no período 241-250 mostra grande consumo de água pois, apesar da umidade estar um pouco mais elevada, o consumo é maior devido ao período em que a planta se encontra; os maiores valores aparecem logo após a irrigação, embora imediatamente depois a umidade diminua rapidamente, atingindo, em alguns dias, valores muito baixos. Analisando-se o lisímetro sem planta, nota-se que o mesmo apresentou pouca variação nos valores de umidade, enquanto os valores encontrados nos dois lisímetros, na última semana do experimento foram praticamente iguais (Figura 46).

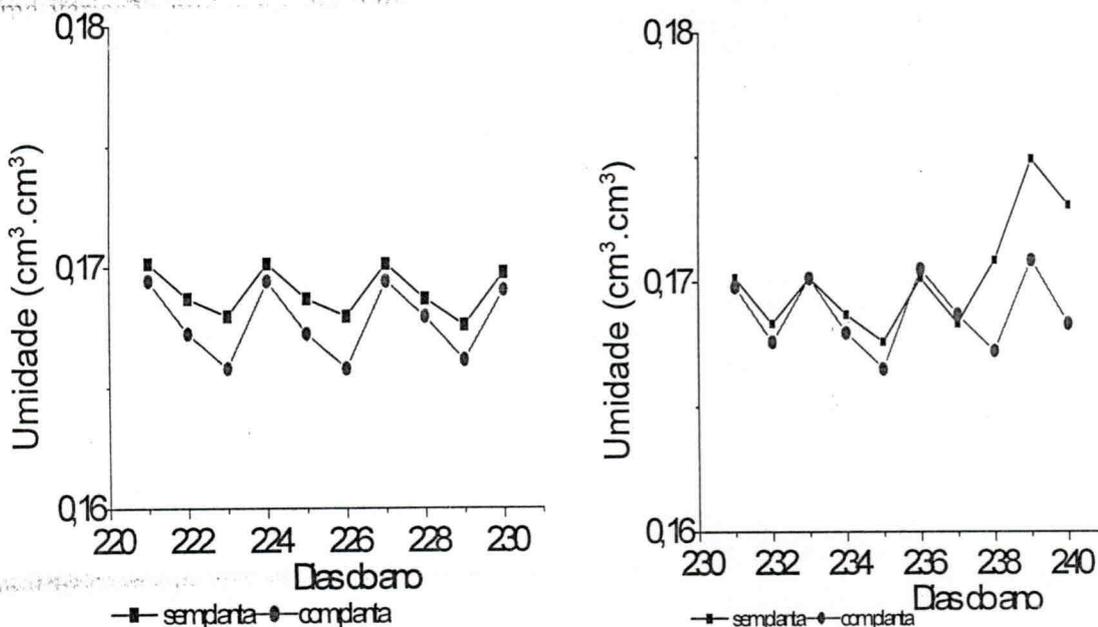


Figura 45. Umidade do solo com e sem planta dentro do lisímetro, durante os dias 220-230 e 231-240

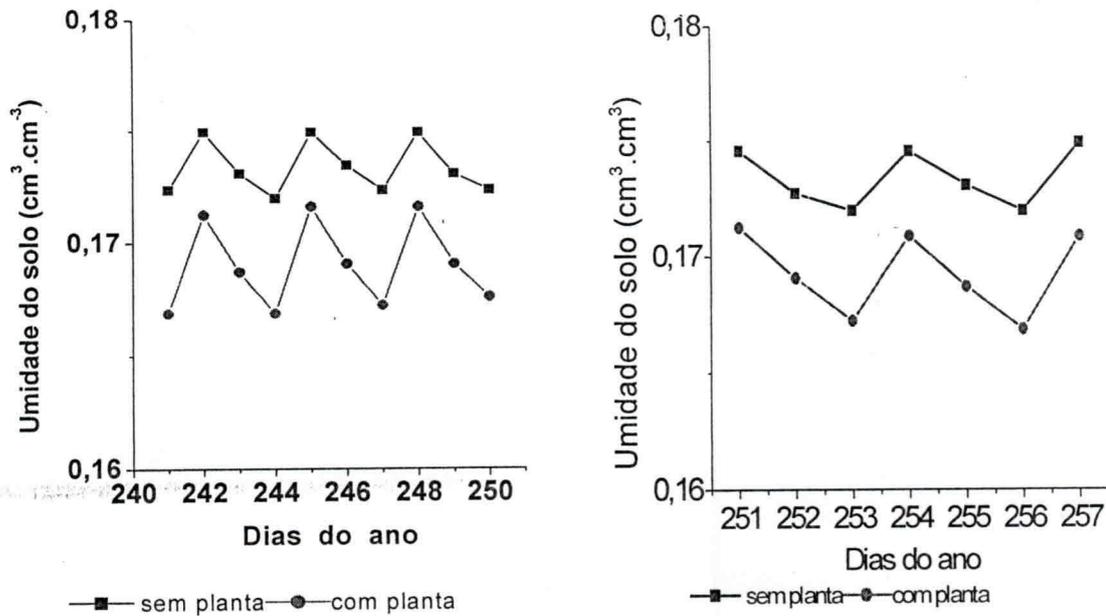


Figura 46. Umidade do solo com e sem planta dentro do lisímetro, durante os dias 241-250 e 251-257

4.5 Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cultura é um processo de perda de água para a atmosfera, através da evaporação da superfície do solo somada à transpiração pela planta. A evapotranspiração da cultura pode ser medida com lisímetros e estimada por diversos métodos.

Os componentes do balanço hídrico no solo, realizados no lisímetro, são apresentados na Tabela 4 como na fase inicial da cultura a mesma se encontrava nos tubetes os dados avaliados coincidiram com o período reprodutivo e maturação dos frutos.

A Tabela 5 apresenta o balanço no lisímetro sem planta para servir de comparativo entre o lisímetro com planta.

A soma das lâminas de irrigação de 06/07 a 09/08, no período reprodutivo, foi de 134,20 mm de água aplicada ao solo, enquanto a evapotranspiração do período foi 115,75mm e média 2,89 mm.dia⁻¹, enquanto na fase de maturação dos frutos o total de irrigação foi de 111,69 mm e a evapotranspiração da cultura de 98,04 mm, com média de 3,27 mm.

Os somatórios do balanço hídrico do solo no qual se observa maior percentual de erros, estão associados ao balanço hídrico realizado para períodos de um dia. mas, quando o balanço hídrico do solo é realizado para períodos de uma ou mais semanas o percentual de erro se mantêm na faixa de 7,0 a 8,0% (Silva et al., 2001) razão por que se preferiu optou por fazer o balanço para dez dias, assumindo-se menores erros.

Em relação ao consumo de água para o período reprodutivo e de maturação, se observa neste último período, a ocorrência de uma demanda hídrica maior do tomate, fase em que também, o saldo de radiação apresentou maiores valores que a fase vegetativa; os resultados estão de acordo com Ortega - Farias et al., (2001).

Tabela 4. Irrigação (I), Drenagem (D) e a Variação no Armazenamento de água no solo (Δh) e Evapotranspiração da cultura (ETc.) do tomate pelos métodos de Penman-Monteith e Lisímetro

Período	fase	I	D	Δh	ETc. lisímetro	ETc PM
(10 dias)		mm	mm	mm	mm dia ⁻¹	mm dia ⁻¹
187-196	II	26,0	0,74	-0,97	2,4	2,5
197-206	II	31,8	6,00	0,00	2,6	2,5
207-216	II	32,6	5,37	0,76	2,8	1,8
217-226	II	43,8	6,67	-0,11	3,7	2,3
227-236	III	35,4	5,81	0,33	3,0	2,1
236-246	III	36,5	4,97	0,00	3,2	2,5
247-256	III	39,8	2,66	-0,11	3,7	2,9
Média					3,1	2,4

4.5.1 – Métodos do Balanço hídrico e Penman – Monteith

Os valores de evapotranspiração da cultura do tomate caqui (ET_c) calculados pelo método de Penman – Monteith e lisímetro, são apresentados na Figura 47. Os valores acumulados de ET_c encontrados (a partir 6 de julho até 16 de setembro), estiveram entre 165,46 mm e 213,79 mm, respectivamente e mostram que o modelo de Penman - Monteith, ficou em média, 77,3% dos encontrados no lisímetro. Abtew & Obeysekera (1995) em comparações feitas com lisímetro, encontraram um comportamento satisfatório da equação de Penman-Monteith para estimar a ET_r, com uma relação de 74%. Por outro lado Ortega –Farias et al., (2000), afirmam que o método de Penman – Monteith, poderia ser uma ferramenta útil para se calcular o consumo de água de tomates submetidos a um stress hídrico temporário.

Observou-se então, que nos primeiros vinte dias após o transplante ocorreu boa aproximação dos valores calculados pelo método do balanço hídrico quando comparado com o método de Penman – Monteith, quando a evapotranspiração média foi, em dez dias, de 2,4 e 2,5, respectivamente, a partir daí e apesar do comportamento semelhante dos dois métodos, os valores encontrados pelo método do Balanço Hídrico foram maiores que os valores encontrados pelo método Penman-Monteith.

No período em que as flores começaram a abrir e surgiram os primeiros frutos (fase reprodutiva) 197-216 (julho –agosto) notou-se aumento da ET_c, que foi observado pelo método balanço hídrico, porém não o foi pelo método P-M, que subestima os valores de ET_c em até 38%; entretanto, entre os dias 217-256, os valores medidos no lisímetro e os estimados pela equação de P-M apresentam aumento e a diferença entre eles decresce gradualmente, atingindo 21%, fase que coincide com o aparecimento dos primeiros frutos maduros (fase de maturação), na qual é previsto um consumo maior de água pela cultura.

Vários autores mostraram que a equação de P-M calculada com a variável de resistência da cultura (r_c) pode ser usada para determinar diretamente a Evapotranspiração (Ortega-Farias et al., 2004; Valdes et al., 2004) porém, o modelo de P-M pode ser impróprio para culturas na fase inicial de crescimento uma vez que o IAF

é muito pequeno; no entanto o modelo é preciso quando o IAF é maior que 2. De acordo com Ortega – Farias et al., 2000, o modelo subestima os valores de ET para um baixo índice de área foliar mas se for computado o rc variável, este problema desaparecerá; na determinação da ET para culturas com IAF pequeno e solo com déficit hídrico temporário, o modelo de P–M requer uma parametrização adequada de rc que inclui as interações não-lineares entre condições atmosféricas, solo, planta e conteúdo de água no solo. Valdes et al., (2004) estudando a cultura de tomate de estufa em um sistema de irrigação de gotejamento, concluíram que a equação de P–M pôde simular a ET total de hora em hora, como também diariamente com boa precisão. Esta conclusão foi confirmada por vários autores (Alves Sobrinho et al., 1996, Ventura, et al., 1999, Ortega - Farias et al., 2000).

Os valores de ET/PM ficaram abaixo dos encontrados pelo método de ET/BH durante todo o ciclo da cultura, com exceção da primeira semana. Lima et al., (1994), em experimento com a determinação da evapotranspiração máxima do tomateiro, concluíram que o método de Balanço Hídrico ocasiona uma superestimativa da evapotranspiração da cultura, nos subperíodos mais frios.

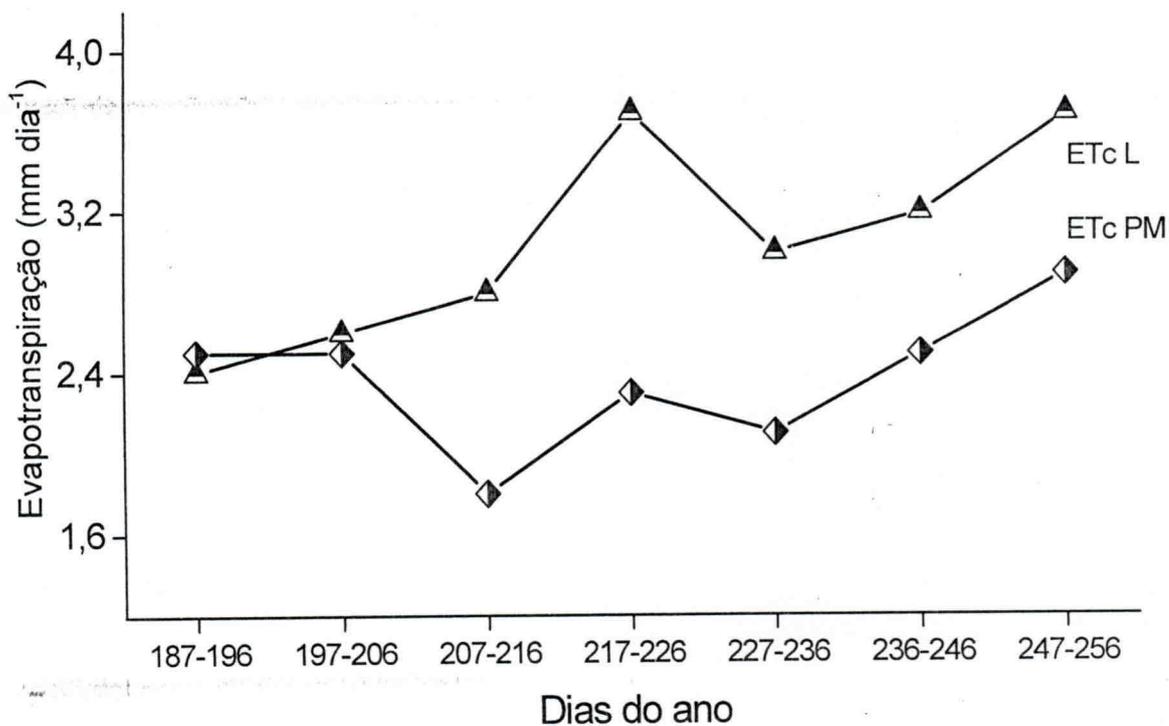


Figura 47. Evapotranspiração da cultura medida no Lisímetro e estimada pelo método Penman-Monteith, no interior da estufa

Os valores médios de evapotranspiração da cultura, obtidos no interior da estufa plástica, mostraram que o $Y = 0,7455X$ e um $R^2 = 0,72$, demonstrando que ocorreu maior dispersão quando os valores estiveram menores que $2,5 \text{ mmdia}^{-1}$ e subestima quando esses valores são maiores que 3 mmdia^{-1} . (Figura 48).

Castilha et al., (1990), encontraram em estudos conduzidos durante três anos com tomate, em lisímetro instalado no interior de casa de vegetação, valores de ETm para a cultivar vermone, da ordem de 288 a 356 mm e o coeficiente de cultura atingiu o valor 1,2, decrescendo para 0,8 ao final do ciclo.

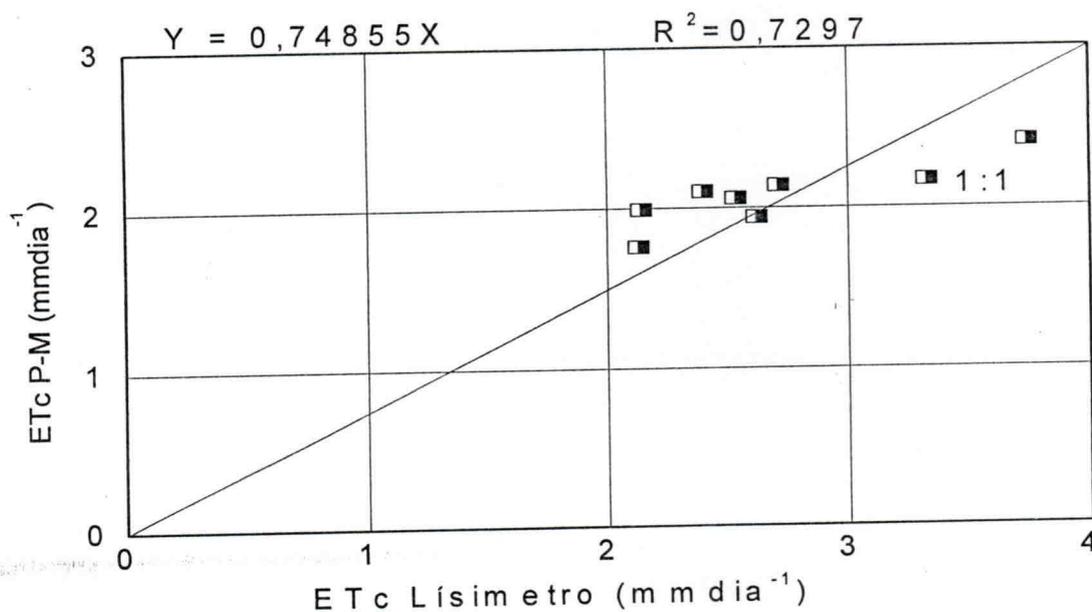


Figura 48. Correlação entre evapotranspiração da cultura medida no Lisímetro e estimada pelo método Penman-Monteith, no interior da estufa

4.6 – Evapotranspiração de referência (ET_o): comparação entre os métodos do Radiação, Penman – Monteith e Linacre

A comparação dos valores de ET_o (Figura 49), obtidos com os métodos de Penman - Monteith e Radiação (FAO) em relação aos determinados pelo método de

Linacre, permitiu verificar a existência de interrelações entre os mesmos e as variações meteorológicas envolvidas. O modelo de Linacre, quando comparado com o modelo de Penman-Monteith, subestimou os valores de ETo quando o saldo de radiação (Rn) foi superior a $7,0 \text{ MJm}^{-2}$ e, por outro lado, quando Rn ocorreu na faixa de 4 MJm^{-2} o método de Linacre superestimou a ETo.

Os valores de ETo diurno calculados pelo método de Radiação, durante todo o ciclo do tomate, variaram de 0,39 mm, no dia 169, a 7,89 mm e no dia 255 uma amplitude de 7,5 mm, totalizando no período 492,23 mm; tais resultados foram maiores que os encontrados pelos métodos de Penman-Monteith e Linacre, ou seja, de 384,05 e 357,29mm respectivamente.

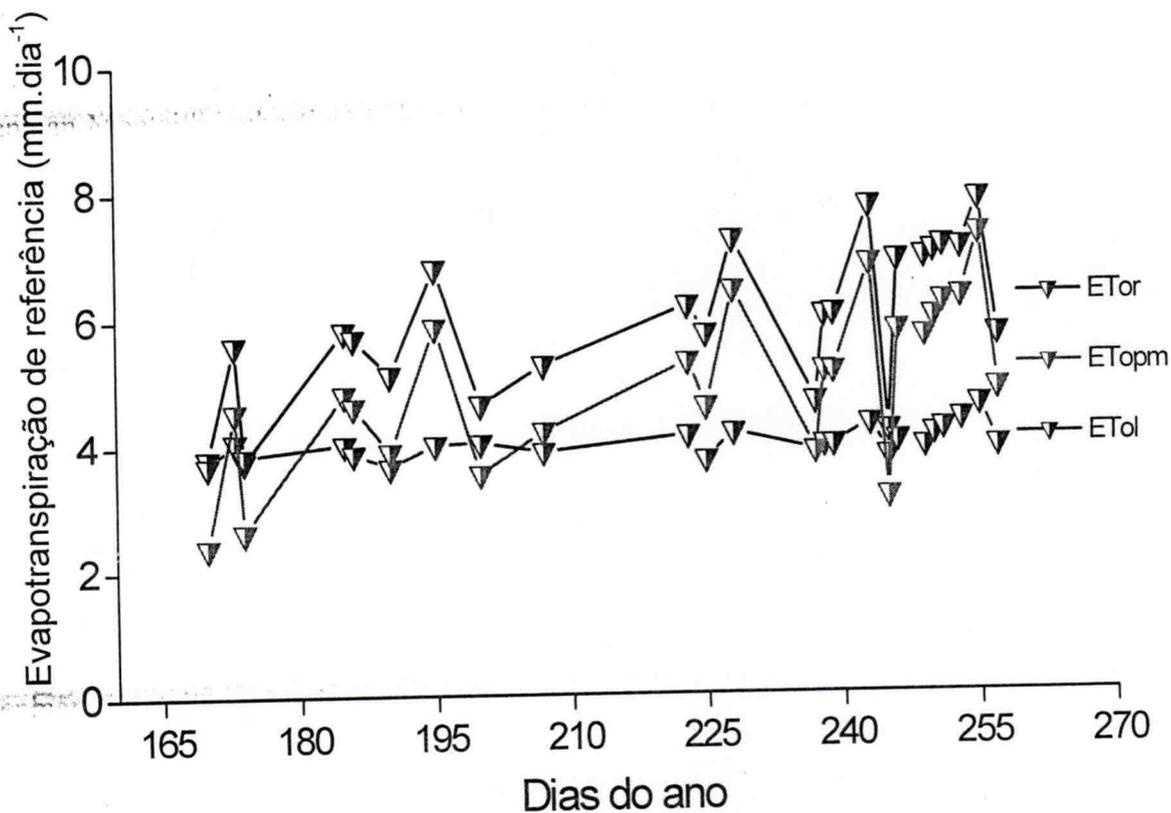


Figura 49. ETo determinada pelos métodos de Linacre, Radiação (FAO) e Penman-Monteith, em dias de céu limpo.

A relação entre Eto calculada pelo método de Radiação (Eto_R) e Linacre (Eto_L) está apresentada na Figura 50, na qual se observa uma correlação entre de $R^2 = 0,79$ e

um ajuste $ET_{OR} = 1,4917 ET_{OL}$. A comparação entre os métodos indicou que os valores abaixo de 4 mm.dia^{-1} e acima de 6 mm.dia^{-1} se afastaram muito da reta 1:1 e que a relação entre evapotranspiração de referência calculada pelo método de radiação, foi de 49% acima da calculada pelo método de Linacre.

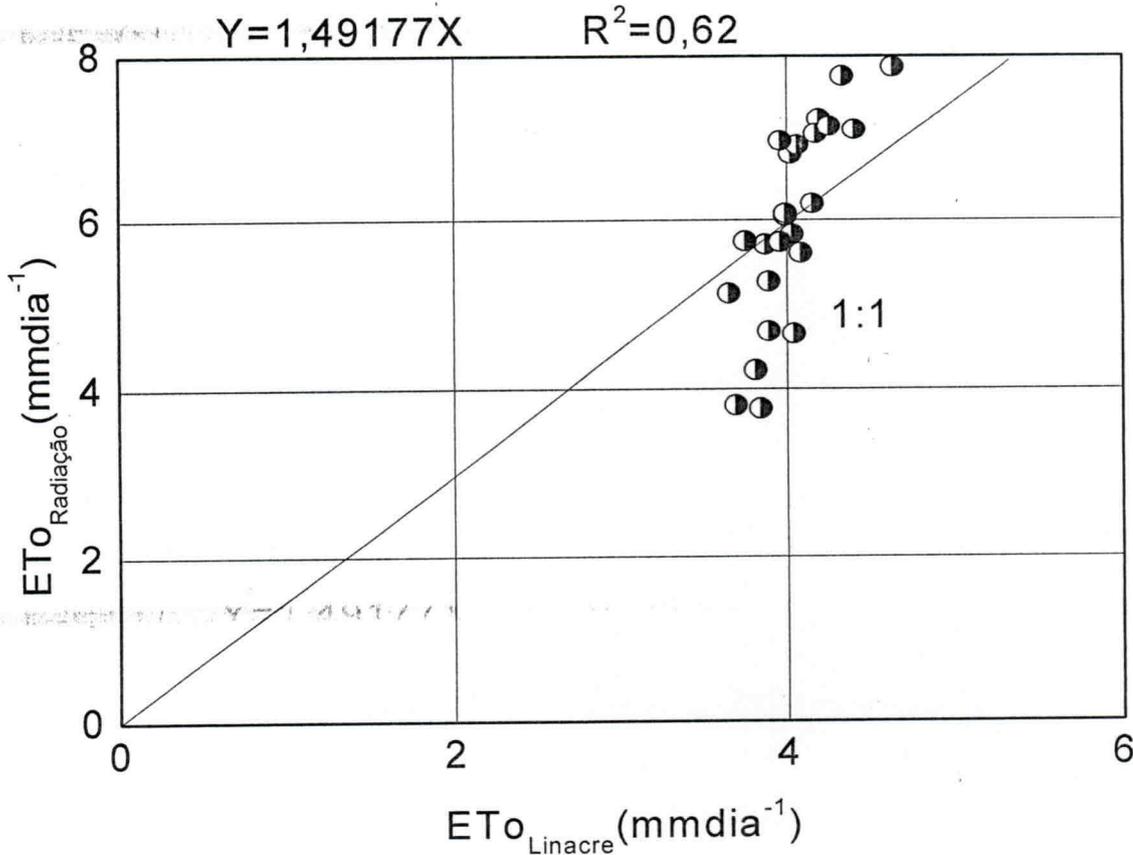


Figura 50. Razão da Evapotranspiração de referência calculada pelo método Radiação e Linacre

Apresentam-se, na Figura 51, as relações de ET_{O} determinados pelos métodos de Penman-Monteith e Linacre, notando-se uma boa correlação entre os métodos com um $R^2 = 0,68$ e um ajuste $ET_{OR} = 1,247ET_{OL}$, por outro lado, os valores menores que 4 mm e maiores que 6 mm , estão bastante afastados da linha 1:1, mostrando maior dispersão.

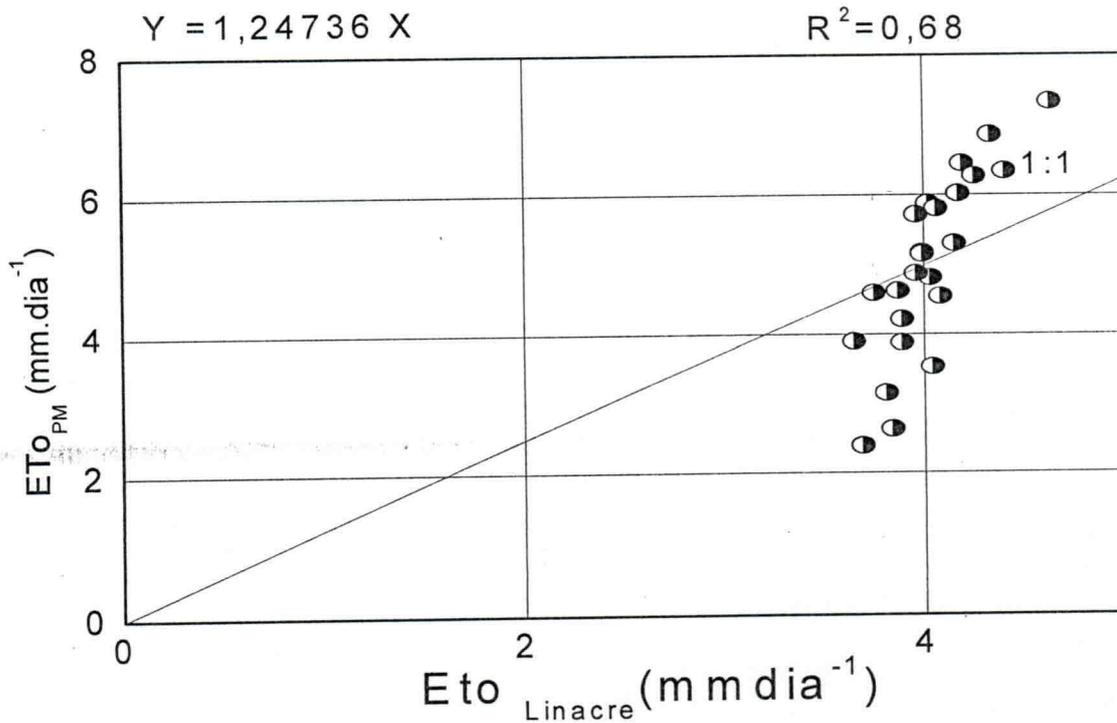


Figura 51. Razão da Evapotranspiração de referência calculada pelo método Penman - Monteith e Linacre.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores do coeficiente de cultura (Kc), calculados por três métodos diferentes e suas variações, de acordo com a fase da cultura.

Tabela 5 Coeficiente de cultura nas fases vegetativa, reprodutiva e maturação do tomateiro cultivado em estufa.

Kc fase	Kc vegetativa*	Kc reprodutiva	Kc maturação
$K_{cPM} = E_{tc}/E_{to1}$	0,94	0,74	0,53
$K_{cLin} = E_{tc}/E_{to2}$	0,47	0,58	0,63
$K_{cRadiação} = E_{tc}/E_{to3}$	0,46	0,44	0,41

Eto-estimado pelos métodos: Penman-Monteith, Linacre e da Radiação-FAO

*Dados de 15 dias após transplântio

O $K_c \cdot PM$ médio ficou durante todo o ciclo da cultura, em torno de 0,66 $\pm 0,37$ com máxima de 2,8 e mínima 0,37 e um erro de 0,038; para $K_c \cdot Lin$ médio de 0,59 $\pm 0,14$ com máxima de 0,85 e mínima de 0,07 e um erro de 0,015; para $K_c \cdot radiação$, encontrou-se 0,43 $\pm 0,046$ com máxima de 0,6 e mínima 0,30 e um erro de 0,047.

Considerando-se os diferentes estágios de desenvolvimento da cultura, nota-se que os valores encontrados pelos métodos de Linacre e Radiação estão de acordo com os citados pela, FAO, tendo em vista o período inicial da cultura, de um K_c próximo de 0,45, devido principalmente ao baixo índice de área foliar no início do desenvolvimento da planta e no final do período em virtude do declínio da cultura, abscisão das folhas e fim da colheita; este resultado não foi encontrado pelo método de Penman –Monteith.

Na fase reprodutiva ocorreu que o K_c foi maior que na fase anterior, devido ao maior consumo da planta nesta fase, detectado pelo método de Linacre, e com média de 0,63mm para a fase de maturação dos frutos; comportamento inverso dos métodos de Radiação e Penman –Monteith apresentou maior K_c na fase de maturação que na fase reprodutiva; referidos valores estão abaixo dos encontrados por Lima et al., (1994) que trabalhando com tomateiro cultivar IPA-5, constataram grande variação na fase fenológica quando comparados com outras regiões do mundo, situando-se dentro dos limites estabelecidos pela FAO (Doorenbos e Kassam, 1979) no qual o K_c é de 0,6; 1,4; 1,0 nas diferentes fases da cultura, mas, Amayreh & Al-Abed (2005), encontraram valores médios de K_c do tomate de 0,69 para todo o ciclo, sendo 0,8 para o estágio reprodutivo e 0,45 para o estágio de maturação. Conforme os valores da FAO, estes resultados foram 33 a 40% menores.

Valandro et al., (1999), encontraram estudando o tomateiro em Santa Maria, em lisímetro, valores de transpiração de 500 a 2500 ml /dia, por planta, na primavera. As variáveis meteorológicas e de crescimento afetam fortemente a transpiração do tomateiro (Righi, et al 2002).

4.7 - Estádios Fenológico da cultura

O ciclo do tomateiro (Figura 52) foi de 30 dias para o período inicial, fase em que as plantas atingiram 30 cm de altura e apresentam seis folhas, sem problema, de

doenças; após o transplântio, a cultura levou em torno de mais 20 dias para o período completar o período vegetativo.

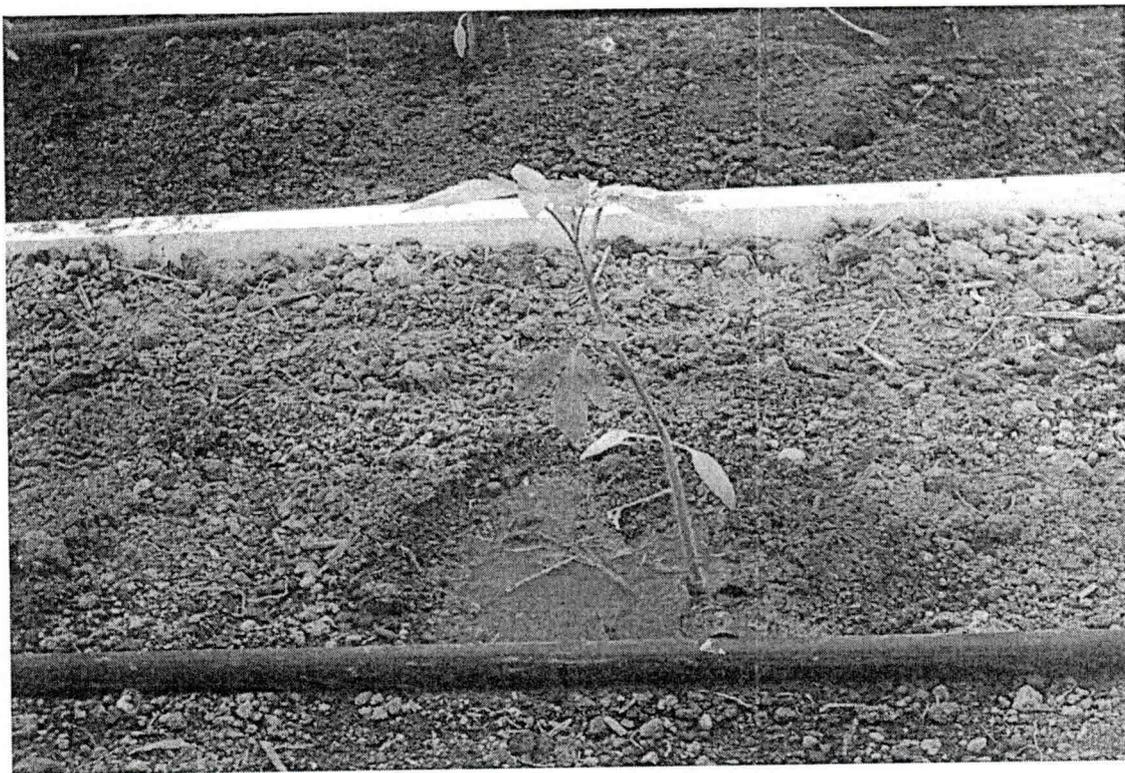


Figura 52. Planta do tomateiro na fase vegetativa, no inteiro da estufa

Na Figura 53 se encontra o início do período de floração e frutificação que ocorreu no dia 174 (23/07) com um total de 45 dias para o período reprodutivo; o período de frutificação durou 38 dias atingindo a maturação dos frutos, e conseqüentemente a primeira colheita

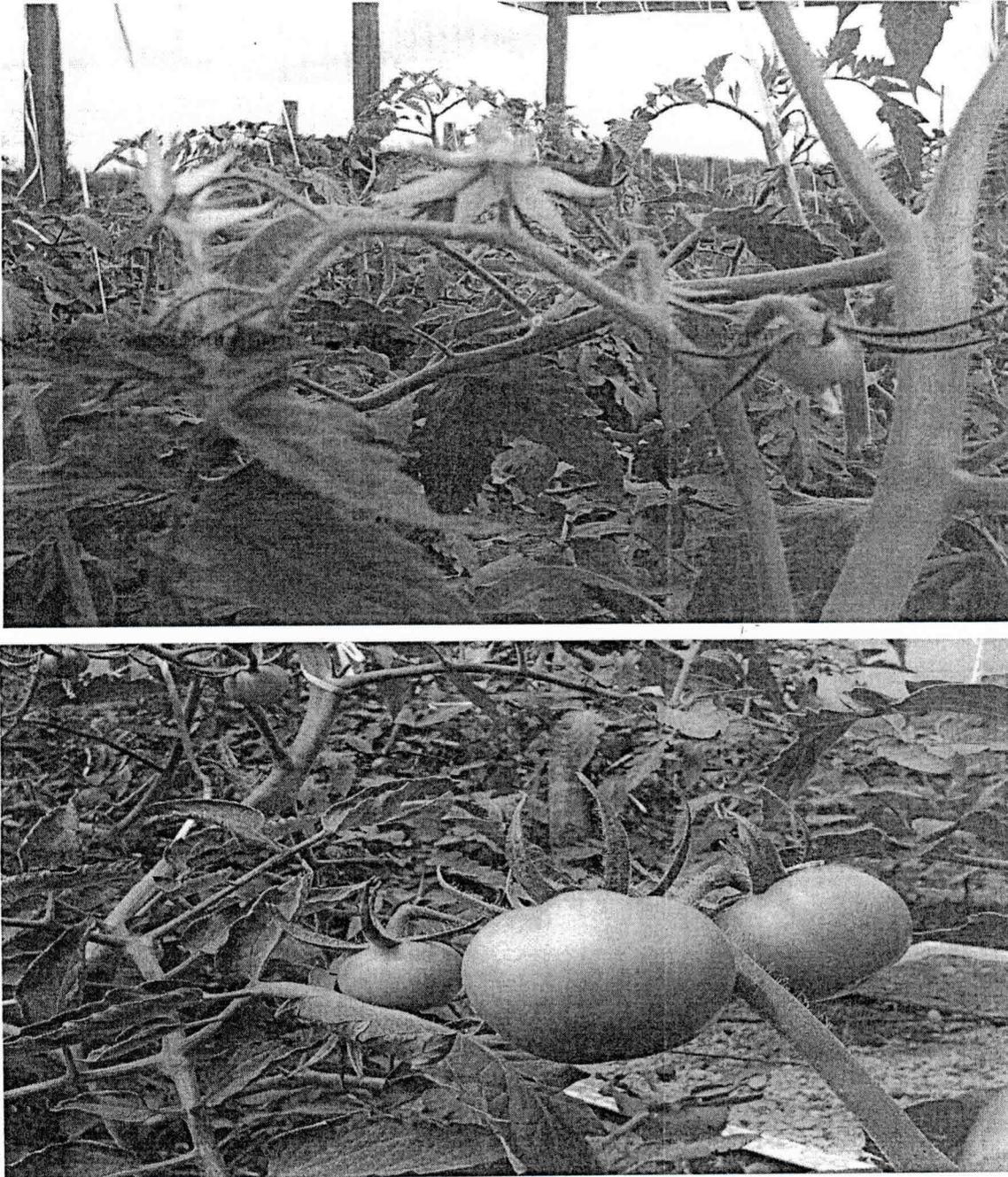


Figura 53. Plantas de tomateiro no período de floração e surgimento dos primeiros frutos e início da maturação dentro do ambiente protegido

4.7.1 – Altura de plantas e IAF

A altura das plantas atingiu valores médios de 200 cm (Figura 54) valores bem acima dos de Reisser Junior et al., (2003) que encontraram média de 110 cm.

Após o sétimo racemo se fez uma poda apical para inibir o crescimento, visto que algumas plantas atingiram 250 cm, tornando inviável o acompanhamento morfológico. Segundo Reisser Junior et al., (2003) a altura das plantas cultivadas no ambiente protegido atingiu valores bem elevados quando comparados com ambiente de maior disponibilidade de radiação solar global. A redução de 36% da radiação global incidente sobre a cultura, na estufa plástica, promoveu aumento da altura da planta.

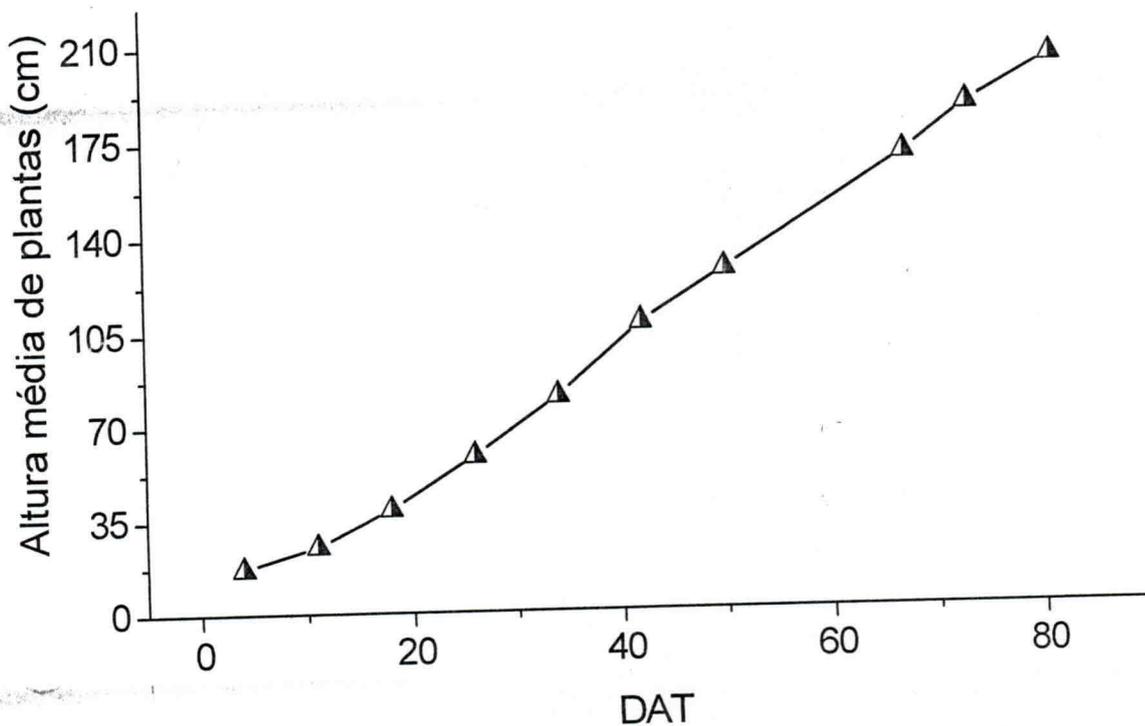


Figura 54. Altura da cultura do tomateiro dentro do ambiente protegido

O IAF apresentou o valor de 0,56 aos 58 dias após o transplante, chegando a um IAF de 1,3 ao final do ciclo da cultura, cujo comportamento está bem abaixo dos valores encontrados na literatura, porém se justifica pelo manejo usado, que conduziu a cultura com

apenas um ramo; entretanto, o comportamento da curva esta de conformidade com o trabalho de Barranza et al (2004), que apresentaram um decréscimo gradual do IAF sempre que a planta entrou na fase de maturação (Figura 55).

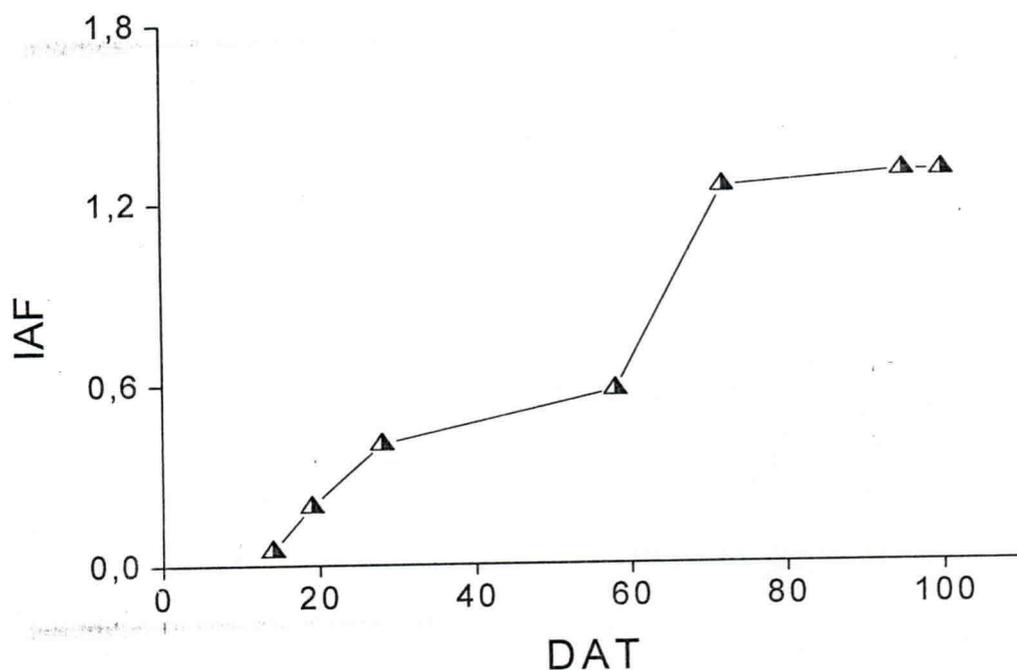


Figura 55. Altura de plantas e Índice de área foliar durante os primeiros dias 70 dias após o transplante

O trabalho de Cunha et al. 2003, avaliou as alterações micrometeorológicas em estufa plástica na cultura do pimentão, tendo se observado que o aumento da área foliar e do IAF foi bastante significativo, evidenciando um crescimento maior das plantas no interior da estufa plástica quando comparada com as cultivadas no campo.

A análise quantitativa do crescimento é o primeiro passo na avaliação da produção vegetal e requer informações que podem ser obtidas sem necessidade de equipamentos sofisticados; para isto, a quantidade de material contido na planta toda e em suas partes, ou seja, folhas, colmos, raízes, frutos e o tamanho do aparelho fotossintetizante, isto é, a área foliar, deve ser conhecida (Blanco & Folegatti, 2003).

Na Figura 56 estão os valores médios da área da folha cuja equação de ajuste foi $Ar = 0,52Ae$ e observa-se uma boa correlação com um $R^2 = 0,92$. A utilização do

produto das duas dimensões, o comprimento e a largura, constituem o método mais utilizado, e apresentam melhor estimativa; para Blanco & Folegatti (2003) o uso de métodos não destrutivos apresenta alta precisão e exatidão na determinação do IAF.

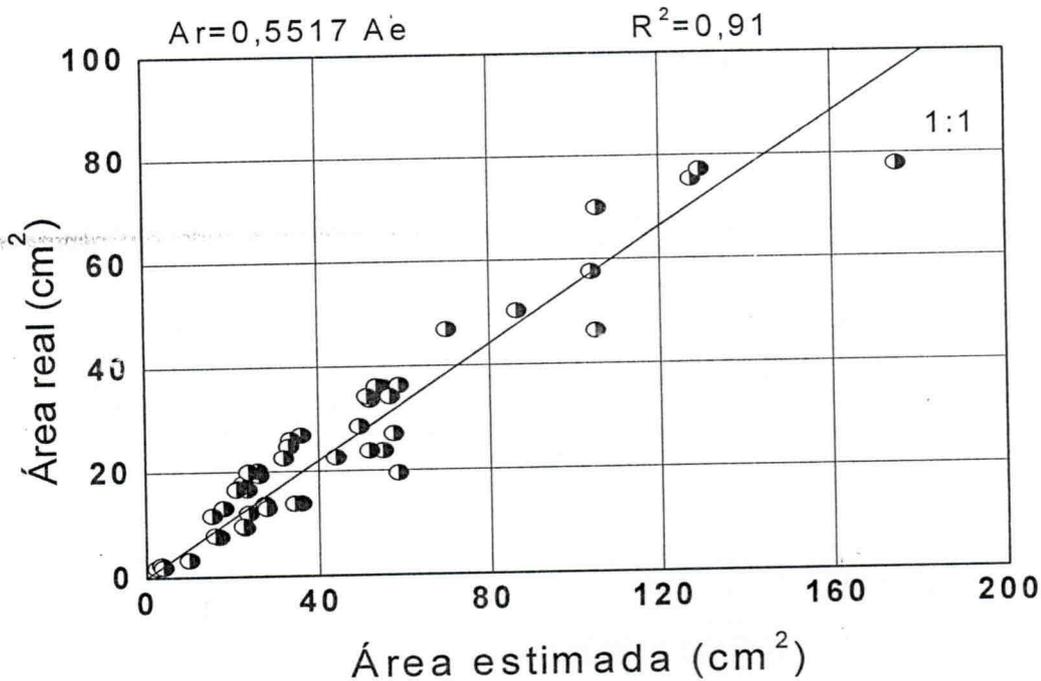


Figura 56. Relação área foliar real e estimada dias após o transplântio, na cultura do tomateiro

A área foliar de uma planta depende do número e do tamanho das folhas, e do seu tempo de permanência na planta. Segundo Monteiro et al. (2005), na avaliação do crescimento de comunidades vegetais se emprega a área de terreno disponível às plantas como base para expressar a área foliar por unidade de área foliar (IAF). Os valores encontrados permitem concluir que houve grande correlação entre os valores de área foliar e número de folhas e um $R^2 = 0,9$ (Figura 57).

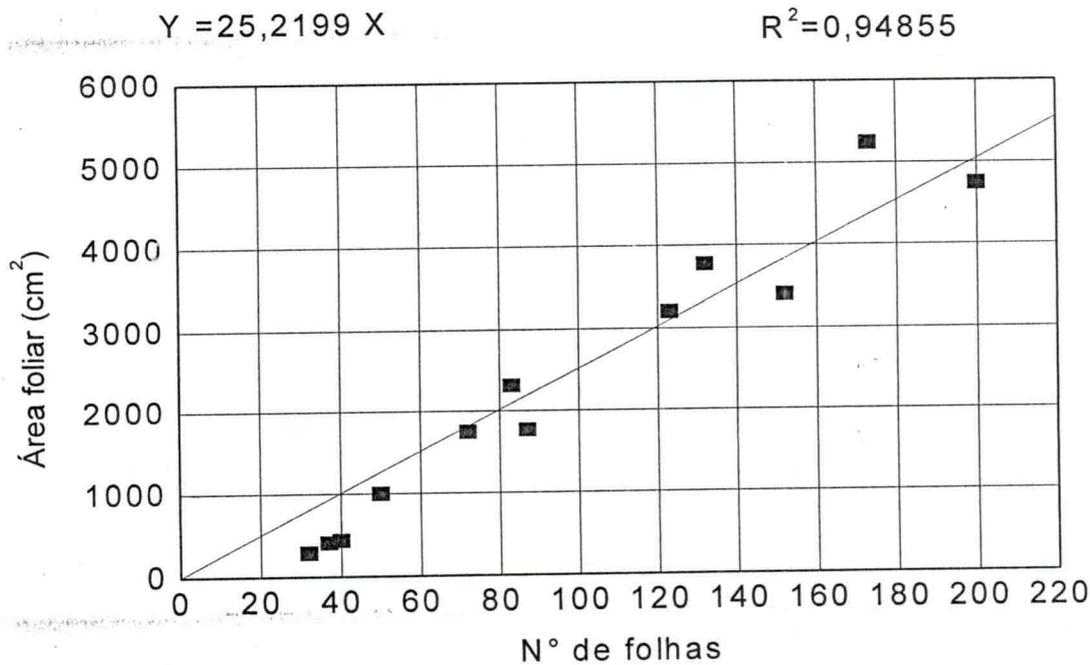


Figura 57 . Relação entre área foliar e número de folhas durante o ciclo da cultura

4.11 – Produção

Na Tabela 6 se acham os valores médios de frutos, peso de frutos por planta, medida dos frutos e produtividade. O número frutos/planta chegou a 21,5, a cultura atingiu uma produção de 3,04 kg planta⁻¹ e uma produtividade de 7,6 kg /m² totalizando uma produtividade de 76 t.ha.⁻¹; os frutos apresentaram um perímetro de 22,8 cm e o menor de 22,1 cm ; este resultado concorda com os encontrados por Carrijo et al., (2004) quando obtiveram uma produtividade de 7,62 kg. m² com peso médio dos frutos de 119 g; segundo Caliman et al.,(2005), a média Nacional está em torno de 50 t.ha.⁻¹.

Tabela 6. Valores médios de número de frutos por planta, peso de fruto, perímetro maior e perímetro menor e produtividade do tomateiro

Nº de fruto por planta	Perímetro maior (cm)	Perímetro menor(cm)	Peso do fruto(g)	Peso total de frutos p/planta (kg)	Produtividade (kg.m ²)
21,5	22,83	22,10	158,14	3,400	7; 60

Os resultados mostraram que o tamanho dos frutos era maior que os encontrados e a produção de frutos apresentou valores maiores que os de Carrijo et al., (2004); no início da colheita algumas plantas não suportaram o peso dos frutos, que atingiram 300g, com uma média na terceira colheita de 200g. sendo necessário um sistema de sustentação para não prejudicar a planta (Figura 58).

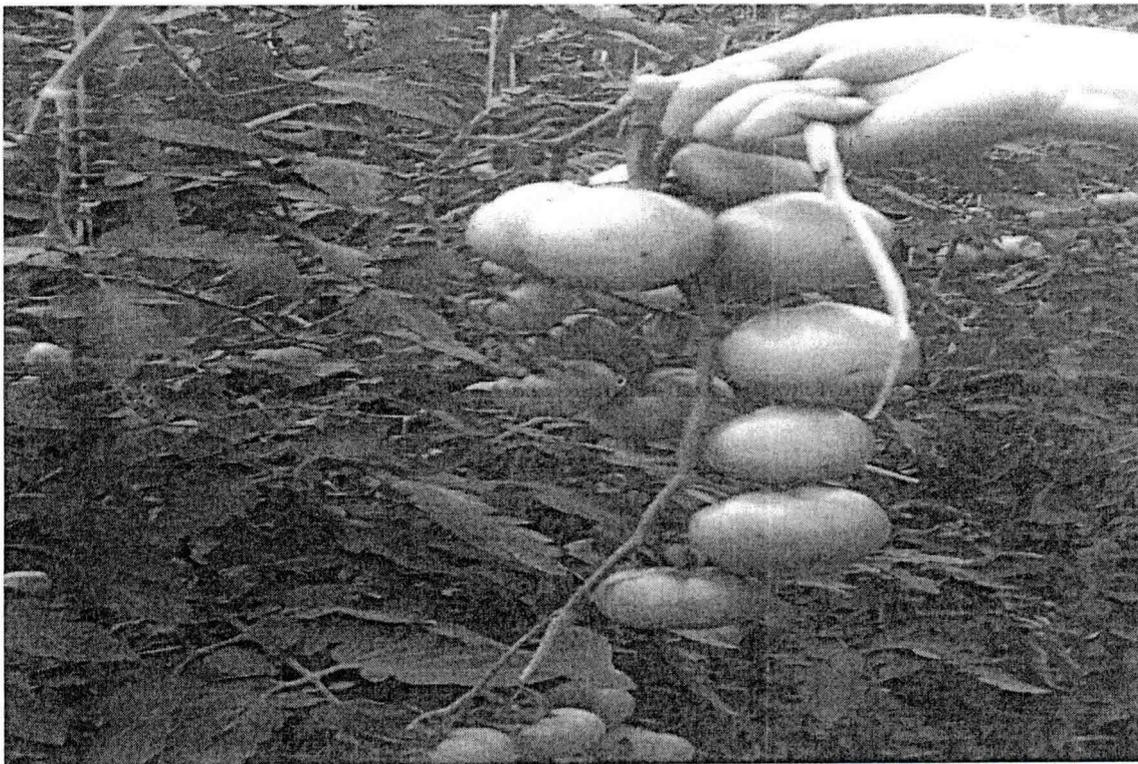


Figura 58. Detalhe do início da colheita de frutos do tomateiro em estufa plástica

Os valores médios de número de frutos, frutos por planta, peso de fruto e diâmetro, foram utilizados para classificação e análise de produção do tomate caqui; os frutos foram colhidos quando apresentavam 40% da sua coloração avermelhada (Figura 59) e a classificação foi feita de acordo com Ortega – Farias et al., (2004) e estão apresentados na Tabela 7.

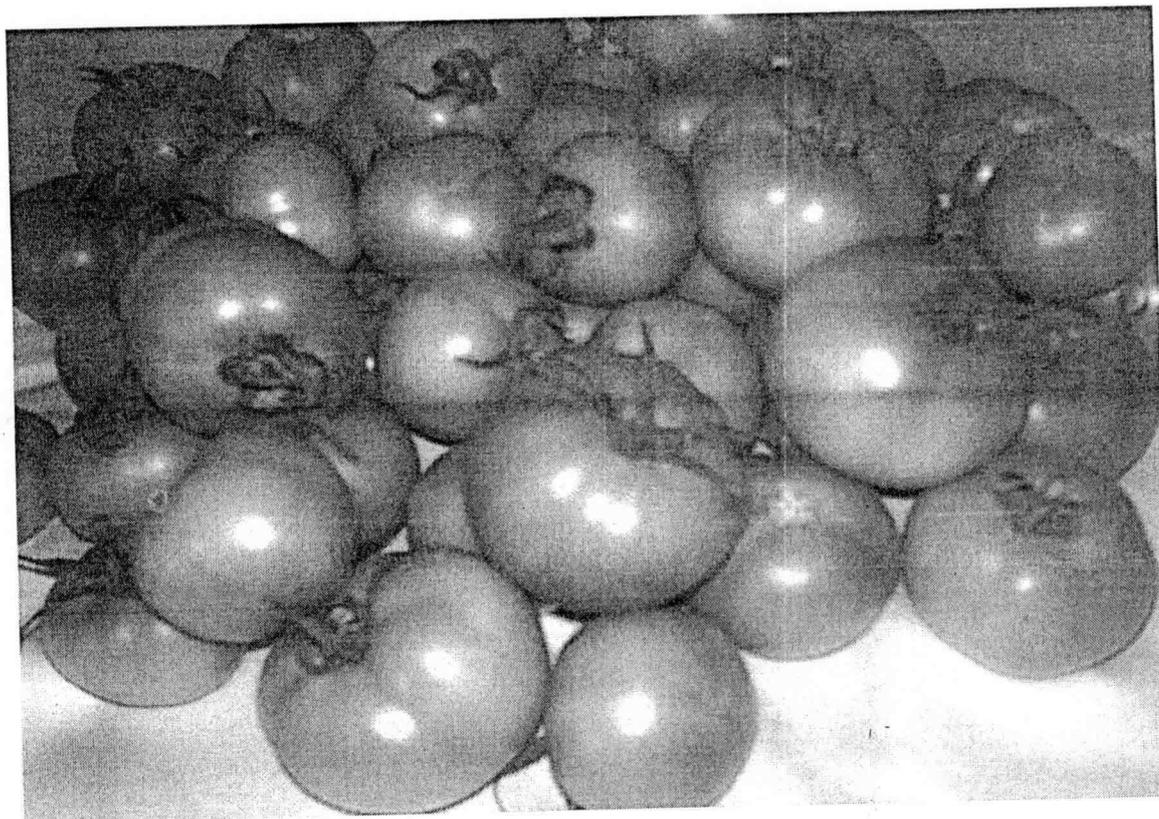


Figura 59. Produção do tomate caqui em ambiente protegido, aos 104 dias após o transplântio

Tabela 7. Classificação dos frutos, peso e valor em porcentagem em relação ao total produzido. (Ortega – Farias et al., 2004)

Classificação	Massa	
	kg	Nº frutos
extra (≥ 250 g)	3,35	11
primeira (150-249g)	141,5	800
segunda (100-149g)	205,38	1658
terceira (80-99g)	62,48	734
descarte (≤ 80 g)	59,38	980
Total	472,12	4183

4.8 Tratamento e análise dos dados

Apresentam-se, na Tabela 8, os modelos obtidos com variáveis internas e externas e a estufa plástica, segundo avaliação realizada com base nos índices de concordância (d); também se encontram os valores de raiz quadrada, erro médio, coeficiente linear e angular de determinação da regressão para a comparação entre os valores de ETc medidos no lisímetro e estimados pelo método de Penman-Monteith para o período experimental, e o índice de concordância (d).

Analisando-se os valores obtidos para os coeficientes Wilmotti (d), verificou-se que a radiação solar global (Rg), Temperatura do ar (T) e velocidade do vento (Vv) foram os parâmetros que mostraram as maiores concordâncias das médias entre o ambiente protegido e o campo, 0,99999; 0,99998 e 0,97711, respectivamente, seguidos de umidade relativa do ar (UR) com $d = 0,78194$. O coeficiente de determinação permite verificar qual a concordância entre os métodos.

A UR, apesar de apresentar uma concordância média, os valores de r_{qmd} foram altos quando comparados aos outros elementos, mostrando que existem diferenças significativas entre as medidas obtidas dentro da estufa e a estimada pelos dados externos.

Tabela 8—Indicadores estatísticos para a análise de concordância entre as variáveis Tmed, UR, Vv2med, Rg obtidos em ambiente protegido e no campo

Variável	d	Rqmd
Tmed	0,99998	0,04592
URmed	0,78194	31,72870
Vv	0,97711	0,27529
Rg	0,99999	0,46727

5. CONCLUSÕES

Devido à interrupção do processo convectivo em função da pequena velocidade do vento e ao maior armazenamento de calor sensível pelo ar atmosférico no interior da estufa, ocorreu um aumento da temperatura em relação ao campo; Entretanto a umidade do ar apresentou-se inversamente proporcional à temperatura do ar. Verificou-se, também, um aumento na radiação fotossinteticamente ativa no ambiente protegido com o aumento do índice de IAF do tomateiro, que pode ser resultante da redução da sua transmissividade pelo fechamento estomático e diminuição da fotossíntese a partir do aumento da taxa transpiratória. A partir dos dados obtidos, pode-se inferir que a estimativa dos valores de radiação sobre a cultura permite que se determine o seu consumo hídrico e, conseqüentemente, seu manejo.

As variáveis meteorológicas observadas dentro do ambiente protegido provocaram um efeito positivo no tamanho e produção de frutos de tomateiro. A maior temperatura nesse ambiente aliada a valores adequados de umidade relativa do ar provavelmente estimularam e aceleraram a velocidade das reações bioquímicas da planta, a absorção, translocação e disponibilização dos nutrientes essenciais ao crescimento, desenvolvimento e produção de frutos.

Uma das peculiaridades do ambiente protegido é diminuir grandes oscilações da temperatura entre o dia e a noite, e assim, quando a temperatura diurna é ótima, a precocidade e produtividade, dependendo do genótipo, determinadas pela temperatura noturna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABTEW, W.; OBEYSEKERA, J. Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of three estimation methods. **Transactions of the. ASAE**. v.38, n.1, p121-129, 1995,
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and drainage, 56).
- ALVES SOBRINHO, T.; BONOMO, R; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Dourados e Ponta Porã, Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. **Resumos...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. CD Rom.
- AMAYREH, J. & Al-ABED, N. Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. **Agricultural Water Management**, n.73, p.247-254, 2005.
- ANDRIOLO, J.L., DUARTE, T.S., LUDKE, L. *et al.* Crescimento e desenvolvimento do tomateiro cultivado em substrato com fertirrigação. **Horticultura Brasileira**, v.15, n.1, p.28-32, 1997.
- ANTONINO, A.C.D.; SAMPAIO, E.V.S.B.; DALL'OLIO, A.; SALCEDO, I.H. Balanço hídrico em solos com cultivos de subsistência no semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.29-34, 2000.
- ATARASSI, R.T. **Modelagem do balanço de energia do dossel da cultura do pimentão em casa de vegetação**. Piracicaba-SP 2004. 70f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B. da; SILVA, V.P.R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.58, n.1, p.241-254, 2003.

BARRANZA F. V.; FISCHER, G.; CARDONA, C. E. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, colombia. **Agronomía Colombiana**, n.22, p. 81-90, 2004.

BENICASA, M. **Ecofisiologia Vegetal**. Faculdade de Ciências Agrárias Botucatu-SP . Imprensa universitária. 86p, 1984.

BLANCO, F.F., FOLEGATTI, M.V. New method for estimatig the leaf area index of cucumber and tomato plants. **Horticultura Brasileira**, Brasília, vol.21, n.4, 2003.

BOULARD, T.; & WANG, S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam n.100, p.25-34, 2000.

BOULARD, T.; BAILEY, A.; MERMIER, M. ; VILETTE, F., Mesures et modelisation de la resistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre. **Agronomie**, Avignon, n.11, p.259-274, 1991.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v.27, p.779-787, 1926

BRAGA, M. B.; KLAR, A. E. Evaporação e Evapotranspiração de referencia em campo e estufa orientada nos sentidos norte/sul e leste/oeste. **Irriga** – Botucatu, vol.5, n.3, p.222-228, 2000.

BURIOL, G. A., STRECK, N. A., SCHNEIDER, F. M. Modificação ambiental causada por túneis baixos de polietileno transparente perfurado cultivados com alface. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 261- 266, 1993.

CALIMAN, F. R. B.; SILVA, D. J. H.; FONTES, P. C. R.; STRINGHETA, P. C.; MOREIRA, G. R.; CARDOSO, A. A. Avaliação de genótipos de tomateiro cultivados em ambiente protegido e em campo nas condições edafoclimáticas de Viçosa. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.2, 2005.

CARON, B.O.; HELDWEIN,A.B. Consumo de água e coeficiente de cultura para o meloeiro cultivado em estufa plástica na primavera produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.1, p.19-25, 2000.

CARRIJO, O.A.; VIDAL, M.C.; REIS, N.V.B.; SOUZA, R.B.; MAKISIMA, N. Produtividade do tomateiro em diferentes substratos e modelos de casas de vegetação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.1, p.05-09, 2004.

- CASTILLA, N.; ELIAS, F.; FERERES, E. Evapotranspiracion de cultivos hortícolas en invernadero en Almeria. **Investigacion Agraria: produccion y proteccion vegetal**, v.5, p.117-125, 1990.
- COSTA, G.A. **Avaliação da disponibilidade hídrica para o milho na região de Rio Largo**. Trabalho de conclusão de curso (TCC), **Agronomia**, Rio Largo, 21f., 2003.
- CUNHA, A. R.; VALIATI, M. I.; SOUZA, O. T. L.; DUTRA, I.; ASSUNÇÃO, I. C. A.; ESCOBEDO, J. F. . ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA EM AMBIENTE PROTEGIDO UTILIZANDO O EVAPORÍMETRO DE PICHE. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 13, 2003, Santa Maria. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 2003.
- CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F. Alterações micrometeorológicas causadas pela estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p.15-26, 2003.
- CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F., KLOSOWSKI, E. S. Balanço de energia em pimenteiro sob cultivo protegido e a campo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.159-167, 2001.
- CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F., KLOSOWSKI, E. S. Efeito do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.735-743, 2002.
- DALSASSO, L. C. M.; HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; SCHENEIDER, F. M.; STRECK, N.A.; DALMAGO, G.A. Consumo de água do tomateiro tipo salada em estufa plástica, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v.5, n.1, p.61-67, 1997.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO. 194 p., 1979. (Irrigation and drainage paper, 24).
- DUARTE, H.A., HENCKEL, L.C. Comportamento da umidade relativa do ar interno e externo em cultivo protegido de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) no Rs, In: XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2004, São Pedro-SP. **Anais...** São Pedro: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2004. 1 CD-ROM.
- EVANGELISTA, A.W.P., PEREIRA, G.M., Avaliação de dois tipos de evaporímetros na estimativa da demanda evaporativa do ar (ET) no interior de casa de vegetação, em Lavras - MG, **Ciência agrotécnica**, Lavras, v.27, n.6, p.1348-1353, 2003.

EVANGELISTA, A.W.P.; PEREIRA, G. M. . Efeito da Cobertura Plástica de Casa de Vegetação sobre os Elementos Meteorológicos em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras - MG, v. 25, n. 4, p. 952-957, 2001

FAO, 2002, **Statistics**, Disponível de: <http://www.fao.org/>.

FARIAS, J. R. B., BERGAMASCHI, H., MARTINS, S. R. et al. Alterações na temperatura e umidade relativa do ar provocadas pelo uso de estufas plásticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 51-62, 1993b.

FARIAS, J.R.B.; BERGAMASHI, H.; MARTINS, S.R.; BERLATO, M.A.; Efeito da cobertura plástica da estufa sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, n.1, p.31-36, 1993.

FOLEGATTI, M.V.; SCATOLINI, M.E., PAZ, V. S.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J. A.; Efeito da cobertura plástica sobre os elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.155-163, 1997.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.26, n.3, p.403-410, 1991.

FREVET, D.R.; HILL, R.D., BRAATEN, B.C. estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Enge.* ASCE, n.109, p.265-270, 1983.

FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F., Balanço de radiação e energia da cultura de alface em estufa de polietileno. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.34, n.10, p.1775-1786, 1999.

FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F.; ASSIS, S.V. Balanço de energia em cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.) em estufa de polietileno. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 8., 1997, Porto, Portugal. **Anais**. Porto: IESS, p. 599-604. 1997.

FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em estufa de polietileno, In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Proceedings online...** Available from: <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php>.

FURLAN, R. A.; FOLEGATTI, M.V. Distribuição vertical e horizontal de temperaturas do ar em ambientes protegidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.93-100, 2002.

GALVANI, E. ; ESCOBEDO, J.F. ; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro, **Bragantia**, Campinas, v.60, n.2, p.139-147, 2001.

GUISELINE, C., SENTELHAS, P.C., OLIVEIRA, R.C. Uso de malhas e sombreamento em ambiente protegido II: efeito sobre a radiação solar global e a fotosinteticamente ativa no crescimento e produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p.15-26, 2004.

HATZ, T. & HANSON, B. **Drip Irrigation and fertigation Management of processing Tomato**. Vegetable Research and Information Center, Davis, University California, p. 1-9, 2005.

HELDEWIN, A.B.; STRECK, L.; SCHNEIDER, F.M.; GRIMM, E.L.; NIED, A.H.; TAZZO, I.F. Modelos para estimativa da evapotranspiração máxima da abóbora italiana em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.12, n.1, p.75-86, 2004.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and Irrigation. Crop requirements**. New York, American Society of Civil Engineers. 1990. 330p.

JOILET, O. & BAILEY, B.J. The effects of climate on tomato transpiration in geenhouse: messurements and models comparison. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.58, p.43-62, 1992.

JUNQUEIRA, A.M.J.; ANDRÉ, R.G.B.; PINHEIRO, F.M.A. Consumo de água pelo feijoeiro comum, cv.carioca, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.12, n.1, p.51-56, 2004.

KASHYAP, P.S. & PANDA, R.K. Evaluation of evapotranspiration estimation method and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region, **Agricultural Water Management**, v. 50, p. 9-25. 2001.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo- planta – atmosfera**, NOBEL, São Paulo, 1984.

LEE, B. W.; SHIN, J. H., Optimal Irrigation Management System of Greenhouse Tomato based on Steam diameter and Transpiration monitoring, **Agricultural Information Technologies in Asia and Oceania**, p.87-90, 1998.

- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**: 1.ed. Piracicaba Dep. Física e Meteorologia (ESALQ/USP). 1995 497p.
- LIMA, G.P.B., AGUIAR, J.V., COSTA, R.N.T., PAZ, V.P.S. Rendimento de cultivares de caupi (*Vigna unguiculata* L Walp.) submetidas à diferentes lâminas de irrigação. **IRRIGA**, Botucatu-SP, v.4-, n.3, p.205-212, 1999.
- LIMA, J.M.S. **Balanco hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano**, 2004, 166f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.
- LIMA, M.G.; LEAL, F.R.; SETUBAL, J.W. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura para o tomateiro em teresina -PI , **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria,v.2,n.1,p.29-32, 1994.
- LIU C. ; ZHANG X.; ZHANG Y. Determination of daily evaporation of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter, **Agricultural and Forest Meteorology**, n.111, p.109-120, 2002.
- MANCINI, L. & CALANDRO, A. The effect of irrigation method and regime on greenhouse dalad tomatoes. **Irrigazione e Drenaggio**, Bologne, v.36, n.4, p.70-73, 1989.
- MEZA, A.G. & LEOS, B.A.H. Estimacion de las necesidades hídricas del tomate, México, **TERRA**, v. 18, n.1, p.45-50, 2000.
- MIRANDA, F.R. de; YODER, R.E.; SOUZA, F. de. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.1, p.107-10, 1999.
- MONTEIRO, J.E.B.A.; SENTELHAS, P.C.; CHIAVEGATO, E.J., GUISELINE, C. SANTIAGO,A.V.; PRELA, A. Estimación da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.1, p.15-24, 2005.
- MONTEITH, J.L & UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. 2ªed. London Eward Arnold, 1990. 291p.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environmental. In: The state and movement of water in living organisms, **Atas and Abstrat...** Cambridge, v. 19, p. 205-234, 1965.
- MONTENEGRO, A. A. T. ; BEZERRA, F. M. L. ; LIMA,R. N. de, Evapotranspiração e coeficientes de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n.2, 2002.

- MONTENEGRO, A.O A. T.; BEZERRA, F. M. L.; LIMA, R. N. Evapotranspiração e Coeficientes de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.464-472, 2004
- MOURA, M.V.T.: EL O HIJO DE MARQUES, EL S.; BOTREL V. À.; FRIZZONE, J., À. Estimativa fazem consumo de água na cultura da cenoura (carota *Daucus*, L.) Nantes na região de Piracicaba, através fazem método fazem hídrico de balanço. **Scientia Agrícola**, v. 51, n. 2, p. 284-291, 1994.
- Murray, F.W. On the computation of saturation vapor pressure. **J. App. Meteorology**. v.6, p.203-204. 1967
- OLIVEIRA, C.A.S; MOREIRA, H. M.; MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. **Área irrigada, produção e produtividade das principais hortaliças no Brasil – 1985 / 1986**. Brasília, EMBRAPA-CNPQ, 1989. 62p. (Documento 4).
- ORTEGA-FARIAS, S. CALDERON R.; MARTELLI N.; ANTONIOLETTI, R. 1991. Evaluacion de un modelo para estimar la radiacion neta sobre un cultivo de tomate industrial. **Agricultura Técnica**, Chile, Vol. 61, n. 14, p. 41 – 49, 2004.
- ORTEGA-FARIAS, S. MÁRQUEZ J.; VALDÉS H.; PAILLÁN, H. . 1991. Effect of four different levels of water application on yield and quality of greenhouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. FA-144) produced in autumn. **Agricultura Técnica**, Chile, Vol. 61, No. 4, p. 479 – 487, 2001.
- ORTEGA-FARIAS, S., CALDERON R.; ACEVEDO, C.; FUENTES, S., Estimation de la evapotranspiracion real diaria de un cultivo de tomates usando la equacion de Penman-Monteith. **Ciencia Investigaçao Agraria**. v. 27, n. 2, p.91 – 96, 2000.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183 p.
- PEREIRA, C. ; MARCHI, G.; SILVA, E.C. **Produção de Tomate-caqui em Estufa**, Série extensão Universidade Federal de Lavras, Lavras –MG, 26 p. 2000.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F. IBANEZ, M. ROSELL, J.I. Assessment of reability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.97, n.3, p.141-150, 1999.
- PEZZOPANE J. E. M.; OLIVEIRA, P. C.; REIS, E. F.; LIMA, J. S. S. Alterações microclimáticas causadas pelo uso de tela plástica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24,n.1,2004.

- PEZZOPANE, J. R. M., PEDRO JUNIOR, M. J., Balanço de energia em Vinhedo de Niagara Rosada. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.155-161, 2003.
- POSS, J.A.; RUSSELL, W.B.; SHOUSE, P.J.; AUSTIN, R.S.; GRATTAN, S.R.; GRIEVE, C.M.; LIETH J.H.; ZENGA, L. Studies a system of volumetric lysimeter (VLS): an alternative to weigh lysimeters for Computers of plant-water relationships and Electronics in Agriculture. n. 43, p. 55-68. 2004.
- RADIN, B. BERGAMASCHI, H., REISSER JUNIOR, C., BAMI, L.A.,; MATZENAUER, R., DIDONÈ, I.A., Eficiência da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v.38,n.9, p.1017-1023, 2003.
- RADIN, B. **Eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 124 f.Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- RADIN, B. **Necessidades de água do milho quantificada em lisímetro e pelo modelo de Penman-Monteith modificado**. 1998. 97p. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 1998.
- RANA, G. & KATERJI, N., Measurement and estimation o factual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.125-153, 2000.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-água-atmosfera**. 4.ed. Campinas: 1985. 466p.
- REISSER JUNIOR, C., BERGAMASCHI H., RADIN, B., BERGONCI, J.I., Alterações morfológicas do tomateiro em resposta à redução de radiação solar em ambientes de estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 7-14, 2003.
- RIGHI, E.Z., ANGELOCCI, R.L., BURIOL, G.A., HELDWEIN, A.B., Transpiração do tomateiro cultivado em estufa plástica e suas relações com a radiação solar e déficit de saturação do ar. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p. 9-18, 2002.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L.; VERMA, S.B. **Microclimate: The biological environment**, 2.ed. New York: Jonh Wiley, 1983, 495p.

- SANDRI, M.A.; ANDRIOLO, J.L.; WITTER, M.; DAL ROSS, T. Effect of shading on tomato plants grow under greenhouse, **Horticultura brasileira**, v.21, n.4, p.642-645, 2003.
- SILVA, E.L. **Relação água – planta – atmosfera**, Lavras, UFLA/FAEPE, 86p il. 1999.
- SILVA, F.C. **USO DE DISPOSITIVOS LISIMÉTRICOS PARA MEDIDA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**. Piracicaba, 1996. 73p. Dissertação (Mestrado)–Escola de Superior Agricultura “o Luiz de Queiroz”, de Universidade o São Paulo. 1996.
- SILVA, V.P. R., AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; BASSOI, L. H.; TEXEIRA, A.H.C.; SOARES, J.M. E SILVA, J.A.M., Estimativa da Evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.456-462, , 2001.
- SOUZA, D.K.S.; LOPES, M.J.A.; NASCIMENTO FILHO, M.F. Efeito da tela plástica na temperatura do solo e radiação solar na cultura do pimentão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. p.339-41. 1995.
- SOUZA, J. L. ; NICÁCIO, R. .M. ; MOURA, M. A. L. . Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil . **Renewable Energy**, Reading, v. 30, n. 30, p. 1203-1220, 2005.
- SOUZA, J. L.; CALHEIROS, C. B. M. ; SANTOS, E. A. Evapotranspiração Pelo Método de Penman-Monteith Representativa da Região do Tabuleiro Costeiro de Alagoas. In: A MODERNIZAÇÃO DA METEOROLOGIA BRASILEIRA, 1998, Brasília. **ANAIS (CD-ROM-AG98004) DO X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA VIII CONGRESSO DA FLISMET. BRASÍLIA, 26 a 30 DE OUTUBRO** : Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. v. 1. p. 1-5.
- SOUZA, J.L. **Saldo radiômetro com termopilha de filme fino e aplicação no balanço radiação e energia em cultivo de feijão–vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) em casa de vegetação com cobertura de polietileno**. Botucatu, 1996. 174 f., Tese (Doutorado). Botucatu /UNESP, 1996.
- TEODORO, I. **Avaliação da evapotranspiração e desenvolvimento do milho irrigado na região de Rio Largo - AL. 2003**, 98f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, 2003.

- TIMM, L.C., **Efeito do manejo da palha da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo**, Piracicaba, 2002. 73p. Tese (Doutorado)–Escola de Superior Agricultura “o Luiz de Queiroz”, de Universidade o São Paulo. 2002.
- TOLEDO FILHO, M.R. **Estudo microcrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**, 2001. 150f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós Graduaçãoem Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo de Potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na Agricultura Irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.286-292, 1999.
- TYAGI, N.K.; SHARMA, D.K.; LUTHRA, S.K Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. **Agricultural Water Management**, v.45, n. 1 , p. 41-54, 2000.
- VALANDRO, J., BURIOL, G.A., MARTINS, S.R., HELDWEIN, A.B., STANGER, R. Relação entre o conteúdo de água, potencial hídrico e resistência estomática em plantas de tomateiro cultivadas sob distintos níveis hídricos em ambiente protegido, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria,v.12, n.1, p.57-66, 2004.
- VALANDRO, J.; ANDRIOLO,L.; BURIOL, G.A. .Dispositivo lisimetrico simples para determinar a transpiração das hoirtalicas cultivadas fora do solo, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.189-193, 1999.
- VALDE’S, H., ORTEGA-FARIAS, S., ARGOTE, M., LEYTON, B., OLIOSO, A., PAILLA’N, H., 2004. Estimation of Evapotranspiration over a Greenhouse Tomato Crop Using the Penman–Monteith Equation. **Acta Horticulturae**. (ISHS) , v. 664, p. 477–482.
- VÁSQUEZ, M. A. N. ; FOLEGATTI, M.V.; DIAS, .N. S. ; SILVA, C. R. Efeito do ambiente protegido cultivado com melão sobre os elementos meteorológicos e sua relação com as condições externas, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.137-143, 2005.
- VÁSQUEZ, M. A. N;. FOLEGATTI. M. V;. DIAS, N. DA S; SILVA4 C. R DA; SÁS JOCELITO S. Elementos meteorológicos em ambiente protegido cultivado com melão e suas relações com as condições externas XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, **Anais...** - São Pedro – SP. 2004.

- VENTURA F.; SPANO D.; DUCE P.; SNYDER R.L. An evaluation of common evapotranspiration equations, **Irrigation Science**, v.18, p.163-170, 1999,
- VIANA, T.V.A.; FOLEGATTI, M.V.; Azevedo, B.M.; BOMFIM, G.V.; ELOI, W.M. Evapotranspiração obtida com sistema de Razão de Bowen e com um lisímetro de pesagem em ambiente protegido. **Irriga** – Botucatu, vol.8, n.2, p.113-119, 2003.
- VILAGRA, M.M.; BACCHI, O.O.S.; TUON, R.L.; REICHARDT, K. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.72, n. 1, p. 317-325, 1995.
- VILLA NOVA, N.A.; FAVARIN, J.L.; ANGELOCCI, L.R.; DOURADO-NETO, D. Estimativa do KC do cafeeiro em função de variáveis climatológicas e fitotécnicas, **Bragantia**, Campina, v. 61, n.1, 2002.
- WILMOTT, J. D. **Estadistics for the evaluation and comparision of models**, **Journal of geophysical research**, Washington, v. 90, n.5, p.8995-05, 1985.