**RESPOSTA DE PLANTAS DE PIMENTÃO (*Capsicum annuum* L.) À
IRRIGAÇÃO E AO ENRIQUECIMENTO DA ATMOSFERA COM
CO₂, EM AMBIENTE PROTEGIDO**

FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Engenheira Agrícola

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

**Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura
“Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia,
Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.**

**PIRACICABA
Estado de São Paulo – Brasil
Junho – 2001**

ERRATA

Página	Item	Linha	Onde se lê	Leia-se
IX		11	un	um
IX		11	e parcialmente	e em um dia parcialmente
IX		24	Padrão da	Padrão de
X		13	valores médios de área foliar	valores de área foliar média
XIII		1	Reposta	Resposta
23	Legenda	7	Volume 2	Volume 4
30	3.2.8	4	$T = \frac{[(P_{i-1}P_i)/\gamma] \cdot 1000}{q}$	$T = \frac{[(P_{i-1} - P_i)/\gamma] \cdot 1000}{q}$
39	4.1	24	Figura 13	Figura 12
45	4.2.2	Fig. 15	C1, C1, C3 e C4	C1, C2, C3 e C4
50	4.2.3.2	Fig. 18	do solo coletada	do solo determinada
51	4.2.4.1	7	verifica-se na	verifica-se
61	4.2.5.1	3	dados de peso	dados médios de peso
68	4.2.5.4	Tabela 7, 5ª coluna	letras maiúsculas à esquerda da média	letras minúsculas à esquerda da média
81	4.2.6	8	Caracteres dos frutos	Características dos frutos
82	4.2.6.1	26	água até C3	água até V3
82	4.2.6.1	Tabela 13, 4ª coluna	letras maiúsculas à esquerda da média	letras minúsculas à esquerda da média
87	4.2.6.3	22	um caráter de	uma característica de
5	2	10	pentagrama	petagrama

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Rezende, Fátima Conceição

Resposta de plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L.) à irrigação e ao enriquecimento da atmosfera com CO₂ em ambiente protegido / Fátima Conceição Rezende. -- Piracicaba, 2001.

107 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.
Bibliografia.

1. Cultivo protegido 2. Dióxido de carbono 3. Estufa 4. Irrigação 5. Pimentão I. Título

CDD 635.643

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

*A meus pais **José Augusto e Conceição** que sempre
me apoiaram e pelo sacrifício e dificuldades que
passaram em prol da formação de seus filhos;*

*À **Liliane** pela alegre convivência e ensinamentos
em sua breve permanência entre nós;*

*Aos meus irmãos, sobrinhos e cunhados pelo apoio,
e alegria que proporcionam;*

Ofereço

AGRADECIMENTOS

- À Deus, pela vida, saúde e paz, por Sua presença em todos os momentos de minha existência e pela organização e harmonia da Sua criação;
- Ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, pela liberação para cursar o doutorado;
- Ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, pela oportunidade concedida para a realização do curso e desenvolvimento do trabalho de tese;
- Ao Programa Institucional de Capacitação de Docentes e Técnicos/CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;
- Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone pela orientação e estímulo dado para desenvolver este trabalho, e pelo convívio amistoso durante o curso;
- Aos Professores Antônio Marciano da Silva, Manoel Alves de Faria, Alberto Colombo e Élio Lemos da Silva, da Universidade Federal de Lavras, pelo incentivo para a realização deste curso;
- Ao Prof. Tarlei Arriel Botrel, pelo apoio e sugestões para o desenvolvimento do trabalho;
- Aos Professores Marcos Vinicius Folegatti, João Tessariolli Neto, Ricardo Ferraz de Oliveira e Rubens Duarte Coelho pelas valiosas contribuições e sugestões;
- Aos colegas do curso Anderson Soares Pereira, Eliezer Santurbano Gervásio, Olívio Soccol, Ênio Farias F. e Silva e alunos da graduação Karina Senna Passos e Marco Antônio Jacomazzi pela ajuda prestada durante o trabalho de campo;

- Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural Sr. Antônio A. Gozzo, Antônio César de S. Rocha e Gilmar B. Grigolon pela colaboração;
- À Coordenação do Curso, professores, colegas do curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização do curso e deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xiii
SUMMARY	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Efeito do dióxido de carbono sobre as plantas	6
2.2 Cultura do pimentão e o ambiente	12
2.2.1 Irrigação da cultura	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Curva de fotossíntese em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e da concentração de CO ₂	20
3.2 Condução do experimento em casa de vegetação	20
3.2.1 Estrutura experimental	20
3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental	22
3.2.3 Monitoramento ambiental	22
3.2.3.1 Temperatura e umidade relativa	22
3.2.3.2 Radiação global e fotossinteticamente ativa	22
3.2.3.3 Intensidade de luz	25
3.2.3.4 Temperatura do solo	26
3.2.4 Características do solo	26
3.2.5 Preparo dos vasos	27
3.2.6 Cultura e preparo das mudas	28
3.2.7 Transplântio das mudas e condução das plantas	28
3.2.8 Sistema de irrigação	29
3.2.9 Sistema de injeção de CO ₂	30
3.2.10 Elementos fisiológicos	33
3.2.10.1 Condutância da folha à difusão do vapor d'água	33
3.2.10.2 Potencial de água na folha	34
3.2.11 Parâmetros analisados	34
3.2.11.1 Altura das plantas	34

3.2.11.2 Diâmetro do caule	34
3.2.11.3 Área foliar	34
3.2.11.4 Peso fresco total dos frutos	35
3.2.11.5 Número de frutos	35
3.2.11.6 Comprimento, diâmetro e espessura da polpa dos frutos	35
3.2.11.7 Peso seco dos frutos	36
3.2.11.8 Peso seco do material de desbaste	36
3.2.11.9 Peso seco de folhas, caule e pecíolo	36
3.2.11.10 Peso seco de raiz	36
3.2.11.11 Peso seco total	37
3.2.11.12 Peso seco da parte aérea	37
3.2.11.13 Eficiência de uso da água	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Resultados do ensaio preliminar: taxa de assimilação de CO ₂	38
4.2 Condução do experimento em casa de vegetação	41
4.2.1 Consumo de água pela planta	41
4.2.2 Concentração de gás carbônico	43
4.2.3 Elementos fisiológicos	46
4.2.3.1 Condutância estomática	46
4.2.3.2 Potencial de água na folha	49
4.2.4 Características da planta	51
4.2.4.1 Altura da planta	51
4.2.4.2 Diâmetro do caule	53
4.2.4.3 Área foliar	56
4.2.5 Componentes de produção	61
4.2.5.1 Peso fresco total dos frutos	61
4.2.5.2 Eficiência de uso da água	63
4.2.5.3 Número de frutos	65
4.2.5.4 Peso seco de fruto	67
4.2.5.5 Peso seco da folha	70
4.2.5.6 Peso seco de caule	73
4.2.5.7 Peso seco da parte aérea	74
4.2.5.8 Peso seco de raiz	76
4.2.5.9 Peso seco total da planta	78
4.2.6 Caracteres dos frutos	81
4.2.6.1 Comprimento do fruto	81
4.2.6.2 Diâmetro do fruto	84
4.2.6.3 Espessura da polpa	87
4.3 Considerações finais	89
4.3.1 Confinamento das plantas em vasos	89
4.3.2 Temperatura do ar e do solo	90

4.3.3 Intensidade de luz	91
4.3.4 Umidade relativa do ar	92
4.3.5 Nutrição	92
5 CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Aparelho IRGA LI – 6400, usado para medir a fotossíntese	21
2 Esquema da área experimental.....	23
3 Cortes transversal e longitudinal das estufas e detalhes das bancadas	23
4 Variação diária da temperatura média do ar dentro dos ambientes das quatro estufas	24
5 Variação diária da umidade relativa média do ar dentro dos ambientes das quatro estufas	24
6 Radiação global (Rg) e fotossinteticamente ativa (PAR), medidas dentro das estufas em um dia sem nuvens (a) e parcialmente nublado (b)	25
7 Intensidade luminosa média (Lux), medida dentro e fora das estufas, em um dia sem nuvens (a) e parcialmente nublado (b)	25
8 Temperatura do solo e do ar, medida no ambiente C1 (a) e no ambiente C3 (b)	26
9 Curva de retenção de água no Latossolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento	27
10 Detalhes do sistema de injeção de CO ₂ utilizado no experimento	31
11 Aparelho LI-800 usado para medir a concentração de CO ₂	33
12 Taxa de assimilação de CO ₂ em pimentão, em função da concentração de CO ₂ e da PAR	38
13 Taxa de assimilação de CO ₂ em pimentão, em função da PAR	40
14 Evapotranspiração acumulada da planta de pimentão, cultivada em ambiente com concentração normal de CO ₂ e irrigada com volume de água igual à evapotranspiração medida	42
15 Padrão da concentração de CO ₂ nos ambientes (estufas) definidos pelos tratamentos (C1) 1000µmol.mol ⁻¹ ; (C2) 800µmol.mol ⁻¹ ; (C3) 600µmol.mol ⁻¹ e (C4) sem enriquecimento com CO ₂	45
16 Condutância estomática medida nos ambientes C1, C2, C3 e C4 em função do volume de água aplicado	47
17 Condutância estomática para os volumes de água V1, V2, V3 e V4 em função da concentração de CO ₂ (C1, C2, C3 e C4)	48
18 Potencial de água na folha medido antes de nascer o sol (a), ao meio dia (b) e umidade do solo coletada antes do nascer do sol	50

19	Altura média das plantas em função dos volumes de água aplicado para cada concentração de CO ₂ (C1, C2, C3 e C4)	52
20	Altura média das plantas em função da concentração de CO ₂ para cada volume de água aplicado (V1, V2, V3 e V4)	53
21	Diâmetro médio do caule em função dos volumes de água aplicado para cada concentração de CO ₂ (C1, C2, C3 e C4)	54
22	Diâmetro médio do caule em função da concentração de CO ₂ para cada volume de água aplicado (V1, V2, V3 e V4)	55
23	Área foliar média das plantas em função dos volumes de água aplicado para cada concentração de CO ₂ (C1, C2, C3 e C4)	56
24	Área foliar média das plantas em função da concentração de CO ₂ para cada volume de água aplicado (V1, V2, V3 e V4)	58
25	Diagrama de dispersão entre os valores médios de área foliar (cm ²) medidos e estimados pelo modelo	60
26	Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso fresco de fruto (g) medidos e estimados pelo modelo	64
27	Diagrama de dispersão entre os valores médios de número de frutos observados e estimados pelo modelo	68
28	Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco do fruto (g) medidos e estimados pelo modelo	70
29	Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco das folhas (g.planta ⁻¹) medidos e estimados pelo modelo	72
30	Diagrama de dispersão entre os valores médios peso seco da parte aérea da planta (g.planta ⁻¹) medidos e estimados pelo modelo	77
31	Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco de raiz (g.planta ⁻¹) medidos e estimados pelo modelo	79
32	Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco total da planta (g.planta ⁻¹) medidos e estimados pelo modelo	81
33	Diagrama de dispersão entre os valores médios de espessura de polpa (mm) medidos e estimados pelo modelo	88

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Análise química do solo utilizado no experimento	27
2 Volume de água previstos para aplicação por planta, volumes de água aplicados, volumes de água armazenados no vaso e volumes percolados durante o ciclo da cultura em função da concentração de $\text{CO}_2(\mu\text{mol.mol}^{-1})$	43
3 Médias de área foliar (cm^2) da cultura para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2(\mu\text{mol.mol}^{-1})$ . ..	59
4 Médias de peso fresco de fruto (g) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 (\mu\text{mol.mol}^{-1})$ ...	61
5 Médias de eficiência de uso da água (g.litros^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 (\mu\text{mol.mol}^{-1})$	64
6 Médias do número de frutos por planta, em sete colheitas, para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 (\mu\text{mol.mol}^{-1})$	67
7 Médias de peso seco de fruto (g) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 ((\mu\text{mol.mol}^{-1})$ ..	68
8 Médias de peso seco das folhas (g.planta^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 ((\mu\text{mol.mol}^{-1})$	71
9 Médias de peso seco do caule (g.planta^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 ((\mu\text{mol.mol}^{-1})$	73
10 Médias de peso seco da parte aérea (g.planta^{-1}) da planta para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 ((\mu\text{mol.mol}^{-1})$	75
11 Médias de peso seco da raiz (g.planta^{-1}) da planta para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 ((\mu\text{mol.mol}^{-1})$	77
12 Médias de peso seco total da planta (g.planta^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de $\text{CO}_2 ((\mu\text{mol.mol}^{-1})$	79

13	Médias de comprimento de frutos (mm) da primeira colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO ₂ (μmol.mol ⁻¹)	82
14	Médias de comprimento de frutos (mm) da segunda colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO ₂ (μmol.mol ⁻¹)	83
15	Médias de diâmetro de fruto (mm) da primeira colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO ₂ (μmol.mol ⁻¹)	85
16	Médias de diâmetro de fruto (mm) da segunda colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO ₂ (μmol.mol ⁻¹)	86
17	Médias de espessura de polpa (mm) dos frutos da primeira colheita, para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO ₂ ((μmol.mol ⁻¹)	87

REPOSTA DE PLANTAS DE PIMENTÃO (*Capsicum annuum* L.) À IRRIGAÇÃO E AO ENRIQUECIMENTO DA ATMOSFERA COM CO₂, EM AMBIENTE PROTEGIDO

Autora: FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

RESUMO

Com o objetivo de estudar o efeito do enriquecimento do ambiente com CO₂ e do volume de água aplicado sobre o desenvolvimento e a produção de plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L.), cultivar zarco, em ambiente protegido, conduziu-se um experimento na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, em Piracicaba - SP. Foram utilizadas quatro estufas e, em cada uma, aplicou-se uma concentração de CO₂. O pimentão foi cultivado em vasos com capacidade de 20 litros. O CO₂ foi distribuído no ambiente na forma gasosa, sobre as linhas das plantas, através de microtubos instalados à três metros de altura. Utilizou-se o sistema de irrigação por gotejamento, com um gotejador por planta. As irrigações, com frequência de dois dias, foram controladas com base no volume de água evapotranspirado (Vet), determinado por pesagem diária de três vasos adicionais localizados na estufa sem enriquecimento da atmosfera com CO₂. O delineamento experimental foi de grupos de experimentos em blocos casualizados, com quatro níveis de CO₂ (C1=1000µmol.mol⁻¹; C2=800µmol.mol⁻¹; C3=600µmol.mol⁻¹ e C4 = 367µmol.mol⁻¹, que é aproximadamente a concentração normal da atmosfera) e

quatro volumes de água (0,5 Vet; 0,65 Vet; 1,0 Vet e 1,35 Vet), com quatro repetições. Foram analisadas as características relacionadas ao desenvolvimento da planta, a produção, além do consumo de água, eficiência de uso da água, concentração de CO₂, condutância estomática e potencial de água na folha. Verificou-se que o enriquecimento do ambiente com CO₂ reduziu o consumo de água pela planta e promoveu aumento na produção da cultura e na eficiência de uso da água. Nos ambientes com maior concentração de CO₂, a maior produção foi observada nos tratamento que receberam menor volume de água, entretanto nos que receberam maior volume de água a maior produção foi observada no ambiente com 600 μmol.mol⁻¹. O aumento da produção nos ambientes com enriquecimento de CO₂, foi devido a um aumento do peso dos frutos e não no número de frutos produzidos. O peso seco das folhas e caules tendeu a ser maior no ambiente sem enriquecimento de CO₂. Durante o período de aplicação do gás, houve redução da condutância estomática em todos os ambientes e o potencial de água na folha tendeu a ser maior nos ambientes com enriquecimento de CO₂.

PEPPER PLANTS (*Capsicum annuum* L.) RESPONSE FOR IRRIGATION AND ATMOSPHERE CO₂ ENRICHMENT IN CONTROLLED ENVIRONMENT

Author: FÁTIMA CONCEIÇÃO REZENDE

Adviser: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

SUMMARY

The objective of this work was to study the effects of atmospheric CO₂ enrichment and water supply on the development, growth and yield of pepper plants (*Capsicum annuum* L.), cultivar zarco. The experiment was carried out the experimental area of the Agricultural Engineering Department of Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, at Piracicaba, São Paulo state, in four-controlled environment. Pepper plants were growth on containers with 20L and the CO₂ was applied through micro pipes located at 3m of height in the controlled environment. A drip irrigation system, having one drip by plant was used to irrigate the pepper plants. The irrigation amounts were controlled based on the amount of water evapotranspired, determined by daily weighting of 3 containers located in the controlled environment. The experimental design was a randomized blocks with four replication; four levels of CO₂ (C1=1000 μ mol.mol⁻¹; C2=800 μ mol.mol⁻¹, C3=600 μ mol.mol⁻¹ and C4=367 μ mol.mol⁻¹) and four irrigation amounts (0,5; 0,65; 1,0 and 1,35 of water evapotranspired). It was analysed the plant development and growth, yield, water use efficiency, stomatal conductance and the water potential on the leaves. It was observed that the CO₂

enrichment reduced the water consumed by the plants and improved the yield and consequently the water use efficiency. In the controlled environment with high CO₂ level, the yield was higher in the treatments that received less water amount. In the treatments that received high irrigation amount the highest yield was observed with 600 $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ of CO₂. The yield increased in the treatments with high level of CO₂ due to the increase in the fruit weight. The leaf and stem dry matter weight had a tendency to be higher in an environment without CO₂ enrichment. During the CO₂ application, it was observed a decreased in the stomatal conductance in all environment studied. The water potential on the leaves showed to be higher in the environment enriched with CO₂.

1 INTRODUÇÃO

O uso de tecnologia na produção agrícola tem como objetivo minimizar os efeitos de fatores adversos que limitam o processo fisiológico das culturas, o que possibilita o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade dos produtos e a redução dos custos de produção. O uso do gás carbônico (CO_2), no enriquecimento de ambientes protegidos para o cultivo de hortaliças, flores e frutas vem sendo estudado desde o início do século XX como recurso para aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos. Entretanto, o efeito positivo do enriquecimento do ambiente com CO_2 nem sempre foi observado nos experimentos que visavam avaliar o desenvolvimento e a produtividade das culturas, devido, provavelmente, a poluição causada pela fonte de CO_2 utilizada e/ou a elevadas concentrações do gás, uma vez que, até pouco tempo, não existia dispositivos para medir e controlar a vazão do gás.

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas permitiu obter gás carbônico com alto grau de pureza, e desenvolver equipamentos eficientes para medir e controlar a concentração do mesmo. Foi possível, também, construir casas de vegetação mais adequadas para permitir o confinamento do gás e que possibilitasse a aplicação de menores concentrações. Houve, ainda, avanço no conhecimento sobre a resposta das plantas ao enriquecimento do ambiente com CO_2 , o que viabilizou a utilização dessa técnica em ambientes protegidos.

No Brasil, o cultivo de hortaliças em ambiente protegido não é uma prática recente. Entretanto, só no início da década de 90 é que esta técnica de produção passou a ser amplamente utilizada. Estimativas indicavam que, em 1994, a área de cultivo em ambiente protegido era de aproximadamente 2 mil hectares, com crescimento anual em torno de 30%. As projeções apontavam para uma área de 10 mil hectares de

cultivo na virada do milênio (Minami, 1995). A área de produção em ambiente protegido no Brasil, no ano de 1998, não corroborou com as expectativas de crescimento do início da década. De acordo com um levantamento realizado em 1999, apenas 1.390ha foram cultivados com hortaliças nesse sistema, sendo São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul os estados com maior área de produção. Dentre as hortaliças mais utilizadas destacaram-se o pimentão, a alface, o tomate e o pepino (Vecchia & Koch, 1999).

O pimentão é uma hortaliça de grande importância socio-econômica no Brasil e no exterior. No Estado de São Paulo, a cultura ocupa uma área maior que 8.000ha, com uma produção de aproximadamente 70 mil toneladas.ano⁻¹, e gera mais de 4.000 empregos, o que a torna o sexto produto agrícola em demanda de força de trabalho (CEAGESP, 1998). A sua pigmentação influencia no sabor, aroma e comercialização dos frutos. Atualmente, têm sido comercializados no Brasil frutos de coloração verde, vermelho, amarelo, laranja e creme. Além do seu valor econômico, também é uma importante fonte de vitaminas (C, B1, B2, A e niacina) e sais minerais, destacando o ferro e o fósforo. É uma das culturas mais indicadas para ser utilizada em ambiente protegido, pela grande produtividade que pode ser alcançada nessas condições, bem como pela melhor qualidade dos frutos, devido à maior proteção contra ataques de insetos, queimadura de sol e chuvas pesadas.

O manejo da irrigação em ambiente protegido assemelha-se muito às condições de regiões áridas, onde apenas a água de irrigação é responsável pelo suprimento das necessidades hídricas da cultura e, nesse caso, deve ser considerado o risco da salinização. O pimentão é muito sensível à falta e ao excesso de água no solo, e para serem obtidos rendimentos elevados, é necessário que o suprimento de água seja adequado, e que o solo fique relativamente úmido durante todo o ciclo da cultura.

Em cultivos irrigados a preocupação dos pesquisadores é saber como o aumento da concentração de CO₂ irá afetar a evapotranspiração da cultura, e consequentemente, o manejo da irrigação. O desenvolvimento de plantas maiores e mais vigorosas, em ambiente com enriquecimento de CO₂, podem estar associadas com o

aumento da evapotranspiração. Por outro lado, nesses ambientes a transpiração poderá ser menor devido ao fechamento parcial dos estômatos.

Todas as espécies vegetais podem obter benefícios com a aplicação do dióxido de carbono (CO_2), uma vez que a técnica melhora o metabolismo e o equilíbrio hormonal das plantas, aumenta a fotossíntese e absorção de nutrientes resultando em plantas mais produtivas, mais resistentes a doenças e ao ataque de pragas, o que melhora a qualidade dos frutos (Kimball et al., 1994).

No Brasil, a aplicação do dióxido de carbono (CO_2) é de uso recente e são poucos os estudos ecofisiológicos referentes às trocas de CO_2 em plantas. O efeito do gás carbônico sobre as plantas, bem como a sua influência na produtividade e qualidade dos produtos, as doses a serem usadas e os períodos de aplicação mais adequados para os diferentes tipos de cultivo, são aspectos que ainda precisam ser estudados e melhor entendidos, a fim de maximizar a relação benefício/custo.

De acordo com Tivelli (1998), no Estado de São Paulo há regiões que registram um fracasso de cerca de 70 a 80 % dos produtores por volta do segundo ano de exploração de cultivos em ambiente protegido. Parte desse insucesso pode ser explicado pela falta de pesquisas com relação ao manejo da cultura e mercado não diferenciado. Vecchia & Koch (1999) comentam que no período entre 1987 e 1998 foram apresentados 118 trabalhos envolvendo temas sobre o cultivo de hortaliças em ambiente protegido nos Congressos da Sociedade de Olericultura do Brasil. Do total de trabalhos apresentados, sete estudavam a cultura do pimentão e apenas cinco levavam em consideração a utilização da técnica da irrigação.

Observa-se, portanto, que existe grande potencial para aumentar a produtividade das plantas através da aplicação de gás carbônico. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito do enriquecimento do ambiente com diferentes concentrações de CO_2 em plantas de pimentão, híbrido Zarco, cultivado em casas de vegetação, associando-se diferentes volumes de água aplicados ao solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A demanda do mercado consumidor por produtos de melhor qualidade exige da comunidade científica o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias que proporcionem aumento na produtividade e qualidade dos produtos. No ciclo produtivo, o solo, a planta e o meio ambiente são fatores determinantes da produção. O solo atua como um reservatório de água e nutrientes para atender as condições necessárias ao desenvolvimento da planta. A planta, por sua vez, através de melhoramento genético, contribui com potencial produtivo específico para determinadas regiões e/ou condições de cultivo. O meio ambiente contribui com calor, luz, gás carbônico, oxigênio, entre outros.

De acordo com Mortensen (1987), as pesquisas sobre o efeito do gás carbônico no crescimento e produtividade das culturas vem sendo realizadas desde o início do século XX, em diferentes países da Europa e Estados Unidos, com resultados positivos bem convincentes. Entretanto, diversas limitações práticas persistiam para o produtor, que nem sempre conseguia obter acréscimo significativo no desenvolvimento e na produtividade das culturas. O autor comenta que estas limitações eram devidas principalmente às fontes de CO₂ utilizada e à falta de dispositivos para medir e controlar a concentração do gás.

Mudrick et al. (1997) comentam que o estudo dos efeitos causados pelo aumento da concentração do gás carbônico sobre as plantas são importantes, uma vez que o enriquecimento do ambiente com o gás vem sendo adotado com sucesso em ambiente protegido. Este enriquecimento tem por objetivo aumentar a produtividade e qualidade dos produtos, bem como para estudar o desempenho das plantas em ambientes com elevada concentração do referido gás, tendo-se em vista o aumento de sua

concentração na atmosfera terrestre. No entanto, o efeito do aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera difere das condições de casa de vegetação em escala de tempo e desenvolvimento. Na atmosfera a elevação é gradual, o que permite às plantas alterações de comportamento e, até, adaptações genéticas para altas produções em tais ambientes (Chmora & Mokronosov, 1994).

Desde o começo da era industrial, em meados do século XIX, até a atualidade, a concentração de CO₂ na atmosfera passou de 280ppmv (partes por milhão de volume) para aproximadamente 367ppmv, a uma taxa de crescimento de 1,5 ppmv.ano⁻¹ (Keeling & Whorf, 1999). As emissões globais de carbono para a atmosfera alcançaram 6,3 PgC.ano⁻¹ (Pg= pentagrama = 10¹⁵g = bilhões de toneladas) em 1998. Isto representa uma redução de 0,5% nas emissões, em relação ao ano anterior, sendo 6,3% maior do que em 1990 (Flavin, 1999).

Segundo Chmora & Mokronosov (1994) e Schaffer et al. (1999) a concentração de CO₂ na atmosfera pode atingir 600μmol.mol⁻¹ em 2050 e, com este aumento na concentração, prevê-se que a temperatura média global aumente entre 3°C e 4°C, sendo que nas regiões tropicais espera-se que este acréscimo fique entre 1°C e 2°C (Schaffer et. al., 1999).

O aumento global da concentração de CO₂ atmosférico, sem dúvida, afetará a agricultura, uma vez que o enriquecimento com CO₂ quase sempre aumenta a produção de biomassa em plantas C₃ (Idso & Idso, 1994), devido ao aumento da fotoassimilação (Allen et al., 1988). No entanto, não existe um consenso sobre os efeitos quantitativos do aumento do dióxido de carbono no crescimento devido às diferenças entre as espécies e ao efeito de fatores ambientais que limitam a resposta da planta ao CO₂ (Morison & Gifford, 1984b). De acordo com Pimentel (1998), os fatores ambientais que afetam o metabolismo de carbono e, conseqüentemente, a produtividade são a água, os nutrientes, a temperatura e a luz. No entanto, nas regiões tropicais o estresse por falta de luz dificilmente ocorre, principalmente para plantas C₃, que se saturam com baixas intensidades luminosas (600 a 800mmoles quanta. m⁻² s⁻¹).

A reação das diferentes espécies de plantas cultivadas em ambiente enriquecido com dióxido de carbono são distintas. Casella et al. (1996) verificaram que o efeito do dióxido de carbono no crescimento da grama foi variável durante as estações do ano, sendo maior no verão. O dióxido de carbono causa mudanças no metabolismo das plantas, e alguns estudos indicam que plantas C_3 podem apresentar maior eficiência na fixação de carbono pela rubisco (Hocking & Meyer, 1991) e redução na concentração de nitrogênio nos tecidos das folhas (Conroy, 1992; Conroy & Hocking, 1993 e Huluka et al., 1994). Foi observado também, que o aumento da concentração de CO_2 aumenta a incidência de clorose na ponta das folhas e acredita-se que seja resultado da redução da translocação de boro nesses ambientes (Nederhoff, 1992). No entanto, de acordo com Peñuelas et al. (1995a), sintomas como a clorose, necrose e enrolamento das folhas são similares àqueles causados pela falta de nutrientes, sendo que o aumento no fornecimento de nutrientes minimizaram estes sintomas.

2.1 Efeito do dióxido de carbono sobre as plantas

O carbono é o principal componente químico dos vegetais, constituindo aproximadamente 45% da sua matéria seca. A principal fonte de carbono é o CO_2 da atmosfera que é absorvido pelas plantas através dos estômatos, fixado e transformado em açúcares (Mortensen, 1987). De acordo com Chmora & Mokronosov (1994), a concentração normal de CO_2 na atmosfera, em torno de $367\mu\text{mol } CO_2$ por mol de ar, é considerada muito baixa para a máxima fotossíntese em plantas C_3 .

A taxa de fotossíntese líquida é um importante componente da produtividade e, geralmente, é expressa em unidades de CO_2 líquido absorvido pela planta ou por unidade de área foliar. O aumento na fotossíntese líquida pode resultar em aumento na produtividade, desde que outros fatores como a taxa de expansão da área foliar e translocação de nutrientes sejam constantes, ou aumentem concomitantemente com a taxa de fotossíntese líquida (Bravdo, 1986). A assimilação de CO_2 pelas plantas, conforme relata o autor, é limitada principalmente pela composição normal da atmosfera.

Os fatores ambientais que afetam a fotossíntese são a concentração de CO_2 do ambiente, temperatura e luz. Altas concentrações de CO_2 aumentam o gradiente de CO_2 entre a atmosfera e os locais de fixação nos cloroplastos. Por outro lado, o aumento da concentração de CO_2 reduz a condutância estomática. A taxa de acréscimo da condutância fotossintética na folha, com o aumento da concentração de CO_2 , depende do efeito relativo do CO_2 em cada um desses processos opostos. A temperatura atua na velocidade de reação de numerosas enzimas e no comportamento estomático. A luz é responsável pela conversão da energia luminosa em energia química, que será usada na fixação e redução de CO_2 e na condutância estomática (Bravdo, 1986).

O aumento da concentração de CO_2 normalmente aumenta a fotossíntese das plantas C_3 (Bazzaz, 1990), porém a magnitude desse acréscimo depende da temperatura, quando outros fatores, tais como a luz, não limitam a fotossíntese. Para a fotossíntese, o aumento da temperatura promove um acréscimo na atividade fotossintética até a temperatura ótima da cultura, decrescendo rapidamente com temperaturas maiores que a ótima. A temperatura ótima para a fotossíntese varia com o estágio de desenvolvimento das plantas, ficando na faixa de 20°C a 30°C para a maioria delas, sendo menor na fase de maturação (Acock et al., 1990). De acordo com esses autores, a concentração de gás carbônico no ambiente e a temperatura atuam na produção de carboidratos, sendo a temperatura a variável que mais influencia na mobilização e uso dos carboidratos. A respiração aumenta com a temperatura até o ponto em que altas temperaturas causam injúrias ao protoplasma, e o aumento da respiração não produz mais aumento no crescimento das plantas (Pimentel, 1998). Quanto menor a temperatura, menor o efeito do CO_2 .

Stanev & Tsonev (1986) consideram que para selecionar os níveis de enriquecimento de CO_2 durante o dia é necessário conhecer a flutuação diurna do conteúdo de CO_2 na estufa, que por sua vez, depende do número de plantas, da fase de desenvolvimento, da condição nutricional do substrato e das condições climáticas. Em algumas horas do dia, em estufas com enriquecimento de CO_2 , a concentração do mesmo se reduz à níveis inferiores à concentração normal do ar. A redução de CO_2

ocorre em estufas cultivadas em locais cujo solo é pobre em CO₂, bem como em estufas não ventiladas durante o dia.

A princípio, as concentrações de CO₂ adotadas foram entre 2.000 μL.L⁻¹ e 3.000 μL.L⁻¹, pois acreditava-se que quanto maior a concentração melhores seriam os resultados. Nos últimos anos os experimentos têm demonstrado que concentrações acima 900 μmol.mol⁻¹ (ou 900 μL.L⁻¹) raramente apresentam algum benefício (Calvert & Slack, 1975; Mortensen & Moe, 1983; Heij & Uffelen, 1984; Mortensen & Ulsaker, 1985). Segundo Mortensen (1987), para muitas espécies é impossível fornecer os valores ótimos da concentração de CO₂, uma vez que os experimentos com enriquecimento de CO₂ inclui poucos valores de concentração. Pela literatura é possível concluir que as concentrações ótimas para o desenvolvimento das plantas estão entre 600 μmol.mol⁻¹ e 900 μmol.mol⁻¹. A quantidade máxima de CO₂ que aplicada ao ambiente promoverá resultados benéficos à planta, pode ser definida a partir do ponto de compensação de CO₂, ou seja, no ponto onde o CO₂ liberado pela respiração e fotorespiração se iguala ao CO₂ fixado pela fotossíntese. Este ponto é variável conforme a espécie e valores superiores ao mesmo não promovem aumento na fotossíntese. Nilwik (1980) verificou que o aumento da temperatura do ar aumentou o valor do ponto de compensação de CO₂ devido ao aumento da fotorespiração nas folhas, e um aumento na respiração nas outras partes da planta.

Segundo Moore (1991), a redução da luminosidade promove redução na produtividade das culturas. Portanto, seria lógico que em ambientes enriquecidos com CO₂ o aumento da produtividade, do mesmo modo, deveria reduzir com a redução da intensidade de luz. No entanto, o efeito positivo do aumento da concentração de CO₂ independe das condições de luminosidade. Tem sido demonstrado que o efeito do CO₂ sobre o crescimento é aproximadamente o mesmo para níveis de luminosidade que variam entre 129 μE.m⁻².s⁻¹ e 268 μE.m⁻².s⁻¹, e que para algumas espécies de plantas, o aumento da concentração de CO₂ pode compensar uma redução de 30% na intensidade luminosa (Mortensen, & Moe, 1983; Mortensen & Ulsaker, 1985; Idso et al., 1994). Idso & Idso (1994) e Putkhal`Skaya (1997) comentam que o desempenho das plantas pode

variar ou seja, aproximadamente 50% das plantas têm crescimento acelerado em ambientes enriquecidos com dióxido de carbono e baixa luminosidade, enquanto 40% reduzem o seu crescimento quando a concentração de dióxido de carbono se aproxima de $700\mu\text{mol mol}^{-1}$, ocorrendo, também, um atraso no período de colheita.

O movimento estomático afeta simultaneamente as trocas de CO_2 e vapor de água entre o interior da folha e a atmosfera (Raschke, 1986). O aumento da concentração de CO_2 induz ao fechamento parcial dos estômatos e pode reduzir a taxa de transpiração da cultura e causar um possível aumento na temperatura da folha e redução na translocação de nutrientes pelo fluxo transpiratório (Huluka et al., 1994). Morrison & Gifford (1984a) comentam que a taxa de transpiração em culturas cultivadas em ambiente enriquecido com CO_2 foi reduzida em aproximadamente 21%. Kimbal & Idso (1983), revisando 46 observações com 18 espécies, verificaram que a redução média na taxa de transpiração foi de 34%. Por outro lado, Nederhoff & De Graaf (1993), verificaram que o efeito do CO_2 na transpiração não foi significativo, exceto para condição de radiação muito baixa.

Segundo Kimbal (1986), todos os anti-transpirantes aumentam somente a eficiência de uso da água, com exceção do dióxido de carbono, que é o único que aumenta também a absorção de CO_2 . O mesmo autor acredita que o efeito do estresse hídrico em plantas cultivadas em ambiente enriquecido com CO_2 pode ser mais complexo do que o efeito causado por outros fatores ambientais, como a luz, temperatura e déficit nutricional.

Plantas submetidas a estresses hídricos freqüentes respondem melhor a maiores concentrações de dióxido de carbono (Ham et al., 1995). Curtis et al. (1990) comentam que, mesmo em condições de luminosidade inadequada e estresse hídrico, a taxa de crescimento das plantas é aumentada em ambientes com alta concentração de dióxido de carbono. Segundo o autor, isso ocorre devido ao fechamento dos estômatos e maior expansão do sistema radicular, o que possibilita a exploração de um maior volume de solo.

O uso do dióxido de carbono sob a forma de gás ou misturado à água de irrigação, tem maior eficiência em cultivos conduzidos dentro de casa de vegetação. Durão & Galvão (1995) relatam que foram obtidos excelentes resultados com rosas, crisântemos e violetas africanas cultivadas em estufas. Nas rosas, verificou-se um incremento de produtividade de, aproximadamente, 12%, e nos crisântemos o aumento foi de 11%. Para as violetas africanas cultivadas em vasos, a última fase de produção, em geral de 3 meses, foi reduzida em 2 semanas. A floração foi mais abundante e homogênea, e o colorido das pétalas e folhas foi intensificado. De acordo com Mortensen (1987), plantas cultivadas em vasos, flores para corte, vegetais e espécies florestais respondem ao aumento da concentração de CO₂ através do acréscimo do peso da matéria seca, altura da planta, número de folhas e brotos laterais.

Estudos conduzidos por Enoch et al. (1970) com alface, pepino e pimentão, cultivados em túneis de plástico enriquecidos com CO₂, (aproximadamente 10.000 ppm) foram comparados com parcelas de controle em que as concentrações de CO₂ foram de 1500ppm a 5000ppm. Os estudos realizados mostraram que o pepino desenvolveu mais rapidamente e a produtividade foi aproximadamente 45% maior do que na parcela de controle. A alface apresentou aumento de produtividade similar ao do pepino, e, para o pimentão, o incremento foi de 20%. Os autores observaram que na parcela de controle a concentração de CO₂ reduziu rapidamente durante o período da manhã, atingindo níveis entre 100ppm e 150ppm, permanecendo assim até os túneis serem ventilados.

Enoch et al. (1976) avaliaram o efeito do aumento da concentração de CO₂ na produtividade do morango e pepino cultivados em estufas. O trabalho foi desenvolvido em 10 estufas, sendo que duas foram mantidas a concentração de 300ppm (controle), três com 900ppm, três com 1500ppm e duas com 3000ppm. A ventilação foi realizada mediante a abertura de portas e cortinas nas laterais das estufas, após a aplicação do CO₂, quando a temperatura do ar atingia 28°C. Após a redução da temperatura, as cortinas e portas eram fechadas. O morango apresentou produtividade de aproximadamente 31%, 43% e 51% maiores do que o tratamento de controle, para as

concentrações de 900ppm, 1500ppm e 3000ppm, respectivamente. A cultura do pepino, submetida a uma concentração de CO₂ de 3000ppm, apresentou uma produtividade 26% maior do que tratamento de controle.

Shaer & Van Bavel (1987) relatam que o uso da água pela cultura do tomate, cultivado em pequena casa de vegetação, reduziu entre 15% e 20% em função do enriquecimento do ambiente com CO₂ (1000ppmv). As medidas de consumo de água foram realizadas com a pesagem de mini-lisímetros ou calculado através do balanço de vapor de água.

Em alface, o aumento da concentração de CO₂ promoveu um aumento entre 27% e 51% na produtividade em plantas de 30 e 36 dias. Verificou-se, também, um aumento na taxa de emergência e de crescimento das folhas. No entanto, o efeito na área foliar da quarta folha, no final do ciclo, foi pequeno (Caporn, 1989).

De acordo com Peñuelas et al. (1995a), o efeito do enriquecimento do ambiente com CO₂ em plantas de pimentão foi significativo somente 40 dias após o início do tratamento. O aumento no crescimento das plantas e da produtividade foi observado somente em plantas que foram irrigadas quando o potencial mátrico do solo atingiu -0,01MPa (bem irrigadas) e alto conteúdo de nitrogênio (10,73eq. NO₃.m⁻³). Nessa condição, o florescimento e a frutificação foram antecipados. Verificaram, também, que a área foliar e a área específica das folhas reduziram com o aumento da concentração de CO₂.

Islam et al. (1996) trabalhando com tomate cultivado em estufa, e com enriquecimento de CO₂ (entre 700ppm e 900ppm), verificaram um aumento significativo na produção, obtendo frutos maiores do que no tratamento de controle (200ppm a 400ppm). D'Andria et al. (1990) observaram aumento na produção de tomates cultivados em solo coberto com plástico e irrigado por gotejamento. No entanto, não houve maior número de frutos, mas sim, frutos maiores. Reinart et al. (1997) também observou incrementos de aproximadamente 24% na produtividade da cultura de tomate, cultivada em câmaras de ambiente controlado, com enriquecimento de CO₂ (até 675μmolCO₂.mol⁻¹).

Segundo Pinto (1997), a aplicação de CO₂ via água de irrigação influenciou positivamente a produtividade do meloeiro cultivado em casa de vegetação, sendo a mesma devida ao maior número e peso de frutos comerciais. Os valores de eficiência de uso da água (kg.m⁻³) foram de 12,15kg.m⁻³ e 9,54kg.m⁻³ para os tratamentos com e sem aplicação de CO₂, respectivamente. Conforme o autor, o maior incremento de produção foi de 7,95t.ha⁻¹ o que representou um aumento de receita igual a US\$2.385,00 para solo nu e aplicação diária CO₂.

2.2 Cultura do pimentão e o ambiente

O pimentão (*Capsicum annuum*) pertence à família das solanaceas, e figura entre as dez hortaliças mais importantes do mercado, sendo plantado e consumido em todo o país. Caracteriza-se por sua vegetação intensa e atinge altura que varia entre 0,50m e 0,80m. Para algumas cultivares, quando plantadas em casa de vegetação, a altura pode ultrapassar a 1,80m (Nannetti & Souza, 1998). As hastes da planta são frágeis e podem quebrar com facilidade. A raiz principal pode atingir profundidades entre 0,30m e 0,60m, e as raízes adventícias profundidades entre 0,30m e 0,50m. (Goto & Rossi, 1997).

O pimentão pode produzir frutos de diferentes formatos e coloração. Os formatos podem ser quadrados, retangulares e cônicos. A coloração é um aspecto que deve ser levado em consideração, visto que o preço pode variar de acordo com a coloração dos frutos.

O pimentão é uma planta de clima tropical, sensível às baixas temperaturas. A temperatura média mensal para se obter boa colheita está entre 18°C e 25°C. Com temperatura menor a planta não se desenvolve e com temperatura mais alta a planta vegeta acentuadamente e diminui a produção.. Para se obter uma vegetação satisfatória, a temperatura ideal deve ficar entre 20°C e 25°C durante o dia, e entre 15°C e 18°C à noite. A temperatura máxima tolerada pela planta durante a floração é de 30°C e a mínima de 18°C (Goto & Rossi, 1997).

Polowick & Sawhney (1985) estudando o efeito da temperatura no desenvolvimento das flores e dos frutos do pimentão, observaram que o peso fresco, comprimento e diâmetro dos frutos foram maiores em condições de alta temperatura (28°C de dia e 23°C à noite) do que em baixa temperatura (18°C de dia e 15°C à noite). Os efeitos mais evidentes foram obtidos com baixa temperatura, embora alta temperatura tenha algum efeito no desenvolvimento de flores e frutos. A temperatura influi também sobre a qualidade dos frutos do pimentão. O conteúdo de açúcar e vitamina C, bem como a intensidade das cores vermelha e amarela, são maiores em condições de temperaturas elevadas. Em temperaturas mais baixas, entre 10°C e 15°C, o conteúdo de caroteno e da matéria seca também podem aumentar (Pádua, 1982).

De acordo com Filgueira (1982), o fotoperíodo não afeta sensivelmente o pimentão, que é considerado uma planta de dia curto, pois seu florescimento é mais precoce e mais farto em dias curtos do que em dias longos (Nannetti & Souza, 1998).

O pimentão, geralmente, é considerado uma planta de sombra (Schoch, 1972). Sob condições de luminosidade alta e temperatura elevada, a redução da luminosidade proporciona aumento da matéria seca, altura das plantas, e da superfície foliar das mudas. Em um experimento realizado em Viçosa/MG, a redução da luminosidade induziu a redução do porte das plantas, do número de folhas e do diâmetro do caule (Pádua et al., 1984). A produção e qualidade dos frutos também podem ser afetados pela variação da luminosidade em condições específicas. O conteúdo de açúcar e vitamina C foi maior nas áreas de maior luminosidade, enquanto que o conteúdo de caroteno e de matéria seca, bem como a intensidade das cores vermelha e amarela dos frutos foram maiores em condições de luminosidade baixa (Pádua, 1982).

A umidade relativa do ar ideal para a cultura do pimentão em ambiente protegido está compreendida entre 50% e 70%. Quando mantida dentro dessa faixa, além de beneficiar o desenvolvimento da cultura, reduz drasticamente a ocorrência de doenças. Por outro lado, fora da faixa ideal, um dos prejuízos causados à cultura é a diminuição no nível de polinização, o que resulta na ocorrência de abortamento de frutos, ou na formação de frutos defeituosos (Tivelli, 1998). Segundo Goto & Rossi

(1997), o pimentão cultivado em ambiente de estufa necessita de umidade relativa do ar entre 70% e 80%. Os autores comentam que o excesso de umidade relativa provoca o aparecimento de doenças criptogâmicas, e com baixa umidade as plantas transpiram acima do normal.

A taxa de absorção de nutrientes por uma planta é governada pela sua disponibilidade no solo, e pela demanda do mesmo para o desenvolvimento e funcionamento normal dos diversos órgãos da planta. O nível de nutrientes na solução do solo deve ser suficientemente alto para que suas taxas de absorção, pela planta, não sejam limitantes ao seu crescimento (Fontes & Monnerat, 1984). Estudos realizados por Haag et al. (1970), Fernandes (1971) e Miller et al. (1979), mostram a relação entre o crescimento e absorção de nutrientes pela cultura de pimentão. O maior acúmulo de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, por grama de matéria seca de planta, por dia, ocorreu nos estádios iniciais do ciclo da planta até o aparecimento dos primeiros frutos. A maior taxa absoluta de absorção destes nutrientes, em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, ocorreu quando a maioria dos parâmetros de crescimento também apresentavam-se nos seus máximos.

Segundo Filgueira (1982), o desenvolvimento inicial da cultura é lento, apresentando uma pequena extração de nutrientes até os 75 dias. Após esta fase, com o aparecimento de flores e com o início da frutificação, a sua absorção tende a ser elevada. Malavolta et al. (1989) comentam que os teores de macronutrientes adequados em folhas recém formadas de plantas de pimentão, em pleno florescimento, são: 3,5% N; 0,25% P; 2,5% K; 2,5% Ca; 0,75% Mg e 0,45% S.

Haag et al. (1970), Fernandes (1971), Miller et al. (1979) e Negreiros (1995) descrevem que os elementos mais absorvidos pelos frutos de pimentão são o potássio e o nitrogênio, seguidos do fósforo, enxofre, cálcio e magnésio. Os três primeiros autores verificaram também, que o nitrogênio, o fósforo e o potássio acumularam-se na parte vegetativa e nos frutos, enquanto somente 6% do cálcio total absorvido pela planta e 17% do magnésio encontravam-se nos frutos. Com relação à extração de micronutrientes pela planta, Fernandes (1971), trabalhando em condições de

campo, obteve valores de 27g.ha^{-1} , 452g.ha^{-1} , 114g.ha^{-1} e 99g.ha^{-1} para o cobre, ferro, manganês e zinco, respectivamente.

Valores de produtividade média do pimentão cultivado no campo são regularmente encontrados na literatura variando entre 18.302kg.ha^{-1} (Correia, 1984) e 30.000kg.ha^{-1} (Caixeta et al., 1981). Braga (2000) trabalhando com pimentão cultivado em estufa e irrigado por gotejamento, em Botucatu/SP, obteve uma produção mínima de 35.700kg.ha^{-1} e máxima de 54.000kg.ha^{-1} , nas três colheitas realizadas. Robledo & Martin (1988), relataram sobre a grande contribuição das casas de vegetação com cobertura de plástico, no aumento da produtividade do pimentão na região de Almeria, Espanha. Os autores comentam que a produtividade fora da casa de vegetação, nesta região, varia entre 15000kg.ha^{-1} e 20000kg.ha^{-1} , enquanto que a produtividade média dentro de casas de vegetação é de aproximadamente 30000kg.ha^{-1} , com um valor máximo de 40000kg.ha^{-1} .

2.2.1 Irrigação da cultura

Por uma superfície vegetada ocorrem simultaneamente os processos de evaporação e transpiração, que tecnicamente são denominados de evapotranspiração. A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica, e pelo suprimento de água do solo às plantas e suas interações (Pereira et al., 1997).

No interior de uma estufa, em geral, a evapotranspiração é menor do que a verificada externamente. Vários pesquisadores atribuem, basicamente, a redução da ação dos ventos e a parcial capacidade de transmissividade da cobertura plástica à radiação solar, que são os principais fatores da demanda evaporativa da atmosfera. Martins et al. (1994) encontraram uma evapotranspiração entre 20% e 30% menor que a ocorrida nos cultivos em campo aberto. Teodoro et al. (1993) cultivando pimentão em ambiente protegido, concluíram que a perda de água estimada pela evaporação do tanque

classe A foi aproximadamente 30% menor que a ocorrida nos tanques situados em condição de campo.

É importante observar, no entanto, que nem a evaporação do tanque nem a evapotranspiração de referência calculada por relações empíricas refletem precisamente a evapotranspiração real da cultura em todas as condições climáticas, o que exige uma série de adaptações, em função do local.

Hartz (1996) ressaltou os erros que podem ser cometidos quando se utiliza os coeficientes de cultivo (K_c), pois além de depender do método de estimativa da evapotranspiração de referência, outros fatores como a densidade e o arranjo das plantas e o tipo condução afetam os valores do coeficiente. O autor cita um exemplo para a cultura do pimentão, onde afirma que o K_c de um cultivo em fileiras duplas em leito de 1,0m de largura superestimar a necessidade hídrica de fileiras duplas em leito de 1,5m, onde as plantas não cobrirão totalmente o solo.

Segundo Doorenbos & Kassam (1994), a cultura do pimentão, em condições de campo, tem um ciclo entre 120 e 150 dias, apresentando coeficiente de cultivo de 0,4 logo após o transplântio, entre 0,95 e 1,1 durante o período de cobertura plena e, para a época de colheita de pimentão verde, oscila entre 0,8 e 0,9. Segundo os mesmos autores, quanto à sensibilidade ao suprimento de água, denominada K_y , a cultura é classificada com sensibilidade média a alta ($K_y = 1,1$ para todo o ciclo). A cultura do pimentão é bastante sensível a falta de água no solo, principalmente no início da floração, quando não deve utilizar mais que 25% da água disponível. Com relação à eficiência de uso da água, a cultura produz entre 1,5kg e 3kg de frutos verdes, com 90% de umidade, por m^3 de água consumida.

De acordo com Tivelli (1998), a partir do transplântio das mudas de pimentão até a colheita decorrem, aproximadamente, 90 a 110 dias e os coeficientes de cultivo variam em função do estágio de desenvolvimento da cultura, compreendendo:

– Estádio I: da emergência até 10% do desenvolvimento vegetativo - K_c entre 0,4 e 0,5;

- Estádio II: final do estágio I até 70% a 80% do desenvolvimento vegetativo (início do florescimento) - K_c entre 0,6 e 0,65;
- Estádio III: final do estágio II até início da maturação - K_c entre 0,95 e 1,1;
- Estádio IV: final do estágio III até a colheita - K_c entre 0,8 e 0,9.

Objetivando determinar a relação água-rendimento, na cultura do pimentão, Ferreyra et al. (1985) conduziram um experimento de campo no período entre 1980 e 1981, e entre 1981 e 1982 na Estação Experimental La Platina, em Santiago do Chile. O experimento foi realizado com quatro tratamentos de lâmina de água, de acordo com a evaporação medida no Tanque Classe A (ECA): 1,3.ECA; 1,0.ECA; 0,7.ECA e 0,3.ECA. A evapotranspiração foi determinada mediante o balanço hídrico, computando a variação da umidade com um emissor de neutrons. Observaram que, entre 150mm e 350mm de evapotranspiração, os rendimentos aumentaram linearmente, até aproximadamente 30t.ha^{-1} , sendo o incremento de rendimento função da evapotranspiração. Valores maiores de evapotranspiração não aumentaram os incrementos de rendimentos.

Caixeta (1981) estudou o efeito da aplicação de três lâminas diárias de água (2, 4, e 6mm/dia) e três turnos de rega (1, 2 e 3 dias) em pimentão irrigado por gotejamento. Verificou-se no experimento que a produção e o número total de frutos normais elevaram com o aumento da quantidade de água aplicada, ocorrendo o inverso para o turno de rega. O autor ressalta que para a produção de 1kg de frutos normais, foram necessários 160 e 410 litros de água para as lâminas de 2mm.dia^{-1} e 6mm.dia^{-1} , respectivamente.

Teodoro et al. (1993) estudando diferentes níveis de água aplicada através do sistema de irrigação por gotejamento, na cultura de pimentão conduzida em casa de vegetação, verificaram que as maiores produções ocorreram nos tratamentos irrigados com maior frequência. Observou-se, também, que houve uma tendência do tratamento com 30% de água disponível consumida apresentar maior produção em relação aos demais (10%, 50% e 70%), e que o tratamento mantido mais seco (70%) apresentou maior porcentagem de frutos defeituosos.

Russo (1985) realizou um estudo analisando a necessidade de água e a lixiviação em solo desértico, para as culturas do tomate e pimenta malagueta. O experimento foi conduzido adotando-se dois turnos de rega e quatro lâminas de irrigação. O autor concluiu que a produção total de frutos, para as duas culturas, aumentou com o aumento da quantidade de água disponível no solo.

Pellitero et al. (1993) estudando o efeito do regime de irrigação (variação da depleção de água disponível no solo) no rendimento de pimentão e composição do fruto processado, verificaram que a menor depleção (entre 10% e 15%) resultou no rendimento máximo, sendo a redução na produção causada pela diminuição do número de frutos. Verificou-se, também, que o aumento da depleção de água para 55% elevou a porcentagem de matéria seca, sólidos solúveis, acidez total e açúcares dos frutos.

Alvino et al. (1994) trabalhando com pimentão, verificaram que o déficit hídrico afetou significativamente a produção total de matéria seca, promovendo uma redução de 28%, o que correspondeu a 993g.m² e 723g.m² para o tratamento irrigado e com déficit hídrico, respectivamente. O déficit hídrico reduziu o índice de área foliar e o valor máximo foi atingido pelos dois tratamentos ao mesmo tempo, com 130 dias após o transplântio.

A faixa ótima de tensão da água no solo para o pimentão, cultivado em condições de campo e irrigado por gotejamento, foi estudado por Wierenga & Sadiq (1985). Os dois autores verificaram que os maiores rendimentos foram obtidos para potenciais entre -15kPa e -25kPa na camada de 0 a 60cm de profundidade. Estudos conduzidos por Frizzone et al. (1997), indicaram que o potencial mátrico médio de -32kPa reduziu de forma drástica o rendimento do pimentão, sob condições de estufa, embora a altura da planta não tenha sido afetada pelos potenciais de água no solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em Piracicaba-SP. As coordenadas geográficas do local são 22°42'00” de latitude sul, 47°38'00” de longitude oeste e altitude de 520 metros.

Conforme classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, subtropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco. Os dados climáticos da região apresentam temperaturas médias mensais variando de 24,8°C no verão e 17,1°C no inverno, sendo a média anual igual a 21,4°C. As chuvas são da ordem de 1278mm anuais, ocorrendo cerca de 1000mm de outubro a março e, 278mm de abril a setembro (Sentelhas, 1998).

Em uma primeira etapa realizou-se um ensaio em casa de vegetação, no Horto da Botânica, no Departamento de Ciências Biológicas, para determinação das curvas de fotossíntese em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e da concentração de dióxido de carbono (CO₂). As curvas serviram de base para definir os níveis de CO₂ a serem utilizados no experimento realizado em uma segunda etapa, em casa de vegetação construída na área experimental do Departamento de Engenharia Rural. Nesta etapa o dióxido de carbono foi aplicado no ambiente, em quatro concentrações, para se estudar a resposta das plantas e as interações com diferentes quantidades de água aplicadas no solo. Em ambas as etapas cultivaram-se plantas de pimentão em vasos.

3.1 Curvas de fotossíntese em função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e da concentração de CO₂

As mudas de pimentão foram transplantadas em doze vasos de 8 litros quando apresentavam dois pares de folhas verdadeiras. Os vasos foram preenchidos com substrato à base de vermiculita expandida e material orgânico de origem vegetal, isento de pragas, microrganismos patogênicos e sementes de plantas daninhas. Transplantou-se uma muda por vaso no dia 08/07/99. Aplicou-se, diariamente, uma solução nutritiva, em volumes crescentes, de acordo com o desenvolvimento da planta. Os brotos laterais foram desbastados e a planta foi conduzida com quatro ramos produtivos.

A fotossíntese foi determinada no estágio de frutificação da cultura, em função da radiação fotossinteticamente ativa e das concentrações de CO₂ injetadas. Os dados foram obtidos utilizando-se o medidor portátil de fotossíntese IRGA, modelo LI-6400, fabricado pela Li-Cor Inc./EUA (Figura 1). As avaliações foram realizadas entre 9:00 horas e 15:30 horas durante três dias, em plantas sorteadas entre os doze vasos cultivados. Selecionou-se uma folha madura de cada planta e todas as determinações foram realizadas sempre em folhas semelhantes de cada planta utilizada.

3.2 Condução do experimento em casa de vegetação

3.2.1 Estrutura experimental

Foram construídas quatro estufas, instaladas no sentido leste-oeste, com cobertura em arco, tendo 8,75m de comprimento, largura de 7,0m e pé-direito de 3,0 m, sendo que os arcos na sua parte mais alta atingiam altura de 4,68m. As fachadas laterais e frontais foram envolvidas com tela de citricultura, com tratamento anti-UV, e apresentavam um rodapé de concreto de 0,30m de altura. O teto foi coberto com filme plástico de polietileno de 150 micras, com tratamento anti-UV. As fachadas laterais e frontais das estufas também foram fechadas com o mesmo material e apresentavam um sistema de manivela para abrir as cortinas.

Figura 1 – Aparelho IRGA LI – 6400 usado para medir a fotossíntese.

Em cada uma das quatro estufas foram colocadas duas bancadas de madeira, com 4,0m de comprimento, 0,54m de largura e 0,70m de altura. O espaçamento entre as bancadas e as fachadas laterais e frontais foi de 2,0m e 2,30m, respectivamente.

Sobre cada bancada foram colocados oito vasos com capacidade de 20 litros, espaçados de 0,50m, com uma planta de pimentão por vaso. Nas extremidades e no centro de cada bancada foram colocados mourões de madeira, com 2,0m de altura, para fazer o tutoramento das plantas. Nestes foram amarrados fios de arame, sendo o primeiro colocado a 1,25m de altura e os demais a cada 0,25m, até o topo dos mourões.

Em um dos ambientes foi colocada uma bancada de 2,0m de comprimento, 0,54m de largura e 0,70m de altura. Esta bancada foi disposta entre as outras duas já existentes para permitir a colocação de mais três vasos com planta, semelhantes aos demais, utilizados para o controle da irrigação.

3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Utilizou-se o delineamento de grupos de experimentos em blocos casualizados e realizou-se a análise de variância por estufa e análise conjunta. O experimento foi composto pela combinação de dois fatores: (a) ambiente: concentração de CO_2 normal na atmosfera, aproximadamente de $367\mu\text{molCO}_2.\text{mol}^{-1}$ (C4); $600\mu\text{molCO}_2.\text{mol}^{-1}$ (C3); $800\mu\text{molCO}_2.\text{mol}^{-1}$ (C2) e $1000\mu\text{molCO}_2.\text{mol}^{-1}$ (C1); (b) aplicação de quatro volumes de água definidos em relação à evapotranspiração da planta (Vet): $V1 = 0,5V_{\text{et}}$; $V2 = 0,65V_{\text{et}}$; $V3 = 1,0V_{\text{et}}$ e $V4 = 1,35V_{\text{et}}$. Cada tratamento constou de 4 repetições casualizadas em cada ambiente. A Figura 2 apresenta o esquema da área experimental e a Figura 3 apresenta detalhes das estufas e das bancadas.

3.2.3 Monitoramento ambiental

3.2.3.1 Temperatura e umidade relativa

A temperatura do ar (atual, máxima e mínima) e a umidade relativa (atual, máxima e mínima) foram medidas diariamente, utilizando-se termohigrômetros digitais, modelo CTH, instalados em cada estufa, às 8:00h, 13:00h e 18:00h. As variações diárias da temperatura e da umidade relativa estão apresentadas nas Figuras 4 e 5.

3.2.3.2 Radiação global e fotossinteticamente ativa

A radiação global foi medida em uma das estufas, utilizando-se um piranômetro marca Licor, modelo LI-200. A radiação fotossinteticamente ativa foi medida com um sensor quantum, marca Licor, modelo LI-190. Os dois sensores foram conectados a um multímetro digital e as leituras foram realizadas em dois dias, no período das 7:30h às 19:00h, em intervalos de 15 minutos. A radiação global e a fotossinteticamente ativa, em watt.m^{-2} (Figura 6), foram determinadas multiplicando-se a leitura de voltagem pelos fatores $109,4\text{watt.m}^{-2}\text{mV}^{-1}$ e $43,14\text{watt.m}^{-2}\text{mV}^{-1}$, respectivamente.

Figura 2. Esquema da área experimental.

Figura 3 – Cortes transversal e longitudinal das estufas e detalhes das bancadas

Figura 4 – Variação diária da temperatura média do ar dentro dos ambientes das quatro estufas.

Figura 5 – Variação diária da umidade relativa média do ar dentro dos ambientes das quatro estufas

Figura 6 – Radiação global (Rg) e fotossinteticamente ativa (PAR), medidas dentro das estufas em um dia sem nuvens (a) e parcialmente nublado (b).

3.2.3.3 Intensidade de luz

A iluminação dentro das estufas foi calculada a partir da radiação global, conforme metodologia apresentada por Villa Nova et al. (2001). A intensidade de luz no ambiente fora das estufas foi calculada determinando o coeficiente médio de redução da luminosidade, devido à cobertura das estufas, sendo o mesmo de 24%. As leituras foram realizadas entre 7:30h e 19:00h, em intervalos de 15 minutos. A variação média diária da intensidade de luz medida nas estufas e no ambiente fora das mesmas pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 – Intensidade luminosa média (Lux), medida dentro e fora das estufas em um dia sem nuvens (a) e em um dia parcialmente nublado (b).

3 2.3.4 Temperatura do solo

A temperatura do solo foi medida com um termômetro de solo instalado a 0,10m de profundidade. As medidas foram realizadas em ambientes opostos (C1 e C3) e nos tratamentos de água equivalentes a 0,5Vet e 1,0Vet, respectivamente, entre 7:30h e 19:00h, em intervalos de 15 minutos, durante dois dias. Na Figura 8 observa-se a variação da temperatura do solo e do ambiente.

3.2.4 Características do solo

O solo utilizado para enchimento dos vasos foi um Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa, sendo classificado por Ranzani et al. (1966) como série Sertãozinho. O solo foi retirado de uma camada de 0 – 30cm de profundidade e a análise granulométrica apresentou os seguintes resultados: 18,5% de argila, 12,42% de silte e 69,49% de areia. É um solo com característica textural franco arenosa e apresenta densidade de partículas de $2,66\text{g.cm}^{-3}$.

O solo foi seco ao ar livre e peneirado com peneira de malha média. Posteriormente, retirou-se uma amostra para análise química que foi realizada no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da ESALQ. Os resultados das análises são mostrados na Tabela 1.

Figura 8 – Temperatura do solo e do ar, medida no ambiente C1 (a) e no ambiente C3 (b)

Tabela 1. Análise química do solo utilizado no experimento

P	M.O	K	Ca	Mg	H+AL	PH	S	T	V
Mg.dm ⁻³	g.dm ⁻³	Mmol _e dm ⁻³				CaCl			%
4	19	1,7	17	8	22	5,3	26,8	49,3	54

A curva de retenção de água foi determinada instalando-se tensiômetros em 6 vasos preenchidos com o mesmo solo do experimento. Os valores de potencial mátrico de água no solo e umidade foram ajustados por uma equação potencial, conforme se verifica na Figura 9, sendo y o potencial mátrico de água no solo (mbar) e x a umidade em base de massa de solo seco (%).

Figura 9 – Curva de retenção de água no Latossolo Vermelho-Amarelo utilizado no experimento.

3.2.5 Preparo dos vasos

Foram utilizados 67 vasos com capacidade de 20 litros. No fundo destes fez-se um furo e adaptou-se um conector de 7mm de diâmetro e um tubo interligando o vaso a uma garrafa de 2 litros, para coletar o volume de água percolado.

No interior dos vasos colocou-se um segmento de tubo de PVC em torno do conector, com 2cm de comprimento e diâmetro de ½”, furado em toda sua superfície,

e cobriu-se com uma camada de brita número 1. Para evitar obstruções foi utilizada uma tela sobre o material drenante e, sobre esta, uma manta de “bidim”. O conjunto foi pesado e mantido com um peso constante de 2,5kg para todos os vasos. A seguir completou-se o volume do vaso com solo peneirado e adubado conforme recomendação da análise de fertilidade, sendo incorporados, por litro de solo, 0,64g de calcáreo calcinado, 10g de esterco de curral curtido e 0,03g de P_2O_5 . O peso total de cada vaso foi 20kg. Na época do plantio incorporou-se nitrogênio e potássio, à base de 0,02g de N por litro de solo e 0,06g de K_2O por litro de solo.

Após 15 dias de repouso adicionou-se água aos vasos, com uma proveta de 1 litro, até iniciar a percolação, sendo consumidos, em média, 6 litros de água por vaso. A seguir os vasos foram cobertos com sacos plásticos, permanecendo assim durante 17 dias, sendo retirados 3 dias antes do plantio. Mediu-se o volume percolado e a condutividade elétrica da água 24 horas após a saturação do solo. Foram retiradas duas amostras de solo por estufa (totalizando 8 amostras) para determinar o peso específico.

3.2.6 Cultura e preparo das mudas

A cultura plantada foi o pimentão (*Capsicum annuum* L.), híbrido Zarco, o qual apresenta formato retangular e coloração verde/amarela, indicada para o cultivo em ambiente protegido. As mudas foram formadas por um produtor da região em bandejas com substrato comercial, colocando uma semente por célula.

3.2.7 Transplântio das mudas e condução das plantas

As mudas foram transplantadas para os vasos no dia 30/05/2000, quando apresentavam dois pares de folhas verdadeiras, colocando uma planta por vaso. Todas as brotações laterais, antes da bifurcação, foram eliminadas e as plantas foram conduzidas com quatro hastes, ou seja, deixaram-se dois ramos na primeira bifurcação, quatro na segunda e a partir daí, a desbrota foi realizada de maneira a desenvolver apenas quatro ramos. Eliminou-se a primeira flor que surgiu na bifurcação.

A primeira adubação de cobertura foi realizada aplicando 180mg de N por vaso e 180mg de K₂O por vaso, diluídos em água. Posteriormente, com base nos resultados da análise foliar, as adubações de cobertura foram parceladas em 17 vezes, aplicando-se em cada parcelamento, por litro de solo, 3,68mg de N, 3,33mg de K, 6,66mg de P e 0,7mg de Ca. Foram realizadas também 3 aplicações foliares de Ca (2,57%), Boro (0,52%), Cu (0,53%), Fe (2,10%), Mn (2,57%), Mo (0,13%) e Zn (0,53%).

O controle de ervas daninhas foi realizado manualmente, quando necessário. O controle fitossanitário consistiu de aplicação dos fungicidas a base de enxofre para controlar a ocorrência de *Oidiopsis sicula*. O controle de pragas, tais como trips, mosca minadora e ácaro branco, foi realizado por ocasião do seu aparecimento, através de pulverizações com inseticidas específicos (Abamectina e Imidacloprid).

A colheita foi realizada em intervalos de 8 a 15 dias, quando os frutos verdes estavam no ponto colheita, sendo realizadas 7 colheitas durante o ciclo da cultura que foi de 169 dias.

3.2.8 Sistema de irrigação

A água utilizada para irrigação foi derivada de uma caixa com capacidade de 500 litros, com abastecimento constante durante a aplicação. O sistema de irrigação foi acionamento por um conjunto moto-bomba com vazão de 0,5m³.h⁻¹ e pressão manométrica de 30mca, instalado próximo às estufas.

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, com um emissor por vaso, e operando na pressão de 10mca com vazão nominal de 4,0L.h⁻¹. A uniformidade de emissão dos 67 gotejadores foi 98,17%.

Cada parcela, formada por 4 vasos, representava um tratamento de volume de água, controlado pelo tempo de aplicação. Adotou-se um turno de rega de dois dias e o volume de água aplicado em cada tratamento foi definido com base no volume de água evapotranspirado, determinado pela pesagem diária de 3 vasos com

plantas, localizados na estufa sem enriquecimento da atmosfera com CO₂ e irrigados com um volume igual ao consumido por evapotranspiração. O cálculo do tempo de aplicação de água foi feito pela equação (1):

$$T = \frac{[(P_{i-1} - P_i)/\gamma]1000}{q} \quad (1)$$

em que P_{i-1} é o peso médio do vaso no dia anterior em kg, P_i é o peso médio no dia atual, em kg, γ é o peso específico da água em kg.m⁻³, q é a vazão do gotejador, em L.min⁻¹ e T é o tempo em minutos.

Nos tratamentos com ocorrência de percolação, o volume percolado foi medido e retornado ao vaso, sendo que na irrigação seguinte este volume era descontado do volume de água a ser aplicado no vaso.

3.2.9 Sistema de injeção do CO₂.

A aplicação de CO₂ na estufa foi aérea e o sistema de aplicação consistiu de um cilindro com capacidade de 25kg para armazenamento do gás em alta pressão, equipado com válvula dosadora, para especificar a vazão do gás a ser liberada, manômetro e fluxômetro.

O cilindro foi instalado entre as casas de vegetação e o gás foi conduzido até a entrada de cada estufa em tubos de cristal com diâmetro interno de 3/8", com 3 derivações, sendo uma para cada estufa. No interior de cada estufa foi colocado um fluxômetro e dois registros sendo que, um deles possibilitou a liberação do gás para fazer a regulação da vazão e o outro liberou o gás no ambiente. Dentro das estufas, o gás foi conduzido por tubos com diâmetros de 3/8", até o centro do compartimento, e distribuído a uma altura de 3,0m, através de 2 segmentos de tubos, um sobre cada bancada, sendo o gás liberado através de microtubos inseridos na tubulação. Na Figura 10 apresentam-se alguns detalhes do sistema de injeção de CO₂.

Figura 10 – Detalhes do sistema de injeção de CO₂ utilizado no experimento

A regulagem da vazão no fluxômetro foi realizada utilizando uma proveta graduada de 1.000ml, com água, um balde de 20 litros com água e um cronômetro. A proveta foi mergulhada no balde com a abertura voltada para baixo e um segmento de tubo conectado ao fluxômetro foi introduzido dentro do proveta. Abriu-se o registro liberando o gás dentro da proveta e mediu-se o tempo necessário para que um volume

conhecido de água, existente dentro da proveta, fosse deslocado pelo gás. A vazão foi calculada dividindo o volume de água deslocado pelo tempo necessário para promover o deslocamento. O processo foi repetido até obter a vazão necessária para que a concentração de CO₂ no ambiente atingisse os valores desejados.

Durante o ciclo da cultura, a concentração de CO₂ foi medida periodicamente utilizando-se um analisador de gás, modelo LI-800, fabricado pela Licor Inc./EUA (Figura 11). Conectou-se ao analisador um multímetro digital e, em cada estufa, foram colocados três segmentos de tubos, com diâmetro de 0,4mm, nas alturas de 1,0m, 1,5m e 2,0m. Os segmentos de tubo foram conectados ao analisador de gás instalado do lado de fora das estufas e, 30 segundos após a conexão, registrava-se o valor de voltagem indicado no multímetro. A cada 15 minutos, aproximadamente, eram feitas as leituras de concentração de CO₂, dentro das estufas e no ambiente fora das mesmas, iniciando-se antes da aplicação do gás e prolongando até a abertura das cortinas, quando a concentração de CO₂ dentro das estufas igualava-se à concentração do ambiente externo. Para cada altura, foram realizadas três medidas da concentração de CO₂, em intervalos de 20 segundos, e o valor da concentração de gás foi determinado pela média das três observações multiplicada pelo fator de conversão para $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$ de ar, ou seja:

$$\text{Concentração de CO}_2 (\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{ de ar}) = \frac{L1 + L2 + L3}{3} \cdot 400$$

A aplicação do gás iniciou-se no dia 14/06/2000, após o “pegamento” das mudas, sendo realizada diariamente no período compreendido entre 9:30h e 10:30h, e as cortinas eram abertas às 11:30h. Em meados de agosto, devido às altas temperaturas do ar, inviabilizando a manutenção das estufas hermeticamente fechadas, foi necessário mudar o horário de aplicação do CO₂ para o período de 8:30h às 9:30h. Em outubro, a aplicação foi realizada entre 7:30h e 8:30h e as cortinas eram abertas imediatamente após a aplicação.

Figura 11 – Aparelho LI-800 usado para medir a concentração de CO₂

3.2.10 Elementos fisiológicos

3.2.10.1 Condutância da folha à difusão do vapor d'água

A condutância foliar à difusão do vapor d'água foi medida em alguns dias no experimento, com um porômetro de fluxo em equilíbrio dinâmico (Steady State Porometer) marca Licor, modelo LI-1600. As leituras foram realizadas ao longo de um dia, de 3h em 3h, iniciando-se às 8:00h, antes da aplicação do gás, e prolongando-se até às 17:30h.

Em decorrência do grande tempo exigido para as determinações e, também, à grande variação temporal da condutância estomática, as leituras foram realizadas em duas estufas por dia de avaliação. Para cada tratamento de irrigação foram realizadas três leituras, num total de 12 folhas por estufa, em um tempo de aproximadamente 15 minutos e na seqüência, as medidas foram realizadas em outra

estufa. As medições foram realizadas na face abaxial das folhas completamente expandidas, saudáveis e não sombreadas.

3.2.10.2 Potencial de água na folha

Como subsídio ao conhecimento do estado hídrico das plantas em função da irrigação e da aplicação de CO₂, determinou-se o potencial de água das folhas com uma câmara de pressão do tipo Scholander (marca Soil Moisture). As leituras foram realizadas antes do nascer do sol e às 12:00h, em três plantas de cada tratamento de irrigação e em todas as estufas.

Para cada planta avaliada, antes do nascer do sol, retirou-se uma amostra de solo do vaso para fazer a determinação da umidade.

3.2.11 Parâmetros analisados

3.2.11.1 Altura das plantas

Todas as plantas do experimento tiveram suas alturas medidas com o auxílio de uma trena graduada em centímetros, tomando-se como referência o primeiro internódio. Foram realizadas nove medições durante todo o ciclo da cultura.

3.2.11.2 Diâmetro do caule

O diâmetro do caule foi medido em todas as plantas do experimento utilizando-se um paquímetro digital e assumindo como referência um ponto próximo do primeiro internódio. Foram realizadas nove medições durante o ciclo da cultura.

3.2.11.3 Área foliar

Foram selecionadas três plantas em cada tratamento de irrigação, em todas as estufas, perfazendo um total de 48 plantas, medindo-se o comprimento e largura de todas as folhas com uma régua graduada em centímetros. Foram realizadas nove

medições durante o experimento, sendo que o último conjunto de dados foi obtido no final do experimento, e a área foliar foi determinada utilizando um medidor de área foliar, marca Licor, modelo LI-3100.

Em uma amostra de 343 folhas determinou-se a área de um retângulo, definido pelo comprimento e pela largura da folha, e a área da folha pelo medidor de área foliar, que foram relacionadas pela seguinte equação:

$$y = 0,5979 x \quad R^2 = 0,9910 \quad (2)$$

sendo y a área da folha (cm^2), e x a área correspondente ao produto do comprimento pela largura da folha (cm^2). Utilizou-se essa equação para calcular a área foliar da planta.

3.2.11.4 Peso fresco total dos frutos

O peso fresco total dos frutos para cada tratamento de irrigação e concentração de gás, resultou da soma dos pesos de matéria fresca dos frutos obtidos nas 7 colheitas realizadas durante o experimento.

3.2.11.5 Número de frutos

O número de frutos foi obtido por contagem individual, em cada planta, no momento da colheita dos mesmos.

3.2.11.6 Comprimento, diâmetro e espessura da polpa dos frutos

O comprimento, o diâmetro e a espessura da polpa de todos os frutos colhidos foram determinados após a pesagem dos mesmos, utilizando-se um paquímetro digital. O diâmetro foi medido na terça parte superior do fruto, sendo o mesmo cortado nesse ponto para medir a espessura da polpa.

3.2.11.7 Peso seco dos frutos

Todos os frutos foram pesados, cortados e, após desidratação em ambiente natural por aproximadamente 24 horas, foram levados para estufa ventilada, com temperatura de 65°C, por um período superior a 72 horas, quando foram novamente pesados, obtendo o peso seco.

3.2.11.8 Peso seco do material de desbaste

Todo o material retirado nos desbastes como folhas, flores e frutos que caíram das plantas foram recolhidos e levados à estufa ventilada, com temperatura de 65°C, por um período superior a 72 horas, quando foram pesados obtendo-se o peso seco.

3.2.11.9 Peso seco de folhas, caule e pecíolo

No final do experimento as folhas de todas as plantas foram separadas do caule e do pecíolo. Após a medida de área foliar, o material foi levado para estufa ventilada, com temperatura de 65°C, por um período superior a 72 horas, quando foram pesados obtendo-se o peso seco das folhas, caule e pecíolo.

3.2.11.10 Peso seco de raiz

No final do experimento todas as plantas foram cortadas na altura do primeiro internódio e as raízes foram lavadas e colocadas em estufa ventilada, com temperatura de 65°C, por um período superior a 72 horas. Posteriormente todo o material foi pesado.

3.2.11.11 Peso seco total

O peso seco total foi determinada pelo somatório do peso seco dos frutos colhidos, folhas, caule, pecíolo, flores e frutos existentes na planta no final experimento, material de desbaste e raiz.

3.2.11.12 Peso seco da parte aérea

O peso seco da parte aérea foi determinada pela diferença entre o peso seco total e o peso seco do sistema radicular.

3.2.11.13 Eficiência de uso da água

A eficiência de uso da água foi calculada pela relação entre o peso fresco total, em gramas, e o consumo de água, em litros, durante o período de condução do experimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do ensaio preliminar: taxa de assimilação de CO₂

A taxa de assimilação de CO₂ em função da concentração de CO₂ na câmara e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), foi medida fixando a temperatura da folha em 25°C, o fluxo de ar na câmara em 300 $\mu\text{mol ar}\cdot\text{s}^{-1}$, a concentração de CO₂ na referência em 400 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$, a abertura estomática em 0,5 e área da folha em 6 cm^2 . Os resultados estão apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Taxa de assimilação de CO₂ em pimentão, em função da concentração de CO₂ e da PAR.

Para cada nível de concentração de CO₂ ajustou-se, por regressão, uma equação que descreve a variação da taxa de assimilação de CO₂ em função da PAR. As

equações ajustadas seguiram um modelo logarítmico para os seis níveis de concentração de CO₂, 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1400 μmol.mol⁻¹, respectivamente:

$$y = 2,4385 \ln(x) - 7,6725 \quad (R^2 = 0,9533)$$

$$y = 4,7517 \ln(x) - 17,603 \quad (R^2 = 0,9782)$$

$$y = 5,4482 \ln(x) - 20,018 \quad (R^2 = 0,9778)$$

$$y = 6,9343 \ln(x) - 27,024 \quad (R^2 = 0,9643)$$

$$y = 3,7739 \ln(x) - 11,279 \quad (R^2 = 0,936)$$

$$y = 5,3863 \ln(x) - 18,396 \quad (R^2 = 0,927)$$

sendo y a taxa de assimilação de CO₂ (μmolCO₂.m⁻² s⁻¹) e x a PAR (μmol.m⁻² s⁻¹).

Observa-se, pela Figura 12, que a taxa de assimilação aumentou para concentrações de CO₂ maiores que 400 μmol.mol⁻¹, portanto, o teor médio de CO₂ na atmosfera é um fator limitante para a fotossíntese em plantas C₃, conforme ressaltam Chmora & Mokronosov (1994). As maiores taxas de assimilação ocorreram com concentrações de CO₂ equivalentes a 1000 μmol.mol⁻¹ e valores de PAR maiores ou iguais a 400 μmol.m⁻² s⁻¹. As maiores concentrações de CO₂ (1200 e 1400 μmol.mol⁻¹) não promoveram aumento na taxa de assimilação. Assim, para as condições analisadas, a concentração de 1000 μmol.mol⁻¹ indica o ponto de saturação de CO₂. Kimball (1986) analisando 140 trabalhos relacionados ao efeito do CO₂ na produção de biomassa de 38 culturas agrícolas e outras 18 espécies, verificou aumento de produtividade, para a maioria das culturas, com concentração de CO₂ em torno de 1000 μmol.mol⁻¹.

Para valores de PAR inferiores a 800 μmol.m⁻²s⁻¹, verifica-se que os aumentos da taxa de assimilação, para todas as concentrações de CO₂ analisadas, tendem a ser maiores do que os aumentos observados para maiores valores de PAR. Os resultados obtidos (Figura 13) concordam com as colocações de Hall (1980), quando descreve que à medida que aumenta a intensidade luminosa a fotossíntese se torna menos eficiente.

Os dados da Figura 13 foram obtidos para a cultura do pimentão, em três plantas, selecionando-se folhas semelhantes. A concentração de CO_2 na amostra foi constante e igual a $400\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, o fluxo de ar na câmara igual a $500\mu\text{mol ar}\cdot\text{s}^{-1}$, a temperatura da folha mantida a 25°C , a abertura estomática de 0,5 e a área de 6cm^2 . Os dados experimentais foram determinados em três horários do dia: 11:00h, 14:00h e 15:30h. As equações de regressão ajustadas seguiram um modelo logarítmico para as três plantas, A1, A2 e A3, respectivamente:

$$Y=7,559 \ln(x) - 29,477 \quad R^2=0,9746$$

$$Y=5,5338 \ln(x) - 22,193 \quad R^2=0,9486$$

$$Y=5,3697 \ln(x) - 20,738 \quad R^2=0,9841$$

em que Y é a taxa de assimilação de CO_2 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) e x é a PAR em ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Figura 13 - Taxa de assimilação de CO_2 em pimentão, em função da PAR.

Na Figura 13 verifica-se que a maior taxa de assimilação ocorreu no período da manhã (11:00 horas), quando a planta estava com os estômatos abertos. No período da tarde, quando os estômatos se fecham temporariamente, a taxa de assimilação decresce. De acordo com Durão & Galvão (1995), a eficiência fotossintética é maior no período da manhã, entre 8:00h e 10:00h, e também entre 14:00h e 16:00h, período no

qual ocorrem picos de absorção de CO_2 . Para uma PAR de $800\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a taxa de assimilação medida no período da manhã (A1) foi 57,64% e 68,56% maior do que as taxas observadas às 14:00h (A2) e 15:30h (A3), respectivamente.

Com base nos dados observados neste ensaio preliminar, foram definidas as concentrações de gás bem como o horário de aplicação, para o experimento conduzido em casa de vegetação.

4.2 Condução do experimento em casa de vegetação

4.2.1 Consumo de água pela planta

O consumo de água pela planta foi estimado com base no peso de 3 vasos adicionais localizados no ambiente sem enriquecimento de CO_2 , irrigados com o volume necessário para manter a evapotranspiração. O volume total de água evapotranspirada no período de 169 dias foi 61,86 litros por planta (Figura 14). Na Tabela 2 estão apresentados os volumes totais de água utilizados para irrigação das plantas durante o ciclo. Verifica-se que nos ambientes enriquecidos com maiores concentrações de CO_2 ocorreu maior percolação de água, o que é um indício de menor consumo pela planta. No ambiente com maior concentração de CO_2 ($1000\mu\text{mol.mol}^{-1}$) somente o tratamento com menor volume de água aplicado não apresentou percolação e o volume de água percolado aumentou com o aumento do volume aplicado. Durante o experimento observou-se que as plantas do tratamento com menor volume de água aplicado e, sem enriquecimento com CO_2 , apresentavam processo de murchamento mais rápido do que as plantas dos ambientes com enriquecimento de CO_2 . No entanto, aproximadamente duas horas após a irrigação tornavam-se túrgidas, mantendo-se essa tendência durante todo o ciclo da cultura.

Figura 14 – Evapotranspiração acumulada da planta de pimentão, cultivada em ambiente com concentração normal de CO_2 e irrigada com volume de água igual à evapotranspiração medida.

As evidências de menor consumo de água pelas plantas cultivadas em ambiente enriquecido com CO_2 , observadas neste trabalho, são justificadas pelo fato de que o controle da transpiração é feito pelo fechamento estomático. Trabalhos realizados por Kimball (1986), com enriquecimento do ambiente com gás carbônico, demonstraram que o aumento da concentração de CO_2 reduz a abertura estomática, a condutância e a taxa de transpiração das plantas, induzindo a um esgotamento mais lento da água do solo. Nederhoff et al. (1992) verificaram, em cultivo de pimentão conduzido em ambiente enriquecido com CO_2 , que uma redução de 10% na condutância estomática reduziu a transpiração de 1,5 a 3,0%, estando este efeito altamente correlacionado com a radiação.

Segundo Wittwer (1986), elevados níveis de CO_2 (cerca de três vezes a concentração normal da atmosfera) reduzem a transpiração em 35 a 40% e, embora a condutância difusiva das plantas possa ser reduzida em 40%, o efeito na fotossíntese é pequeno. De acordo com o autor, o enriquecimento do ambiente com CO_2 , em casas de vegetação, pode resultar em acentuado aumento da eficiência de uso da água, sendo esse efeito especialmente importante quando a disponibilidade de água é pequena.

Tabela 2. Volumes de água previstos para aplicação por planta, volumes de água aplicados, volumes de água armazenados no vaso e volumes percolados durante o ciclo da cultura em função da concentração de CO₂.

Tratamento de CO ₂ ($\mu\text{mol.mol}^{-1}$)	Volume de água previsto (L)	Volume de água Aplicado (L)	Volume de água útil armazenado (L)	Percolação (L)
367	30,93	30,89	30,89	0,00
	40,21	40,70	40,70	0,00
	61,86	61,86	61,86	0,00
	83,51	82,83	77,92	4,91
600	30,93	30,89	30,89	0,00
	40,21	40,70	40,70	0,00
	61,86	61,86	60,87	0,99
	83,51	82,83	75,42	7,41
800	30,93	30,89	30,89	0,00
	40,21	40,70	40,70	0,00
	61,86	61,86	60,55	1,31
	83,51	82,83	73,06	9,77
1000	30,93	30,89	30,89	0,00
	40,21	40,70	39,76	0,94
	61,86	61,86	60,37	1,49
	83,51	82,83	70,16	12,67

4.2.2 Concentração de gás carbônico

As medidas de concentração de CO₂ dentro de cada estufa e fora delas foram realizadas regularmente durante o ciclo da cultura e, na Figura 15, mostra-se o padrão da concentração medido no dia 14/09/2000. A aplicação de gás carbônico iniciou-se às 8:25h e foi interrompida às 9:35h. As cortinas das estufas foram abertas às

10:33h em decorrência da elevada temperatura (aproximadamente 40,5°C dentro das estufas). Como se observa, a concentração de CO₂ em todos os ambientes atingiu os valores estabelecidos em um período que varia de 35 a 55 minutos após o início da aplicação.

O tempo necessário para atingir a concentração definida para cada ambiente, reduziu à medida que diminuiu a concentração. Para atingir a concentração de 1000µmol.mol⁻¹ gastaram-se, em média, 55 minutos após o início da aplicação. Logo após esse tempo, atingiu-se um valor médio máximo de 1029µmol.mol⁻¹ e, 15 minutos após atingido esse valor, a concentração reduziu para 892µmol.mol⁻¹.

No ambiente com concentração de 800µmol.mol⁻¹, este valor foi alcançado 35 minutos após o início da aplicação e permaneceu com uma concentração média de 823µmol.mol⁻¹ por um período de, aproximadamente, 30 minutos. Nesse mesmo dia detectou-se um local de vazamento de gás no ambiente com concentração de 600µmol.mol⁻¹, sendo esse valor atingido somente 55 minutos após o início da aplicação, porém, em condições normais de aplicação, o tempo foi de 20 minutos, aproximadamente, e um valor médio de 640µmol.mol⁻¹ era mantido por um período de 45 minutos.

No ambiente sem enriquecimento com CO₂, durante o período de aplicação do gás nas outras estufas, a concentração aumentou gradualmente atingindo valores que oscilavam entre 480 e 544µmol.mol⁻¹. Esperava-se que a concentração de CO₂ nessa estufa, por volta das 8:00h, fosse, de fato, um pouco superior ao da concentração normal da atmosfera (367µmol.mol⁻¹), uma vez que estando as cortinas fechadas durante a noite, o CO₂ liberado na respiração das plantas contribuiria para aumentar a concentração da atmosfera no início da manhã. Por outro lado, ao longo do período, esperava-se uma redução da concentração de CO₂ dentro da estufa, fechada, para níveis inferiores ao da atmosfera. Entretanto, a concentração de CO₂ tendeu a subir durante a aplicação de CO₂ nas outras estufas, reduzindo-se somente após a abertura das cortinas, atingindo valores próximos à da concentração do ambiente fora das estufas.

Relatos de Stanev & Tsonev (1986), indicam uma redução da concentração de CO_2 , em casa de vegetação, durante o dia, para valores equivalentes a $100\mu\text{L.L}^{-1}$, enquanto que, fora da casa de vegetação, a concentração era $300\mu\text{L.L}^{-1}$. Portanto, infere-se que, na estufa sem enriquecimento com CO_2 , o aumento da concentração durante o período de aplicação, foi decorrente de possíveis vazamentos entre estufas. Nas três posições em que foram realizadas as medidas de concentração de gás, os valores observados foram semelhantes.

Figura 15 – Padrão de concentração de CO_2 nos ambientes (estufas) definidos pelos tratamentos: (C1) $1000\mu\text{mol.mol}^{-1}$, (C2) $800\mu\text{mol.mol}^{-1}$, (C3) $600\mu\text{mol.mol}^{-1}$, e (C4) sem enriquecimento com CO_2 .

No ambiente fora das estufas a concentração de CO_2 foi superior a $400\mu\text{mol.mol}^{-1}$, sendo o mesmo maior do que o valor médio citado na literatura

($367\mu\text{mol.mol}^{-1}$) e provavelmente, seja devido à queimada dos canaviais, que ocorrem comumente na região entre maio e novembro, ou mesmo a vazamentos proveniente das estufas.

Após o término da aplicação, a concentração de CO_2 reduziu-se gradualmente enquanto as cortinas permaneceram fechadas e, após a abertura destas, a concentração dentro das estufas igualou-se à concentração externa. Na fase inicial do experimento a aplicação do gás carbônico foi realizada entre 9:30h e 10:30h e as cortinas permaneciam fechadas até 11:30h. Porém, com o decorrer do tempo, em razão do aumento da temperatura, foi necessário mudar o horário de aplicação. A princípio a aplicação passou a ser realizada a partir de 8:30h e mantinham-se as cortinas fechadas até as 10:30h. A partir de outubro, a aplicação foi realizada entre 7:30h e 8:30h e as cortinas eram abertas logo após o término da aplicação do gás.

4.2.3 Elementos Fisiológicos

4.2.3.1 Condutância Estomática

As condutâncias estomáticas medidas durante o dia 20/09 nos ambientes C1 e C4 e no dia 22/09 nos ambientes C2 e C3, estão apresentadas na Figura 16. A condutância estomática aumentou à medida que aumentou a disponibilidade de água para a planta e atingiu valores máximos por volta de meio-dia, reduzindo-se gradualmente durante a tarde, confirmando os relatos da literatura (Turner et al., 1978; Meyer & Green, 1981 e Grant et al., 1994). Observa-se nas Figuras 16 e 17 que, durante a aplicação de CO_2 (entre 8:20h e 9:20h), a condutância estomática reduziu-se em todos os ambientes e volumes de água aplicados. Nesse período, os menores valores foram observados nos tratamentos que receberam volume de água V2 (0,65Vet) e V3 (1,0Vet). Verifica-se na Figura 16, que durante a aplicação de CO_2 , nos ambientes com maiores concentrações (C1 e C2), a amplitude dos valores de condutância estomática foi menor do que nos ambientes com menores concentrações (C3 e C4).

Nas avaliações realizadas às 10:00h as cortinas permaneciam fechadas e, nessa condição, a concentração de CO_2 foi maior do que a concentração normal da atmosfera, podendo-se verificar que o padrão da condutância estomática nos ambientes C2 e C3 reduziu-se à medida que reduziu o volume de água aplicado, diferindo-se das observações nos ambientes C1 e C4. Como as medidas foram realizadas em dias diferentes, essa performance pode ser atribuída ao efeito de variáveis ambientais como, temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor, intensidade de luz, entre outras.

Figura 16 – Condutância estomática medida nos ambientes C1, C2, C3 e C4 em função do volume de água aplicado.

Na Figura 17 está representada a condutância estomática em função da concentração de CO_2 para cada volume de água aplicado. Como se observa, durante a aplicação do gás a condutância estomática é menor no ambiente C2 para os volumes de

água V1, V3 e V4 e, para o volume V2 é menor no ambiente C3. No período de aplicação de CO_2 , em todos os ambientes, houve uma redução na condutância estomática, o que já foi observado para várias culturas cultivadas em ambientes com enriquecimento de CO_2 (Paez et al., 1984; Tolley & Strain, 1985; Yelle et al., 1990; Nederhoff et al., 1992; Nederhoff & De Graaf, 1993). No ambiente sem enriquecimento com CO_2 (C4), a condutância estomática também reduziu, porém, conforme pode ser observado na Figura 15, a concentração de CO_2 foi maior do que a concentração medida fora das estufas, apresentando um acréscimo de aproximadamente 16%.

Figura 17 – Condutância estomática para os volumes de água V1, V2, V3 e V4 em função da concentração de CO_2 (C1, C2, C3 e C4).

Na última avaliação, realizada por volta de 17:30h, para todas as condições experimentais, a condutância estomática reduziu, sendo inferior aos valores observados na primeira avaliação (8:00h), devido à redução da abertura estomática em função da redução da intensidade de luz. Os estômatos são os reguladores mais

importantes do processo de difusão e, variando a largura dos poros estomáticos, a planta controla, simultaneamente, a entrada de CO_2 na folha e a liberação de vapor d'água. Chmora & Mokronosov (1994) salientam que o efeito da concentração de CO_2 na condutância estomática varia entre as diferentes espécies de planta e, para muitas plantas C_3 e C_4 , reduz com o aumento da concentração de CO_2 .

4.2.3.2 Potencial de água na folha

Observa-se na Figura 18 (a e b) que o potencial de água na folha aumentou com o aumento do volume de água aplicado para todas as concentrações de CO_2 analisadas. O potencial de água na folha, medido no “predawn” foi superior ao medido ao meio dia e variou de $-3,73$ kPa (C2V4) a $-6,6$ kPa (C1V1). Os maiores valores de potencial de água na folha antes de nascer do sol constituem uma tendência normal, uma vez que, durante a noite, a absorção de água pela planta é maior do que a demanda evaporativa da atmosfera e, também, as plantas foram irrigadas 20 horas antes da coleta das folhas para a avaliação.

Nos tratamentos irrigados com volumes de água V2, V3 e V4, as diferenças entre o maior e o menor potencial reduziram nos ambientes com enriquecimento de CO_2 , sendo a diferença de $0,66$ kPa no ambiente C4, $0,4$ kPa nos ambientes C2 e C3 e $0,47$ kPa no ambiente C1. No tratamento V1, o maior potencial ($-4,73$ kPa) foi observado no ambiente C3 e o menor ($-6,6$ kPa) no ambiente C1. Comparando-se as Figuras 18a e 18c, pode-se verificar que esses valores seguem a tendência da umidade do solo, porém, nos tratamentos V2, V3 e V4 não há uma tendência definida entre o potencial de água na folha e a umidade do solo o que pode ser atribuído, possivelmente, ao intervalo de tempo decorrido entre a coleta das folhas e a medida do potencial.

Na Figura 18b, onde se representa o potencial de água medido ao meio dia, verifica-se que o mesmo varia de $-7,3$ kPa (C2V4) a $-18,5$ kPa (C1V1). Após o nascer do sol a demanda evaporativa da atmosfera aumenta gradativamente e, mesmo que a disponibilidade de água no solo seja alta, a taxa de absorção é menor do que a

demanda e o potencial de água na folha diminui. Verifica-se que nos tratamentos com volume de água V3 e V4 o maior potencial foi observado para a concentração C2 e o menor para C4. Nos tratamentos em que a planta recebeu volume de água igual ou superior a evapotranspiração (V3 e V4), a diferença do potencial de água na folha, entre os ambientes, é menor do que nos tratamentos V1 e V2. Resultados semelhantes foram obtidos por Tolley & Strain (1985) em mudas de duas espécies arbóreas e por Paez et al. (1984) em duas cultivares de tomate.

Figura 18 – Potencial de água na folha medido antes do nascer do sol (a), ao meio dia (b) e umidade do solo coletada antes do nascer do sol (c).

Nos tratamentos que receberam menor volume de água (V1 e V2) a diferença foi maior e os maiores valores de potencial foram observados no ambiente C3. Tolley & Strain (1985) verificaram que, durante o período de indução de estresse hídrico, o potencial de água na folha foi maior nas plantas cultivadas em ambiente com concentração de CO₂ de $1000\mu\text{L.L}^{-1}$ do que naquelas cultivadas nos ambientes com 350

e $675\mu\text{L.L}^{-1}$. Nas condições em que foi conduzido este experimento, pode-se verificar que o potencial de água na folha tende a ser maior nos ambientes com enriquecimento de CO_2 .

4.2.4 Características da planta

4.2.4.1 Altura da planta

Analisando o efeito do volume de água aplicado na cultura ao longo do ciclo, verifica-se na que a altura da planta no início do ciclo foi uniforme em todos os ambientes (Figura 19). Nos ambientes C1 e C3, até os 41 dias após o transplântio (DAT), não houve diferença entre os volumes de água aplicados; a partir dessa época o crescimento foi diretamente proporcional ao volume de água aplicado. No ambiente C2, o crescimento das plantas, para todos os volumes de água aplicados, não apresentou diferença até 82 DAT e, nas duas últimas medidas a maior diferença entre as alturas, de 19,85% em média, ocorreu entre V2 e V3. No tratamento sem enriquecimento de CO_2 (C4), as diferenças nas alturas das plantas, em função do volume de água aplicado, ocorreram mais cedo do que nos ambientes com enriquecimento de CO_2 e, no final do ciclo, houve tendência semelhante às plantas do ambiente C2.

Considerando o efeito do gás carbônico na altura da planta, observa-se na Figura 20 que para o menor volume de água aplicado (V1) a altura da planta foi maior nos ambientes C2 e C3 até 133 DAT. Quando se aumentou o volume para 40,7 litros, verificou-se que a menor altura ocorreu no ambiente C3 até 113 DAT; após essa época as alturas igualaram-se aos ambientes C2 e C4 e, no ambiente C1, as plantas foram mais altas. Até 82 DAT as plantas do tratamento V3 não apresentaram diferenças em altura, para todos as concentrações de CO_2 analisadas e, após essa data, ocorreu diferenciação e as plantas do ambiente C3 apresentaram menor altura. Para o volume V4, os menores valores de altura foram observados no ambiente C2 e os maiores no ambiente C4.

Comparando-se as Figuras 19 e 20, verifica-se que a altura das plantas foi mais influenciada pelo volume de água aplicado do que pela concentração de CO_2 e que

o efeito do gás foi mais evidenciado nos menores volumes de água aplicados. Nos ambientes com enriquecimento de CO_2 a diferenciação dos tratamentos foi mais tardia do que no ambiente sem enriquecimento de CO_2 , indicando que o aumento da concentração de gás carbônico atrasou o crescimento da planta; no entanto, no final do ciclo, não foram observadas diferenças significativas entre as alturas das plantas nas diferentes concentrações de gás. Resultados obtidos por Peñuelas et al. (1995a), demonstram que o aumento da concentração de CO_2 no ambiente retardou o aumento da biomassa total da cultura de pimentão, sendo o mesmo significativo 50 dias após o início do tratamento.

Figura 19 – Altura média das plantas em função dos volumes de água aplicado para cada concentração de CO_2 (C1, C2, C3 e C4).

Pode-se verificar também, que a taxa de crescimento da planta entre 55 e 82 DAT foi pequena para todas as condições de gás e volume de água aplicado e, o mesmo pode estar relacionado com o número de frutos existentes nas plantas, que em

média eram 8 de frutos por planta, uma vez que uma carga elevada de frutos é negativa para o crescimento das partes vegetativas.

O maior coeficiente de variação entre as medidas de altura de planta foi de 17,44% observado no ambientes C2 e volume de água V4 e o menor coeficiente foi de 0,61% verificado no ambiente C3 e volume de água aplicado V2.

Figura 20 – Altura média das plantas em função da concentração de CO₂ para cada volume de água aplicado (V1, V2, V3 e V4).

4.2.4.2 Diâmetro de Caule

Em todas as concentrações de gás analisadas, observou-se que, no início do ciclo, as plantas apresentaram diâmetro de caule homogêneo e que o mesmo aumentou com o aumento do volume de água aplicado (Figura 21). A taxa de crescimento foi mais acentuada até 55 DAT e, no período compreendido entre 55 e 82 DAT, houve uma redução na taxa de crescimento. No ambiente C1, os diâmetros de

caule para os maiores volumes de água aplicados, não apresentaram diferenças significativas. O mesmo pode ser observado no ambiente C3, onde se verifica que há duas tendências definidas pelos pares V1, V2 e V3, V4.

Figura 21 – Diâmetro médio do caule em função dos volumes de água aplicado para cada concentração de CO₂ (C1, C2, C3 e C4).

A concentração de CO₂ não teve efeito significativo no diâmetro de caule (Figura 22), principalmente nos tratamentos que receberam maior volume de água (V3 e V4). Para os menores volumes de água, no período compreendido entre 28 e 111 DAT, verificaram-se diferenças nos diâmetros de caule em função da concentração de CO₂. As plantas irrigadas com volumes V3 e V4 apresentaram um padrão de desenvolvimento semelhante em todos os ambientes e, não houve efeito do CO₂. No final do ciclo da cultura o diâmetro do caule foi igual em todos os ambientes.

Comparando-se as Figuras 21 e 22 verifica-se que o volume de água aplicado teve um efeito mais evidenciado no diâmetro do caule do que a concentração de gás carbônico, principalmente na última avaliação realizada. O maior coeficiente de variação dos dados analisados foi observado no ambiente C1 e volume V1 (11,72%) e o menor valor foi de 0,70%, no ambiente C3 e volume V3.

Figura 22 – Diâmetro médio do caule em função da concentração de CO_2 para cada volume de água aplicado (V1, V2, V3 e V4).

Baron & Gorski (1986) em trabalho conduzido durante dois períodos de aproximadamente 30 dias, sendo em um com baixa intensidade de luz e temperatura dia/noite de 24/19°C e o outro com alta intensidade de luz e temperatura dia/noite de 30/24°C, com plantas de berinjela cultivadas em solo coberto com manta de polietileno preta, e com aumento da concentração de CO_2 no sistema radicular variando de 0,03% a 15% e concentração de oxigênio de 20%, verificou que o diâmetro do caule aumentou significativamente para concentrações de CO_2 acima de 0,03%. Estes resultados não

corroboram com os dados obtidos neste experimento com pimentão, embora a forma de aplicação de gás não tenha sido mesma e, conseqüentemente, o efeito sobre a planta também será diferente.

4.2.4.3 Área Foliar

Os valores de área foliar medida durante o ciclo da cultura estão apresentados nas Figuras 23 e 24. Na Tabela 3 encontram-se os valores médios obtidos na última avaliação. Verifica-se que a área foliar da cultura tendeu a aumentar com o aumento do volume de água aplicado. No ambiente C1, a maior área foliar foi registrada no tratamento que recebeu 61,86 litros, indicando que para essa concentração de CO_2 o maior volume de água limitou o desenvolvimento da cultura.

Figura 23 – Área foliar média das plantas em função dos volumes de água aplicado para cada concentração de CO_2 (C1, C2, C3 e C4).

No ambiente C2, as áreas foliares das plantas dos tratamentos V2, V3 e V4 apresentam tendências semelhantes, sendo a taxa de crescimento maior para V3 e V4, que não diferem entre si, porém, apresentam diferenças em relação a V2. As plantas do tratamento V1 apresentaram a menor área foliar em decurso da acentuada queda de folhas ocorrida após os 69 dias do transplântio. Essa queda de folhas, imprevista, pode ter sido causada por algum resíduo de produto químico existente no pulverizador.

Verifica-se também, na Figura 24, que para todos os ambientes a área foliar reduziu-se nas duas últimas avaliações. Isso se deve, provavelmente, ao efeito de altas temperaturas que causaram a senescência das folhas, bem como a erros ocorridos pela alteração na medida da área foliar, pois a última avaliação foi realizada com medidor de área foliar LI 3100. A redução da área foliar observada entre 55 e 69 DAT deve-se à coleta de folhas para análise foliar de nutrientes, uma vez que todas as plantas apresentavam sinais de redução no desenvolvimento.

No ambiente sem enriquecimento de CO₂ as plantas do tratamento V1 apresentaram aumento significativo de área foliar após 82 DAT, o que pode ser atribuído a variabilidade microclimática, uma vez que os vasos deste tratamento ficavam em frente à porta da estufa e a mesma estava voltada para a direção predominante dos ventos e, devido a alta temperatura, as portas de todas as estufas ficavam abertas.

Conforme pode ser observado na Figura 24, até 82 DAT, as áreas foliares das plantas que foram irrigadas com volume total de água de 30,89 litros não apresentaram diferenças significativas em função das concentrações de CO₂, e a partir dessa época as plantas do ambiente sem enriquecimento com CO₂ apresentaram área foliar maior do que nos ambientes com enriquecimento de CO₂, sendo que na última avaliação as diferenças foram da ordem de 42,64% no ambiente C1, 78,35% no ambiente C2 e 55,55% no ambiente C3.

No tratamento V2, a área foliar tendeu a ser maior nos ambientes C4 e C1 e, para o tratamento V3 até 82 DAT, a área foliar tendeu a ser maior nos ambientes com enriquecimento de CO₂, porém, não apresentaram diferenças entre si e com o ambiente sem enriquecimento de CO₂. Para o maior volume de água aplicado (V4), todos os

ambientes enriquecidos com CO_2 proporcionaram área foliar menor do que no ambiente sem enriquecimento com CO_2 .

Nos tratamentos com enriquecimento de CO_2 , a área foliar tendeu a ser maior naquele com maior concentração, sendo que para o maior volume de água aplicado esta tendência não se confirmou, o que se pode justificar pela alta umidade do solo.

Figura 24 – Área foliar média das plantas em função da concentração de CO_2 para cada volume de água aplicado (V1, V2, V3 e V4).

A análise de regressão, aplicada aos dados de área foliar média da última avaliação (Tabela 3), mostrou que o modelo com termo quadrático para volume de água e linear para concentração de CO_2 apresentou melhor ajuste e explica 65,27% das variações totais, sendo expressa por:

$$AF = 1500,15 - 0,6381C + 2,9997V + 0.0522V^2 \quad R^2=0,6527$$

em que AF é a área foliar em cm², C é a concentração de CO₂ em μmol.mol⁻¹ e V é o volume de água aplicado em litros. Os coeficientes do modelo referentes à constante e à concentração de CO₂ foram significativos a 1% de probabilidade, porém, o coeficiente da variável água não foi significativo. Na Figura 25 estão representados os valores médios de área foliar, medidos e estimados pelo modelo, e observa-se que o mesmo descreve com boa precisão as variações de área foliar para as condições do experimento.

Tabela 3. Médias de área foliar (cm²) da cultura para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ (μmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	b 1714,71 C	a 1092,44 AB	a 978,74 A	ab 1178,83 B
40,7 (V2)	a 1316,02 BC	ab 1388,49 C	a 1063,45 AB	a 1013,07 A
61,86 (V3)	ab 1566,77 A	b 1503,19 A	b 1524,27 A	b 1365,99 A
82,83 (V4)	b 1814,23 BC	c 1931,11 C	b 1515,98 AB	b 1346,02 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade

Como se pode verificar pelos dados, a área foliar tende a aumentar com o aumento do volume de água aplicado ao longo do ciclo da cultura. De acordo com Peñuelas et al. (1995a), as plantas maximizam a área foliar quando o fornecimento de água e nutrientes são abundantes e minimizam quando esses recursos são limitados. Beese et al. (1982) trabalhando com pimentão irrigado, adotando-se 4 lâminas de irrigação, verificaram que os tratamentos de água influenciaram o desenvolvimento da área foliar desde o estágio inicial de desenvolvimento, sendo maior no tratamento que recebeu maior lâmina.

Com relação ao efeito do CO_2 , em que a área foliar reduziu-se nos ambientes com enriquecimento de CO_2 , resultado semelhante foi obtido por Peñuelas et al. (1995a), para a cultura de pimentão em ambiente com concentração de CO_2 de $700\mu\text{mol.mol}^{-1}$. Os autores sugerem que em condições de alta concentração de CO_2 o armazenamento de fotossintatos por unidade de área foliar é maior.

Figura 25 – Diagrama de dispersão entre os valores de área foliar média (cm^2) medidos e estimados pelo modelo.

Ziska & Teramura (1992) trabalhando com arroz, verificaram que a área foliar reduziu com alta concentração de CO_2 e, Yelle et al. (1990) e Körner & Arnone (1992), não observaram mudanças significativas. Entretanto, Morrison & Gifford (1984a), trabalhando com 16 espécies agrícolas e hortícolas, verificaram que em 14 espécies a área foliar aumentou com o enriquecimento do ambiente com CO_2 . Segundo os autores, não há consenso sobre os efeitos quantitativos do aumento da concentração de gás carbônico no desenvolvimento das plantas devido às diferenças entre espécies e, também, porque o efeito de fatores ambientais pode limitar a resposta da planta.

4.2.5 Componentes de produção

4.2.5.1 Peso fresco total dos frutos

Na tabela 4 estão registrados os dados de peso fresco total dos frutos, podendo-se verificar que o mesmo aumenta com o aumento do volume de água aplicado e com o enriquecimento do ambiente com CO₂. Observa-se que, para os menores volumes de água aplicados, não houve diferença significativa, a 5% de probabilidade, para peso fresco total dos frutos nos ambientes C4 e C2, bem como para os maiores volumes (V3 e V4) em todas as concentrações de CO₂. Aumentando-se o volume de água aplicado de 40,7 litros para 61,86 litros (acréscimo da ordem de 51,99%), a produção da cultura foi significativamente aumentada em todas as concentrações de CO₂, sendo o acréscimo da ordem de 66,8% no ambiente C4, 170% no ambiente C3, 117,72% no ambiente C2 e 35,41% no ambiente C1. Mesmo não havendo diferença significativa, nos ambientes C4 e C1, a produção aumentou com o aumento do volume aplicado de V3 para V4, porém, a taxa de acréscimo na produção foi inferior à do volume de água aplicado.

Tabela 4. Médias de peso fresco de fruto (g) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ (μmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 177,30 AB	a 144,97 A	a 227,28 B	a 162,62 A
40,7 (V2)	a 248,29 A	b 238,89 A	a 240,86 A	b 394,84 B
61,86 (V3)	b 414,16 A	c 645,00 C	b 524,40 B	c 534,65 B
82,83 (V4)	b 466,10 A	c 610,69 C	b 525,54 AB	c 559,90 BC

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade

Nos ambientes C4 e C1, os volumes de água aplicados não foram suficientes para que a planta atingisse a produção máxima. O rendimento do pimentão aumenta até certo limite, com lâminas de água crescentes, em seguida diminui, em geral por problemas de aeração do solo e lixiviação de N (Ferreyra et al., 1985). Diversos trabalhos têm demonstrado que a produção da cultura de pimentão aumenta quando o volume aplicado cresce (Caixeta, 1981; Gil, 1987; Teodoro et al., 1993).

Para o volume de água V1, no ambiente C2 a produção foi 28,19% maior do que no ambiente C4 e, para as demais concentrações de CO₂, houve uma redução na produção. No ambiente C1 e volume de água V2, a produção foi 59,02% maior do que no ambiente C4 e, nos demais ambientes, a produção foi menor. Para os maiores volumes de água aplicados, V3 e V4, observou-se um aumento na produção em todos os ambientes com enriquecimento de CO₂, sendo que o ambiente C3 apresentou a maior produção com acréscimos de 55,74% para V3 e 31,02% para V4.

Os dados demonstram que as maiores produções, nos tratamentos em que a água foi o fator limitante (V1 e V2), foram obtidas nos ambientes com maior concentração de gás. De acordo com relatos de Idso & Idso (1994), há uma grande diversidade entre os resultados de estudos conduzidos com aumento da concentração de CO₂. Entretanto, na maioria dos trabalhos realizados, fica claro que a resposta das plantas ao aumento da concentração de gás carbônico quando a água é fator limitante, é consideravelmente maior do que quando não há restrição de água.

Enoch et al. (1970) conduziram experimento com pimentão cultivado em túneis cobertos com plástico, sem e com enriquecimento de CO₂ (10.000 vpm), sendo que a aplicação do gás iniciou 30 dias após o transplante e encerrou 15 dias antes da primeira colheita. O aumento na produção total, das 3 colheitas realizadas, foi da ordem de 20%. Guri et al. (1998) aplicando uma concentração de CO₂ de 400ppm, via água de irrigação, verificaram aumento de 10% na produção total do pimentão. Já para Storlie & Heckman (1996), a aplicação de CO₂ via água de irrigação, a uma taxa de 1,2 g/litro, na cultura de pimentão, não promoveu aumento na produção.

De fato, a resposta das culturas cultivadas em ambiente com enriquecimento de CO₂ não tem sido previsível e, de acordo com Kimball (1983), os incrementos na produção variam de 14% a 61%. As causas dessas variações segundo Peet (1986), são: as condições em que se desenvolve a cultura, a técnica de aplicação de CO₂ (fonte, concentração e regime de aplicação), a quantidade total de carbono, a adaptação da cultura, a relação fonte-dreno, etc. A produção de frutos é resultado de diversos processos tais como a taxa de assimilação líquida, a floração e a distribuição de matéria seca, sendo que todos podem ser afetados pelas condições climáticas, quantidade de água e fertilizantes, incidência de pragas e doenças ou distúrbios fisiológicos.

Os valores médios de peso fresco dos frutos foram ajustados por regressão linear múltipla em função do volume água aplicado e da concentração de CO₂, obtendo um modelo com termos quadráticos para o volume de água aplicado e linear para a concentração de CO₂, com coeficiente de determinação (R²) de 0,8514. O coeficiente do modelo, para a variável concentração de gás, não diferiu significativamente de zero, a 5% de probabilidade pelo teste de t. Assim, conclui-se que o fenômeno é suficientemente descrito pela seguinte equação:

$$PFF = -616,51 + 0,112C + 28,37V - 0,184 V^2 \quad R^2=0,8514$$

em que PFF é o peso fresco de fruto em gramas, C é a concentração de CO₂ em $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ e V é o volume de água aplicado em litros. Na Figura 26 estão relacionados os dados medidos e estimados pela equação de regressão.

4.2.5.2 Eficiência de uso da água

Como se observa na Tabela 5, a eficiência de uso da água foi influenciada tanto pelo volume de água aplicado quanto pela concentração de CO₂. No ambiente C4, não houve efeito significativo do volume da água aplicado sobre a eficiência de uso de água. Nos tratamentos em que as plantas foram submetidas ao estresse hídrico (V1 e V2), a eficiência de uso da água foi maior nos ambientes C2 e C1, respectivamente, com

Figura 26 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso fresco de fruto (g) medidos e estimados pelo modelo.

Tabela 5. Médias de eficiência de uso da água (g.litro^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO_2 ($\mu\text{mol.mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO_2			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 5,74 AB	a 4,69 A	ab 7,36 B	a 5,26 A
40,7 (V2)	a 6,10 A	b 5,87 A	a 5,92 A	c 9,70 B
61,86 (V3)	a 6,70 A	c 10,43 C	b 8,48 B	bc 8,64 B
82,83 (V4)	a 5,63 A	d 7,37 C	a 6,34 AB	ab 6,76 BC

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade

diferença significativa entre os ambientes C1 e C4. Nos tratamentos em que a planta foi irrigada com volume V3 e V4, a eficiência de uso da água foi menor no ambiente C4, diferindo significativamente dos ambientes com enriquecimento de CO_2 . Para as plantas irrigadas com volume V4, nos ambientes com enriquecimento de CO_2 , o aumento da

eficiência de uso da água, comparada ao ambiente sem enriquecimento, foi de 55,67% no ambiente C3, de 26,57% no ambiente C2 e 28,95% no ambiente C1.

Nos ambientes C4 e C1, o peso fresco dos frutos aumentou nos tratamentos irrigados com volume V4 (Tabela 4), induzindo-se a supor que um maior volume de água poderia aumentar ainda mais a produção. Entretanto, fica evidenciado que, a viabilidade de um insumo no aumento da produção agrícola deve ser determinada não somente pela produção, mas também pela eficiência de uso do mesmo pela planta.

Com a abertura estomática para assimilação de CO₂, a água é inevitavelmente perdida. Como o controle da transpiração está associado diretamente ao suprimento de CO₂ à folha, a condutância estomática deve variar ao longo do tempo, de forma a haver um mínimo de perda de água para uma máxima assimilação de CO₂. O aumento da biomassa associado à redução da transpiração promove o aumento da eficiência de uso da água, o qual tem sido observado em vários experimentos, em função do aumento da concentração de CO₂ (Morrison & Gifford, 1984b; Zarbi & Burrage, 1998; Centrito et al., 1999 e Hunsaker et al., 2000).

Neste trabalho, a eficiência de uso da água foi calculada com base no volume de água aplicado. Se calculados com base na transpiração das plantas, os valores poderiam ser maiores nos ambientes com enriquecimento de CO₂, pois nestes observou-se que o consumo de água pela planta foi menor. Verificou-se também que a área foliar, no final do experimento, tendeu a ser menor nos ambientes com enriquecimento de CO₂, o que pode ter contribuído para reduzir a taxa de transpiração da planta.

4.2.5.3 Número de frutos por planta

O aumento do volume de água aplicado promoveu aumento do número de frutos por planta, em sete colheitas, sendo que para todas as concentrações de CO₂ analisadas não houve diferença significativa entre os volumes V3 e V4, conforme se observa na Tabela 6. No ambiente sem enriquecimento com CO₂, o número de frutos por planta reduziu em 2% com o aumento do volume de água aplicado de 61,86L.planta⁻¹

para $82,83\text{L.planta}^{-1}$, porém, essa redução não foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Com relação à concentração de CO_2 , verificou-se que para os volumes V1 e V3 o número de frutos por planta não apresentou diferença significativa. Entretanto, para o volume V1, o enriquecimento do ambiente com CO_2 à concentração de $800\mu\text{mol.mol}^{-1}$, no qual o número de frutos é igual ao ambiente C4, proporcionou aumento no peso fresco e seco dos frutos (Tabelas 4 e 7).

Para o volume de água V2, nos ambientes C4, C2 e C1, não houve aumento significativo do número de frutos por planta, porém, houve um acréscimo de 59,02% no peso fresco do fruto e 45,17% no peso seco do fruto no ambiente C1.

Comparando o número de frutos por planta com o peso fresco e seco dos frutos, pode-se verificar que o enriquecimento do ambiente com CO_2 aumenta a produção em função do aumento do peso, e não do número de frutos produzidos. Resultados semelhantes foram obtidos para a cultura de tomate (Calvert & Slack, 1975; Kimball & Mitchell, 1979; Islam et al., 1996) e, de acordo com Islam et al. (1996), as plantas, provavelmente, acumulam mais carboidratos nos frutos uma vez que, em ambientes enriquecidos com CO_2 , a taxa de fotossíntese é alta.

Ainda, pelos dados da Tabela 6, pode-se verificar que para os volumes de água V3 e V4 o maior número de frutos foi obtido no ambiente C3, sendo esse resultado compatível ao obtido por Calvert & Slack (1975) para a cultura de tomate, cultivada em ambiente com concentração de CO_2 de 600 ppm.

Tabela 6. Médias do número de frutos por planta, em sete colheitas, para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ (μmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 6,25 A	a 6,75 A	a 6,25 A	a 5,00 A
40,7 (V2)	b 9,25 AB	a 7,75 A	a 10,00 B	b 10,50 B
61,86 (V3)	c 12,50 A	b 13,75 A	bc 12,75 A	c 13,50 A
82,83 (V4)	c 12,25 A	b 15,75 B	c 14,00 AB	c 15,50 B

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade

A análise de regressão aplicada aos valores médios de número de frutos por planta mostrou que, o coeficiente da variável independente concentração de CO₂ não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de t, resultando no seguinte modelo:

$$NF = -8.42 + 0,0014C + 0,55V - 0,0034V^2 \quad R^2=0,9095$$

em que NF é o número de frutos por planta, C é a concentração de CO₂, em μmol.mol⁻¹, e V é o volume de água aplicado, em litros. Na Figura 27 estão representados os valores observados e estimados para o número de frutos por planta, podendo-se verificar que o modelo ajustado superestima os valores e há maior dispersão dos dados para número de frutos superior a 12.

4.2.5.4 Peso seco de fruto

O peso seco dos frutos tende a aumentar com o aumento do volume de água aplicado para todas as concentrações de CO₂ analisadas (Tabela 7). Verificou-se que nos ambientes C2 e C3 o peso seco dos frutos reduziu com o aumento do volume de

Figura 27 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de número de frutos observados e estimados pelo modelo.

Tabela 7. Médias de peso seco de fruto (g) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO_2 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO_2			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 15,18 B	a 12,80 AB	a 19,62 C	A 10,25 A
40,7 (V2)	a 19,68 A	b 18,27 A	a 21,80 A	B 28,57 B
61,86 (V3)	b 29,64 A	c 42,98 C	b 37,66 B	C 36,86 B
82,83 (V4)	c 35,54 A	c 41,02 A	b 36,01 A	C 39,02 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade

água aplicado, de V3 para V4, no entanto, a diferença não foi significativa, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Nos ambientes C1 e C4, os acréscimos no peso seco dos frutos, com o aumento do volume de água aplicado de V3 para V4, foram de 19,91% para o ambiente C4 e 5,86% para o ambiente C1. Portanto, um aumento de 33,3% no volume de água aplicado, não promoveu aumento semelhante no peso seco do fruto e a adoção desse volume somente seria viável se o preço obtido pelo produto

compensasse o custo adicional da água. Caixeta et al. (1981) trabalhando com pimentão verificou que o aumento da lâmina de água implicou numa redução da percentagem de matéria seca da polpa (sem semente, placenta, caule e pedúnculo) e que essa característica é desejável para os frutos destinados à indústria de flocos e pó de pimentão, pois o consumo de energia para secagem é menor.

Em geral o peso seco do fruto tende a aumentar com o aumento da concentração de CO₂; no entanto para os ambientes C1 e C3 e volume V1, o peso seco do fruto foi menor do que no ambiente C4. Essa tendência pode ser observada também para o volume V2 do ambiente C3.

Nos tratamentos com volume V3 e V4, o peso seco dos frutos foi maior em todos os ambientes com enriquecimento de CO₂, porém, os acréscimos foram inferiores àqueles observado para peso fresco de fruto, sendo o menor acréscimo (1,36%) registrado no ambiente C2 e volume V4 e o maior acréscimo (45,01%) registrado no ambiente C3 e volume V3. Schaffer et al. (1999) obtiveram maior peso seco de frutos de manga e macadâmia em ambiente com concentração de CO₂ de 600 μmol.mol⁻¹, comparativamente ao ambiente com 350 μmol.mol⁻¹.

A análise de regressão aplicada aos valores médios de peso seco de fruto indicou que o modelo com efeito quadrático para volume de água aplicado e linear para concentração de CO₂ descreve bem o fenômeno, com coeficiente de determinação (R²) igual a 0,8574, a saber:

$$PSF = -34,7774 + 0,0054C + 1,8173V - 0,01186V^2 \quad R^2=0,8574$$

em que PSF é o peso seco do fruto, em gramas, C é a concentração de CO₂, em μmol.mol⁻¹, e V é o volume de água aplicado, em litros. Os coeficientes do modelo referentes ao volume de água e à constante foram significativos ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste t, porém com relação à concentração de CO₂ o nível de significância foi de 24,16%. Na Figura 28 estão relacionados os valores médios de peso

seco dos frutos medidos e estimados pelo modelo, e pode-se verificar que os dados se distribuem em torno da reta 1:1.

Figura 28 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco de fruto (g) medidos e estimados pelo modelo.

4.2.5.5 Peso seco de Folha

Os valores de peso seco das folhas apresentam características diferenciadas em cada concentração de CO_2 . Há tendência de aumentar com o aumento do volume de água aplicado, o que pode ser observado, principalmente, no ambiente C2 (Tabela 8). Beese et al. (1982) estudando o efeito de 4 diferentes lâminas de irrigação na cultura de pimentão verificou que o peso seco das folhas aumentou com o aumento da lâmina aplicada. Conforme pode ser observado, no ambiente C4, o menor valor de peso seco das folhas foi registrado no tratamento com volume de água aplicado V2, sendo significativamente diferente para os volumes V1, V3 e V4 e, entre esses, não há diferença significativa. Verifica-se, também, que nesse ambiente, o peso seco das folhas foi maior do que nos ambientes com enriquecimento de CO_2 .

Tabela 8. Médias de peso seco das folhas (g.planta^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO_2 ($\mu\text{mol.mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO_2			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	b 9,69 B	a 5,88 A	a 5,25 A	ab 6,14 A
40,7 (V2)	a 7,05 B	ab 7,11 B	a 6,13 AB	a 5,64 A
61,86 (V3)	b 9,07 A	b 8,52 A	b 8,58 A	c 8,60 A
82,83 (V4)	b 10,19 B	c 10,56 B	b 8,21 A	b 7,18 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade

Nos ambientes com enriquecimento de CO_2 e volume de água V1, V2 e V3, o menor peso seco de folhas está associado ao maior peso fresco de frutos (Tabela 4), exceto para o volume V4 em que o menor valor (7,18 g) foi observado no ambiente C1. O peso seco médio das folhas obtido neste trabalho, em que as plantas foram cultivadas em vaso e com 4 ramos produtivos, é bem inferior àqueles encontrados por Beese et al. (1982) e Silva (1998), em que os experimentos foram conduzidos em campo e casa de vegetação, respectivamente.

Com relação ao efeito do CO_2 no peso seco das folhas, os dados obtidos diferem daqueles apresentados por Peñuelas et al. (1995a), em plantas de pimentão, com ciclo de 50 dias e de Paez et al. (1984), para a cultura do tomate, 35 dias após a emergência, cujos resultados indicam que o peso seco das folhas foi maior no ambiente com enriquecimento de CO_2 . Por outro lado, Retuerto & Woodward (1993), verificaram que o peso seco das folhas de *Sinapis alba* L., cultivada em ambiente enriquecido com CO_2 ($700\text{cm}^3.\text{m}^{-3}$), foi maior do que no ambiente com $350\text{cm}^3.\text{m}^{-3}$ no início do ciclo e que, 60 dias após, reduziu consideravelmente. Tem sido observado que a taxa fotossintética em plantas cultivadas em ambiente enriquecido com CO_2 reduz com o tempo (Bazzaz et al., 1989). Embora a causa dessa redução não seja totalmente conhecida, sugere-se que seja pela redução da eficiência de carboxilação causada pela

redução na quantidade e atividade de enzimas, limitação na exportação de carboidratos da fonte para os drenos, quantidade insuficiente de drenos e a danos físicos nos cloroplasto devido ao acúmulo de amido (Bazzaz, 1990).

Os valores médios de peso seco das folhas foram analisados por regressão e para o modelo adotado, o teste de t mostrou que o efeito do volume de água não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,6051 para o seguinte modelo de ajuste:

$$\text{Psf} = 6,1572 - 0,0035C + 0,0991V - 0,0004V^2 \quad R^2 = 0,6051$$

em que Psf é o peso da folhas, em gramas, C é a concentração de CO_2 , em $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, e V é o volume de água aplicado, em litros. Os dados médios de peso seco de folhas medidos e ajustados pelo modelo estão correlacionados na Figura 29, e observa-se que a maior dispersão foi para peso seco de folhas superior a 8 gramas.

Figura 29 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco das folhas ($\text{g} \cdot \text{planta}^{-1}$) medidos e estimados pelo modelo.

4.2.5.6 Peso seco de caule

O volume de água aplicado influenciou significativamente o peso seco do caule, verificando-se aumento do peso com o aumento do volume de água para todas as concentrações de gás carbônico analisadas (Tabela 9). Resultado semelhante foi obtido por Paez et al. (1984) para a cultura de tomate em ambiente controlado e com concentração de CO₂ de 350µL.L⁻¹ e 675µL.L⁻¹ e com dois tratamentos de irrigação (bem irrigado e com estresse). No ambiente C1 houve uma redução do peso seco do caule quando o volume de água variou de V3 para V4, sendo essa característica observada em outras variáveis analisadas. Nesse tratamento o solo apresentava-se mais úmido do que nos vasos que receberam o mesmo volume de água nas outras concentrações de CO₂. O excesso de água pode ter sido o fator que limitou o desenvolvimento das plantas, porém, não comprometeu as variáveis produtivas como número de frutos e peso fresco de frutos, uma vez que nos primeiros meses a condição de umidade do solo não apresentava indícios de excesso de água.

Tabela 9. Médias de peso seco do caule (g.planta⁻¹) para as diferentes combinações de volume de água (litros) e concentração de CO₂ (µmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 17,41 A	a 16,10 A	a 17,15 A	a 15,81 A
40,70 (V2)	b 21,35 A	b 19,51 A	a 20,56 A	b 19,16 A
61,86 (V3)	c 31,23 B	c 27,24 A	b 27,56 A	d 28,42 AB
82,83 (V4)	d 34,82 B	d 35,78 B	c 33,37 B	c 25,54 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Nos tratamentos que receberam menor volume de água, o aumento da concentração de CO₂ não teve efeito significativo no peso da matéria seca do caule. Para o volume V3, o maior valor da variável ocorreu no ambiente C4, com diferenças

significativas em relação aos ambientes C2 e C3. Os tratamentos que receberam o maior volume de água (V4) não apresentaram diferenças significativas entre os ambientes com menor concentração de CO₂, sendo observado o maior valor no ambiente com 600 μmol.mol⁻¹.

Peñuelas et al. (1995 b) verificaram que os pesos secos do caule, da folha e total foram menores nos tratamentos com concentração de CO₂ variando de 500 a 3500 μmol.mol⁻¹ (média diária de 700 μmol.mol⁻¹), e que a redução na biomassa total, devida à concentração de CO₂ (50%), foi maior do que a redução devida à limitação de água (40%). Segundo os autores, concentrações de CO₂ inferiores a 5000 μmol.mol⁻¹, geralmente não são prejudiciais às plantas ou animais e que os efeitos negativos do CO₂ devem-se ao longo período em que as plantas ficam expostas a concentrações elevadas e flutuantes de CO₂.

A análise de regressão das médias de peso seco do caule mostrou que o modelo com termos quadráticos para volume de água aplicado e linear para concentração de CO₂ descreveu bem o fenômeno, apresentando coeficiente de determinação de 0,9052, e os coeficientes do modelo foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de t, tanto para o volume quanto para concentração de CO₂, porém a constante não foi significativa. O modelo ajustado foi o seguinte:

$$P_{sc} = 1,7362 - 0,0057C + 0,7043V - 0,0035V^2 \quad R^2=0,9052$$

em que, P_{sc} é o peso seco do caule, em gramas, C é a concentração de CO₂, em μmol.mol⁻¹, e V é o volume de água aplicado, em litros.

4.2.5.7 Peso seco da parte aérea

Observa-se na Tabela 10 que o volume de água aplicado teve efeito significativo sobre o peso seco da parte aérea da planta, em todas as concentrações de CO₂ analisadas. A maior taxa de acréscimo foi observada quando o volume de água

aumentou de V2 para V3, sendo essas da ordem de 40,41% no ambiente C4, 61,37% no ambiente C3, 42,17% no ambiente C2 e 34,32% no ambiente C1.

Tabela 10. Médias de peso seco da parte aérea (g.planta^{-1}) da planta para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO_2 ($\mu\text{mol.mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO_2			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 56,46 BC	a 54,14 AB	a 60,85 C	a 50,90 A
40,70 (V2)	b 69,19 A	b 64,53 A	b 70,76 A	b 72,72 A
61,86 (V3)	c 97,15 A	c 104,13 A	c 100,60 A	c 97,68 A
82,83 (V4)	d 108,06 B	d 118,33 C	d 109,48 B	c 96,35 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A concentração de CO_2 teve efeito significativo no peso seco da parte aérea somente nos tratamentos que receberam volume de água V1 e V4. Para a condição de estresse hídrico (V1 e V2), o peso seco da parte aérea reduziu com o aumento da concentração de CO_2 de C4 para C3 e, em seguida, aumentou no ambiente C2. Paez et al. (1984) verificaram que o peso seco da parte aérea de plantas de tomate cultivadas em ambientes com $350\mu\text{L.L}^{-1}$ e $675\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 e submetidas a estresse hídrico, aumentou com o aumento da concentração de gás. Portanto, pode-se verificar semelhança entre os resultados encontrados, pois, observou-se um aumento do peso seco da parte aérea no ambiente C2 em relação a C4.

Para os volumes V3 e V4, o peso seco da parte aérea das plantas aumentou com o aumento da concentração de CO_2 até certo limite, em seguida reduziu-se, e o maior valor foi obtido no ambiente C3. Resultados semelhantes foram encontrados por Ziska & Teramura (1992), em plantas de arroz cultivadas em ambiente com $360\mu\text{L.L}^{-1}$ e $660\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 . Comparando-se o ambiente C3 com o C4, verifica-

se que as taxas de acréscimo foram da ordem de 7,18% para o volume V3 e 9,5% para o volume V4.

Os valores médios de peso seco da parte aérea da planta foram ajustados por um modelo de regressão múltipla, com termos quadráticos para volume de água e linear para concentração de CO₂, sendo que a variável independente volume de água foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de t, porém, a concentração de gás não foi significativa. O coeficiente de determinação foi 0,9367 e os valores dos coeficientes das variáveis independentes são:

$$Psa = -21,1520 - 0,0043C + 3,090716V - 0,0180V^2 \quad R^2=0,9367$$

em que, Psa é o peso seco da parte aérea da planta, em gramas, C é a concentração de CO₂, em $\mu\text{mol.mol}^{-1}$, e V é o volume de água aplicado, em litros. Os dados de peso seco da parte aérea da planta, medidos e ajustados pelo modelo, são apresentados na Figura 30, podendo-se verificar que não houve grande dispersão quanto aos valores obtidos.

4.2.5.8 Peso seco de raiz

O peso seco das raízes não apresentou tendência definida tanto para o volume de água aplicado quanto para a concentração de CO₂ (Tabela 11). No ambiente C1, o peso seco aumentou com o volume de água até o volume V3, reduzindo-se no volume V4; nos demais ambientes essa tendência não se verificou. Em todos os ambientes com enriquecimento de CO₂ e volume de água V1 e V4, o peso seco das raízes foi menor do que no ambiente com concentração de CO₂ normal da atmosfera, observando-se, também, uma redução quando o volume de água aumentou de V3 para V4. Para os volumes V2 e V3 o peso seco de raiz aumentou com o aumento da concentração de CO₂ até $600\mu\text{mol.mol}^{-1}$ e, a seguir, reduziu com o aumento da concentração.

Figura 30 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco da parte aérea da planta (g.planta^{-1}) medidos e estimados pelo modelo.

Tabela 11. Médias de peso seco da raiz (g.planta^{-1}) da planta para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO_2 ($\mu\text{mol.mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO_2			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	ab 21,05 B	a 15,09 A	a 19,61 B	a 14,45 A
40,70 (V2)	a 16,95 A	b 25,65 B	a 19,39 A	a 16,76 A
61,86 (V3)	ab 22,11 AB	b 24,72 B	b 24,29 AB	b 21,78 A
82,83 (V4)	b 24,61 B	b 22,31 B	b 23,66 B	a 16,71 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Paez et al. (1984) trabalhando com duas cultivares de tomate, em ambiente controlado, com concentração de CO_2 de $350\mu\text{L.L}^{-1}$ e $675\mu\text{L.L}^{-1}$, e dois

regimes de irrigação (bem irrigadas e com estresse), verificaram que as plantas bem irrigadas de uma cultivar (New Yorker) o peso seco da raiz não foi influenciado pela concentração de CO₂, porém, nas plantas submetidas a estresse hídrico, o mesmo aumentou em função da concentração de CO₂. Esses resultados são semelhantes aos observados nos tratamentos V2 (com déficit de água) e V3 e V4 (sem déficit de água).

No ambiente C1, o peso seco das raízes foi menor do que nos demais ambientes, para todos os volumes de água aplicados. Nas plantas irrigadas com volume V4, após a retirada das raízes, verificou-se que a quantidade de raízes era menor e com indícios de apodrecimento.

Os valores médios de peso seco da raiz foram ajustados por um modelo de regressão múltipla, com termos quadráticos para volume de água e linear para concentração de CO₂. O modelo não apresentou um bom ajuste ($R^2 = 0,3546$), indicando que explicou apenas 35,46% da variação total dos dados. Os coeficientes do modelo não foram significativos aos níveis de 5% de probabilidade, pelo teste de t. O modelo ajustado foi o seguinte:

$$Psr = 6,7471 - 0,0053C + 0,6007V - 0,0045V^2 \quad R^2=0,3546$$

em que, Psr é o peso seco da raiz, em gramas, C a concentração de CO₂, em $\mu\text{mol.mol}^{-1}$, e V o volume de água aplicado, em litros. Os valores de peso seco da raiz, medidos e estimados pelo modelo, estão apresentados na Figura 31, podendo-se verificar que o modelo tende a subestimar o peso seco da raiz para valores acima de 18 gramas.

4.2.5.9 Peso seco total da planta

Analisando-se os dados da Tabela 12, verifica-se que o peso seco total da planta aumentou em função do aumento do volume de água aplicado em todos os ambientes, exceto no ambiente C1 em que o maior valor foi observado para o volume V3, embora a diferença em relação ao volume V4 não seja significativa. As maiores taxas de acréscimo foram observadas entre os volumes V2 e V3, da ordem de 38,45% no

ambiente C4, 42,88% no ambiente C3, 38,55% no ambiente C2 e 33,52% no ambiente C1.

Figura 31 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco de raiz (g.planta^{-1}) medidos e estimados pelo modelo.

Tabela 12. Médias de peso seco total da planta (g.planta^{-1}) para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO_2 ($\mu\text{mol.mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO_2			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 77,51 B	a 69,23 A	a 80,45 B	a 65,35 A
40,70 (V2)	a 86,14 A	b 90,18 A	a 90,15 A	b 89,48 A
61,86 (V3)	b 119,26 A	c 128,85 B	b 124,90 AB	c 119,47 A
82,83 (V4)	c 132,67 B	d 140,64 B	b 133,14 B	c 113,07 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

No tratamento V1, o peso seco foi maior no ambiente C2, apesar de não diferir significativamente do ambiente C4, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. No tratamento V2 a concentração de CO₂ não teve efeito significativo no peso seco total, no entanto, os maiores valores foram observados nos ambientes com enriquecimento de CO₂. Tem sido demonstrado que para plantas cultivadas em ambiente enriquecido com CO₂ e submetidas a estresse hídrico, a produção de matéria seca total é maior (Gifford, 1979; Tolley & Strain, 1984). No tratamento V2 os resultados estão de acordo com o que se preconiza na literatura, porém, no tratamento V1, nos ambientes C3 e C1, o peso seco total foi menor do que no ambiente C4.

Nos tratamentos com maior volume de água aplicado, o peso seco total aumentou com o aumento da concentração de CO₂ até 600 $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ e, a seguir, reduziu-se com o aumento da concentração. Esses resultados são corroborados pelos obtidos por Tolley & Strain (1984), em plantas de seringueira. No ambiente C3, a taxa de acréscimo do peso seco total, em relação ao ambiente C4, foi 8,04% para o volume V3 e 6,0% para o volume V4.

Embora vários estudos demonstraram que o peso seco total da planta é maior nos ambientes com enriquecimento de CO₂ (Kimball & Mitchell, 1979; Ziska & Teramura, 1992) e que o efeito do aumento da concentração de CO₂ é mais acentuado na fase inicial da cultura (Peet, 1986; Retuerto & Woodward, 1993), neste trabalho verificou-se que o efeito do volume de água aplicado no peso seco total da planta foi mais evidenciado do que a concentração de CO₂,

Os valores médios de peso seco total foram ajustados por um modelo de regressão múltipla, com termos quadráticos para volume de água e linear para concentração de CO₂, apresentando um coeficiente de determinação $R^2=0,9185$, indicando que o ajuste foi bom. Os coeficientes das variáveis relativas ao volume de água aplicado foram significativos, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de t. Entretanto, a constante do modelo e os coeficientes da variável concentração de CO₂ não foram significativos. O modelo ajustado foi o seguinte:

$$\text{Pst} = -14,4049 - 0,0096C + 3,6915V - 0,0225V^2$$

$$R^2=0,9185$$

em que Pst é o peso seco total, em gramas, C é a concentração de CO₂, em $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ e V é o volume de água aplicado, em litros. Os valores de peso seco total, medidos e ajustados pelo modelo, estão apresentados na Figura 32 e verifica-se que os dados estão próximos da reta 1:1.

Figura 32 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de peso seco total (g.planta^{-1}) medidos e estimados pelo modelo.

4.2.6 Caracteres dos frutos

4.2.6.1 Comprimento do fruto

A análise dos dados de comprimento do fruto, relativos à primeira e segunda colheita, é apresentada nas Tabelas 13 e 14. Com relação à água, o comprimento dos frutos da primeira colheita tendeu a aumentar conforme se aumentou o volume aplicado, apresentando diferença significativa entre os volumes V2 e V3, exceto no ambiente C3 cuja diferença foi significativa entre os volumes V1 e V2. A taxa de acréscimo no comprimento do fruto, em função do aumento do volume aplicado, foi de

19,38% no ambiente C4, 39,44% no ambiente C2 e 15,98% no ambiente C1. No ambiente C3 observou-se um acréscimo de 48,76% entre os volume V1 e V2.

Com relação ao efeito da concentração de CO₂ no comprimento do fruto, observou-se que para o volume V2 não houve efeito do gás em nenhum dos ambientes, sendo o menor valor registrado no ambiente C2 (Tabela 13). Verifica-se também, que nos tratamentos irrigados com os menores volumes (V1 e V2), o comprimento do fruto tendeu a ser maior no ambiente com concentração de CO₂ normal da atmosfera. Nos tratamentos com maior volume de água aplicado (V3 e V4) o comprimento do fruto tendeu a ser maior no ambiente C2.

Tabela 13. Médias de comprimentos de frutos (mm) da primeira colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 51,23 B	a 33,78 A	A 44,89 B	a 50,89 B
40,70 (V2)	a 52,39 A	b 50,25 A	A 46,05 A	a 52,30 A
61,86 (V3)	b 62,54 B	b 54,75 A	B 64,21 B	b 60,66 AB
82,83 (V4)	b 63,48 B	b 56,31 AB	B 72,09 C	b 54,72 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se na Tabela 14 que o volume de água aplicado não influenciou o comprimento de frutos, da segunda colheita, nos ambientes C4 e C1. Nos ambientes C1, C2 e C3 o comprimento do fruto tendeu a aumentar com o aumento do volume de água até C3, e reduziu-se para o maior volume aplicado. No ambiente C3 houve diferença significativa entre os volumes V1 e V2, apresentando uma taxa de acréscimo de 75,76% e, no ambiente C2, observou-se um aumento significativo entre os volumes V2 e V3, sendo a taxa de acréscimo de 44,23%.

Na segunda colheita, a concentração de CO₂ não teve efeito significativo sobre comprimento dos frutos das plantas irrigadas com maior o volume de água. Também não houve diferenças significativas entre os ambientes C1 e C4 e entre C2 e C3 para o volume de água aplicado V1. Para o volume V2, o menor comprimento do fruto foi observado no ambiente C2, não diferindo, estatisticamente, do ambiente C4, mas é significativamente diferente dos comprimentos obtidos nos ambientes C1 e C3. O maior comprimento de fruto foi obtido no ambiente C2 com volume de água V3 o qual difere significativamente dos ambientes C1, C3 e C4, que não diferem entre si.

Tabela 14. Médias de comprimentos de frutos (mm) da segunda colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ (μmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 65,97 B	a 35,72 A	a 46,02 A	a 59,45 B
40,70 (V2)	a 58,69 AB	b 62,78 B	a 50,67 A	a 65,59 B
61,86 (V3)	a 64,19 A	b 64,94 A	b 73,08 B	a 65,16 A
82,83 (V4)	a 66,14 A	b 61,42 A	b 64,07 A	a 56,66 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os comprimentos de frutos da primeira e da segunda colheita apresentaram tendências diferentes, tanto para volume de água aplicado quanto para concentração de CO₂. Na primeira colheita, o comprimento do fruto foi menor do que o observado na segunda colheita e, nas demais colheitas realizadas, observou-se redução no comprimento do fruto. Em todas colheitas, o comprimento médio dos frutos foi inferior àquele esperado para a cultivar (12cm, segundo Tivelli, 1998), sendo a alta temperatura do ambiente uma das causas prováveis. Após a segunda colheita, o comprimento dos frutos não foi analisado devido à ocorrência de queda acentuada de

flores e formação de frutos defeituosos, causando falhas nas amostragens e inviabilizando as análises.

Os valores médios de comprimento dos frutos foram ajustados por um modelo de regressão múltipla, com termos quadráticos para volume de água e linear para concentração de CO₂. O modelo não apresentou um bom ajuste, principalmente para os dados relativos à segunda colheita. Os modelos ajustados para a primeira e a segunda colheita foram:

$$Cf1 = 13,7828 + 0,0005C + 1,2490V - 0,0081V^2 \quad R^2 = 0,5063$$

$$Cf2 = 12,1484 - 0,0023C + 1,760V - 0,0137V^2 \quad R^2 = 0,2280$$

em que Cf1 e Cf2 são, respectivamente, o comprimento médio dos frutos da primeira e da segunda colheita, em mm. Os coeficientes dos modelos não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de t.

4.2.6.2 Diâmetro de fruto

Nas Tabelas 15 e 16 estão apresentados os dados de diâmetro médio dos frutos, medidos na primeira e na segunda colheita. Em todos os tratamentos, os diâmetros foram inferiores àqueles esperados em função das características da cultivar. Verifica-se na Tabela 15 que o diâmetro do fruto foi influenciado pelo volume de água aplicado e pela concentração de CO₂. Com relação ao volume de água, houve diferença significativa entre o menor volume (V1) e os maiores volumes (V3 e V4). Nos ambientes C4 e C2 o diâmetro dos frutos aumentou com o aumento do volume de água aplicado e, nos ambientes C3 e C1, o diâmetro aumentou até o volume V3 e em seguida reduziu-se, porém, a diferença não foi significativa.

Tabela 15. Médias de diâmetro de frutos (mm) da primeira colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ (μmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 47,48 AB	a 46,15 AB	a 45,77 A	a 50,32 B
40,70 (V2)	ab 49,31 AB	ab 49,79 B	a 46,29 A	ab 53,32 C
61,86 (V3)	ab 48,93 A	b 53,96 AB	b 51,70 AB	b 54,65 B
82,83 (V4)	b 53,58 A	b 52,23 A	b 55,52 A	ab 51,39 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A concentração de CO₂ não teve efeito significativo nos tratamentos irrigados com volume de água V4. Nos tratamentos V1, V2 e V3, o diâmetro do fruto foi maior no ambiente C1, diferindo-se significativamente dos demais ambientes em que as plantas foram irrigadas com volume de água V2. Para o volume V1, o diâmetro dos frutos apresentou diferença significativa entre os ambientes C1 e C2 e, para o volume V3, ocorreu diferença significativa entre os ambientes C1 e C4.

Na Tabela 16 estão apresentados os diâmetros médios dos frutos, medidos na segunda colheita, e verifica-se que os mesmos foram menores do que na primeira colheita, em todas as concentrações de CO₂ e tratamentos que receberam volume de água V1. Houve efeito significativo do volume de água aplicado entre V1 e V3 nos ambientes C4, C3 e C1 e, entre os volumes V1 e V2 nos ambientes C2 e C1.

O maior diâmetro dos frutos ocorreu no ambiente C1 com volume de água V2, e diferiu significativamente dos diâmetros obtidos nos ambientes C2, C3 e C4. Embora não tenham diferenças significativas, os maiores valores de diâmetro de frutos nos tratamentos V3 e V4, foram verificados no ambiente C4.

Tabela 16. Médias de diâmetro de fruto (mm) da segunda colheita para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ (μmol.mol⁻¹).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 46,56 A	a 42,60 A	a 47,67 A	a 47,27 A
40,70 (V2)	a 50,34 A	ab 51,33 A	b 53,76 A	c 59,76 B
61,86 (V3)	b 59,19 A	b 54,96 A	b 55,97 A	bc 54,74 A
82,83 (V4)	b 55,58 A	b 54,81 A	ab 52,38 A	ab 51,40 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A análise de regressão aplicada aos dados de diâmetro médio dos frutos, para a primeira e a segunda colheita, mostrou que o modelo com termos quadráticos para volume de água aplicado e linear para concentração de CO₂, foi o que melhor descreveu o fenômeno, para os intervalos estudados, embora com baixo coeficiente de determinação. Foram obtidos os seguintes modelos:

$$Df1 = 36,1174 + 0,0034C + 0,3628V - 0,0022V^2 \quad R^2 = 0,5197$$

$$Df2 = 4,7872 + 0,0186C + 1,4783V - 0,01V^2 - 0,0003V.C \quad R^2 = 0,6889$$

em que Df1 e Df2 são, respectivamente, o diâmetro médio dos frutos da primeira e da segunda colheita, em mm. No modelo referente à primeira colheita, a constante foi significativa ao nível de 5% probabilidade e os coeficientes das variáveis independentes não foram significativos. Já para o modelo relativo à segunda colheita todos os coeficientes foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

4.2.6.3 Espessura de polpa

A espessura de polpa, referentes à primeira colheita, foi influenciada tanto pelo volume de água aplicado quanto pela concentração de CO₂ (Tabela 17). O aumento do volume de água promoveu aumento na espessura da polpa. Nos ambientes com enriquecimento de CO₂ e volume de água aplicado V1, V2 e V3, a espessura da polpa foi maior do que no ambiente C4, embora, em alguns casos, a diferença não tenha sido significativa. Nos tratamentos que receberam maior volume de água (V4), a concentração de CO₂ não teve efeito sobre a espessura da polpa.

Tabela 17. Médias de espessura de polpa (mm) dos frutos da primeira colheita, para as diferentes combinações de volume de água aplicado (litros) e concentração de CO₂ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Volume de água aplicado	Concentração de CO ₂			
	367 (C4)	600 (C3)	800 (C2)	1000 (C1)
30,89 (V1)	a 2,69 A	a 2,93 B	a 3,2 C	a 3,18 C
40,70 (V2)	b 3,03 A	ab 3,10 A	b 3,44 B	b 3,47 B
61,86 (V3)	bc 3,18 A	c 3,37 AB	ab 3,33 AB	ab 3,38 B
82,83 (V4)	c 3,32 A	bc 3,32 A	b 3,40 A	ab 3,40 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade;

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

De acordo com Melo (1997), a espessura da polpa é um caráter de grande importância porque está diretamente relacionada à qualidade do fruto e à produtividade. Polpa grossa apresenta três vantagens principais: (a) frutos mais pesados, podendo ser comercializados por peso e não por volume; (b) maior conservação pós-colheita, pois o murchamento é menos acentuado; e (c) maior firmeza do fruto. O autor verificou, em 30 híbridos triplos, que a espessura da polpa variou de 3,83 a 5,1 mm, contra 3,9 mm do híbrido simples Magali. Medeiros (1998) relata que a espessura da polpa não foi afetada pela salinidade da água e nem pela lâmina relativa de irrigação, apresentando uma média de 4,6 mm. Já Pereira (1995), trabalhando com pimentão, verificou que a lâmina de água

aplicada afetou significativamente a espessura da polpa, obtendo um valor médio de 5,4 mm para o tratamento mais irrigado e 2,5 mm para o tratamento com menor lâmina.

A análise de regressão aplicada aos dados médios de espessura de polpa indica que o modelo descreveu bem o fenômeno, para o intervalo considerado, com um coeficiente de determinação de 0,8142. Todos os coeficientes do modelo foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de t, sendo a equação de regressão representada por:

$$Ep = 1,4094 + 0,0013C + 0,0405V - 0,0002V^2 - 0,00001V.C \quad R^2 = 0,8142$$

em que, Ep é a espessura média da polpa, em mm.

Os dados de médios de espessura da polpa, dos frutos da primeira colheita, medidos e ajustados pelo modelo, estão apresentados na Figura 33.

Figura 33 – Diagrama de dispersão entre os valores médios de espessura de polpa (mm) medidos e estimados pelo modelo.

4.3 Considerações finais

O híbrido simples zarco, desenvolvido pela Rogers NK, EUA, é recomendada para cultivo em ambiente protegido e apresenta frutos retangulares, medem de 12 a 14cm de comprimento, 8 a 9cm de diâmetro (ou largura), peso entre 240 e 260 gramas e são amarelos quando maduros (Tivelli, 1998). De acordo com Melo (1997), a colheita inicia-se entre 130 e 150 dias após a sementeação e as plantas são altas, vigorosas e resistentes ao vírus do Mosaico do Fumo (TMV), vírus Y da Batata (PVY) e ao vírus do Tabaco (TEV).

Conforme se constatou pelos resultados experimentais, o comprimento, o diâmetro e o peso dos frutos foram inferiores aos característicos da cultivar e a altura da planta também não correspondeu à descrição acima citada. Esta tendência foi igual para toda as plantas do experimento e, portanto, não deve ser atribuído a efeitos causados pelos tratamentos de irrigação e/ou concentração de CO₂. Vários fatores podem ter induzido à formação de frutos pequenos e plantas baixas, dos quais podem ser considerados, como mais importantes, o confinamento das plantas em vasos, a elevada temperatura do ar e do solo, alta intensidade de luz, períodos de baixa umidade relativa do ar e nutrição.

4.3.1 Confinamento das plantas em vasos

De acordo com Idso & Idso (1994), tem sido demonstrado que frequentemente, mas nem sempre, as plantas cultivadas em vasos apresentam desenvolvimento radicular limitado e, conseqüentemente, impede que os efeitos benéficos do enriquecimento do ambiente com CO₂ sejam manifestados. Thomas & Strain (1991) verificaram que a redução da capacidade fotossintética de plantas de algodão cultivadas em vasos, em ambiente enriquecido com CO₂, está relacionada à restrição do sistema radicular, que induz a um desbalanço entre fonte/dreno. De acordo com esses autores, algumas espécies quando submetidas a alta concentração de CO₂, por longo período de tempo (semanas ou meses), apresentam fotossíntese líquida menor do que as plantas exposta a curto período (horas ou dias). Peet (1986) verificou que o ganho

de peso de pepinos cultivados em vasos, em ambiente enriquecido com CO₂, 16 dias após a germinação, foi 83% maior no ambiente com 1000µL L⁻¹ do que no ambiente com 350µL L⁻¹ e, 43 dias após a germinação não foi observado efeito significativo em função do aumento da concentração de CO₂.

Neste trabalho, mesmo que o experimento tenha sido conduzido por um período de tempo considerado longo (169 dias), não se observaram indícios de que o volume do vaso tenha limitado o desenvolvimento radicular. Verificou-se que, mesmo no ambiente sem enriquecimento de CO₂, as plantas não apresentaram um desenvolvimento característico da cultivar, mas apresentaram peso seco de folha e caule maior do que nos ambientes com enriquecimento de CO₂. Supõe-se que o desenvolvimento vegetativo e a produção tenham sido inferiores às características da cultivar por limitações causadas por fatores ambientais. De acordo com Thomas & Strain (1991), algumas plantas podem mostrar resposta inferior quando cultivadas em ambiente enriquecido com CO₂, devido à baixa demanda dos drenos impostas por fatores genéticos ou limitações ambientais, bem como pelo período de tempo em que foi aplicado o CO₂.

4.3.2 Temperatura do ar e do solo

A temperatura média do ar oscilou entre 20 e 30°C até final de agosto e, a partir de setembro, ficou em torno de 25 e 35°C. A temperatura média mínima, até meados de agosto, foi inferior a 10°C e a média máxima variou de 35 a 40°C até final de agosto. Posteriormente, tendeu a ser maior que 40°C. De acordo com Pádua et al. (1984), sob temperaturas elevadas (21 – 27°C) há maior produção de flores, porém, pode haver maior percentagem de queda, enquanto que temperatura noturna baixa (8 – 10°C), após a antese, induz a formação de frutos deformados e com pequeno número de sementes.

A partir do mês de agosto verificou-se acentuada queda de flores, possivelmente pelo efeito da alta temperatura. Segundo Tivelli (1998), na floração a temperatura ótima é de 25°C e a máxima tolerada pela cultura é de 35°C. Portanto, na época de floração as plantas não devem ser exposta a temperatura maior que 35°C,

mesmo que seja por algumas horas. Ainda, de acordo por Acock et al. (1990), em ambientes com enriquecimento de CO₂, temperaturas acima de 35 a 40°C, danificam enzimas e causam uma queda rápida na taxa fotossintética. Neste experimento verificaram-se temperaturas superiores a esse limite durante vários dias.

Na primeira e na segunda floração não houve queda de flores, porém, os frutos desenvolvidos foram pequenos, com alto índice de frutos deformados. A partir a terceira floração, ocorrida no início de agosto, houve muita queda de flores e frutos e a colheita relativa a quarta floração somente foi realizada em outubro. Deve-se ressaltar que, além do provável efeito da temperatura, as plantas apresentavam, no início de agosto, uma média de 8 frutos por planta. Há de se considerar que, para o porte das plantas, talvez esta carga de frutos tenha sido um dreno muito forte que comprometeu o vingamento das flores e frutos subsequentes, bem como o desenvolvimento vegetativo, pois, entre 24/07 e 20/08 o crescimento da planta foi lento.

Decidiu-se medir a temperatura do solo para se tentar explicar o padrão de desenvolvimento da planta. As medidas foram realizadas em dois dias e verificou-se que a temperatura variou de 18 a 41,5°C, sendo que entre 11:00h e 19:00h, foi superior a 30°C. Observou-se, também, que não houve defasagem acentuada entre a temperatura do ar e do solo e, provavelmente, este padrão tenha sido semelhante nos demais dias do experimento. De acordo com Rylski (1972), o ápice da planta mantém o crescimento com o aumento da temperatura do solo, enquanto que as raízes têm crescimento lento sob temperatura igual ou superior a 30°C. Com base nesse relato, infere-se que o desenvolvimento do sistema radicular tenha sido afetado pela temperatura.

4.3.3 Intensidade de luz

De acordo com Schoch (1972), o pimentão é geralmente considerado como planta de sombra e o seu crescimento é pouco influenciado pelos tratamentos que visam aumentar a intensidade de luz. Devido à ocorrência de queima na superfície de alguns frutos, mediu-se a radiação solar e calculou-se a intensidade de luz dentro e fora das estufas, em dois dias. Verificou-se que a redução da intensidade de luz, pela

cobertura das estufas foi, em média, de 24%. Nos dias que foram realizadas as medições, a variação da intensidade luminosa dentro da estufa foi de 1047 Lux (19:00h) a 81600 Lux (12:00h). Foi observado por Deli & Tiessen (1969), que as plantas expostas a 8608 Lux produziram maior número de flores do que as plantas expostas à intensidade de 17216 Lux. Efeito semelhante também foi relatado por Pádua et al. (1984).

4.3.4 Umidade relativa do ar

De acordo com a literatura especializada em cultura de pimentão, a umidade relativa do ar ideal em ambiente protegido é de 50 a 70 %. Neste experimento, a umidade relativa média manteve-se nessa faixa, no entanto, nas medições realizadas às 13:00h, freqüentemente foram observados valores inferiores a 20%. De acordo com Tivelli (1998), quando a umidade relativa do ar se encontra fora da faixa ideal, um dos prejuízos causados à cultura é a diminuição no nível de polinização, resultando em abortamento de frutos ou na formação de frutos defeituosos; e, com baixa umidade relativa do ar, há uma desidratação do grão de pólen, tornando-o inviável.

4.3.5 Nutrição

Tendo-se observado um lento desenvolvimento das plantas entre 24/07 (55 DAT) e 20/08 (82 DAT), fez-se uma análise foliar para avaliar o estado nutricional e os resultados indicaram deficiência de N, P, B e Cu, sendo que a redução em relação ao limite mínimo recomendado foi de 30% para o N, 6% para o P, 48% para o B e 31% para o Cu. No final do experimento a análise foliar apresentou deficiência de K e N, em todos ambientes e tratamentos de irrigação, sendo que o K foi, em média, 50% inferior ao limite mínimo recomendado e para o N a redução variou de 0,47% a 13,53%.

Provavelmente, este também foi um dos fatores que contribuiu para o baixo desempenho das plantas, em relação às características da cultivar. Embora todos os tratamentos tenham apresentado deficiência de N e K, deve-se salientar que estudos com enriquecimento do ambiente com CO₂ e absorção de nutrientes pela planta, demonstraram que em folhas de plantas C₃ as concentrações de N e K se reduzem,

mesmo quando o fornecimento é alto (Norby et al., 1986; Hocking & Meyer, 1991; Rogers et al., 1999; Huluka et al., 1994).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a condutância estomática reduz durante o período de aplicação do gás carbônico e com a redução do volume de água aplicado;
- o potencial de água na folha foi maior nos ambientes enriquecidos com CO₂;
- o aumento da concentração de CO₂ atrasou o desenvolvimento vegetativo das plantas;
- para todos os volumes de água aplicado a área foliar e o peso seco das folhas foram menores nos ambientes com enriquecimento de CO₂;
- o enriquecimento do ambiente com CO₂ promoveu aumento na produção, sendo o maior valor observado no ambiente com 600 μmol.mol⁻¹ e volume de água aplicado de 61,86 litros;
- o enriquecimento do ambiente com CO₂ proporcionou aumento na eficiência de uso da água reduzindo o consumo de água pelas plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOCK, B.; ACOCK, M.C.; PASTERNAK, D. Interactions of CO₂ enrichment and temperature on carbohydrate production and accumulation in muskmelon leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.115, n.4, p.525-529, 1990.
- ALLEN, L. H.; VU, J. C. V.; VALLE, R. R.; BOOTE, K. J.; JONES, P. H. Nonstructural carbohydrates and nitrogen of soybean under carbon dioxide enrichment. **Crop Science**, v.28, n.1, p.84-94, 1988.
- ALVINO, A. ; CENTRITTO, M.; DE LORENZI, F. Photosynthesis response of sunlit and shade pepper (*Capsicum annuum*) leaves at different positions in the canopy under two water regimes. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.21, n.3, p. 377-391, 1994.
- BARON, J. J.; GORSKI, S. F. Response of eggplant to a root environment enriched with CO₂. **HortScience**, v.21, n.3, p.495-498, 1986.
- BAZZAZ, F. A. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.21, p.167-196, 1990.
- BAZZAZ, F. A.; GARBUTT, K.; REEKIE, E. G.; WILLIAMS, W. E. Using growth analysis to interpret competition between a C₃ and a C₄ annual under ambient and elevated CO₂. **Oecologia**, v.79, n.2, p.223-235, 1989.
- BEESE, F.; HORTON, R.; WIERENGA, P. J. Growth and yield response of chile pepper to trickle irrigation. **Agronomy Journal**, v.74, n.3, p.556-61, 1982.

- BRAGA, M. B. Manejo da irrigação e orientação geográfica de estufas na produção do pimentão (*Capsicum annuum* L.). Botucatu, 2000. 89p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- BRAVDO, B. A. Effect of CO₂ enrichment on photosynthesis of C₃ plants. In: ENOCH, H. Z.; KIMBALL, B. A. (Ed.) **Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops**. Boca Raton: CRC Press, 1986. v.2: Physiology, yield and economics, cap.2, p.13-27.
- CAIXETA, T. J.; BERNARDO, S.; CASALI, V. W. D.; OLIVEIRA, L. M. Efeito da lâmina de água e da frequência de irrigação por gotejamento na cultura de pimentão. I – Produção de frutos maduros. **Revista Ceres**, v. 278, n. 155, p. 40-51, 1981.
- CALVERT, A., SLACK, G. Effect of carbon dioxide enrichment on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. I. Response to controlled concentrations. **Journal of Horticultural Science**, v.50, n. 1, p. 61-71, 1975.
- CAPORN, S. J. M. The effects of acids of nitrogen and carbon dioxide enrichment on photosynthesis and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L). **New Phytologist**, v.111, n.3, p.473-481, 1989.
- CASELLA, E.; SOUSSANA, J. F.; LOISEAU, P. Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. **Plant and Soil**, v.182, n.1, p.83-94, 1996.
- CENTRITO, M.; LEE, H. S. J.; JARVIS, P. G. Interactive effects of elevated CO₂ and drought on cherry (*Prunus avium*) seedlings. I. Growth, whole-plant water use efficiency and water loss. **New Phytologist**, v.141, n.1, p.129–140, 1999.
- CHMORA, S. N.; MOKRONOSOV, A. T. The global increase of CO₂ in atmosphere: adaptive strategies in plants. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.41, n.5, p.768–778, 1994.
- COMPANHIA DE ENTREPÓSITOS E ARMAZÉNS GERAIS DE SÃO PAULO. **Programa Horti & Fruti Padrão**: classificação de pimentão; programa de adesão voluntária. São Paulo, 1998. 1v.

- CONROY, J. P. Influence of elevated atmospheric CO₂ concentration on plant nutrition. **Australian Journal of Botany**, v.40, n.4,5, p.445–456, 1992.
- CONROY, J.; HOCKING, P. Nitrogen nutrition of C₃ plants at elevated atmospheric CO₂ concentrations. **Physiologia Plantarum**, v.83, n.3, p.570–576, 1993.
- CORREIA, L. G. Colheita, rendimento, classificação, embalagem e comercialização de pimentão e pimenta. **Informe Agropecuário**, v.10, n.113, p.70–72, 1984.
- CURTIS, P. S.; BALDUMAN, L. M.; DRAKE, B. G.; WHIGHAM, D. F. Elevated atmospheric CO₂ effects on below ground process in C₃ and C₄ stuarine marsh communities. **Ecology**, v.71, n.5, p.2001–2006, 1990.
- D'ANDRIA, R.; NOVERO, R.; SMITH, D. H.; SHANAHN, J. F.; MOORE, F. D. Drip irrigation of tomato using carbonated water and mulch in Colorado. **Acta Horticulturae**, v.1, n.278, p.171–178, 1990.
- DELI, J.; TIESSEN, H. Interaction of temperature and light intensity on flowering of *Capsicum frutescens* var. *grossum*, cv. California Wonder. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.94, n.4, p.349, 1969.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H. R. Gheyi et.al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 33).
- DURÃO, P. L.; GALVÃO, A. C. Gás Carbônico em irrigação: tecnologia de ponta para aumentar a produtividade e qualidade dos produtos agrícolas. **Ciência Hoje**, v.19, n.110, p.12–15, 1995.
- ENOCH, H.; RYLSKI, I.; SAMISH, Y. CO₂ enrichment to cucumber, lettuce and sweet peper plants grown in low tunnels in subtropical climate. **The Israel Journal of Agricultural Research**, v.20, n.2, p.63–69, 1970.
- ENOCH, H.; RYLSKI, I.; SPIGELMAN, M. CO₂ enrichment of strawberry and cucumber plants grown in unheated greenhouses in Israel. **Scientia Horticulturae**, v.5, n.1, p.33–41, 1976.

- FERNANDES, P. D. Estudo de nutrição mineral do pimentão (*Capsicum annuum* L.) variedades Avelar e Ikeda. Absorção e deficiência de macronutrientes. Piracicaba, 1971. 85p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- FERREYRA, R.; SELLÉS, G.; GONZALÉZ, P. Efecto de diferentes alturas de agua sobre el cultivo del pimiento (*Capsicum annuum*). II. Relación agua-rendimiento. **Agricultura Tecnica**, v.45, n.3, p.235–239, 1985.
- FILGUEIRA, F. A. R. **Manual de olericultura**: cultura e comercialização de hortaliças. São Paulo: Agronômica Ceres, 1982. V.2, 357p.
- FLAVIN. C. **World carbon emission fall**. <http://www.worldwatch.org/worldwatch/newsbrief>. (Maio, 1999).
- FONTES, P. C. R.; MONNERAT, P. H. Nutrição mineral e adubação das culturas de pimentão e pimenta. **Informe Agropecuário**, v.10, n.113. p.25–30, 1984.
- FRIZZONE, J. A. ., PAZ, V. P. S.; PEREIRA, E. C.; SAAD, J. C. C. Produtividade de pimentão amarelo (*Capsicum annuum*, L.) sob diferentes potenciais matriciais de água no solo (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., Campina Grande, 1997. **Resumos**. Campina Grande: SBEA. 1997.
- GIFFORD, R. M. Growth and yield of CO₂ enriched wheat under water-limited conditions. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.6, n.3, p.367–378, 1979.
- GIL, O. F. Água e adubação na cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.) irrigada por gotejamento. Piracicaba, 1987. 45p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- GOTO, R.; ROSSI, F. **Cultivo de pimentão em estufa**: manual. Viçosa: C.P.T., 1997. 66p.
- GRANT, R. F.; WALL, G. W.; KIMBALL, B. A.; FRUMAU, K. F. A.; PINTER JR, P. J.; HUNSALER, R. L.; LAMORTE, R. L. Crop water relations under different CO₂ and irrigation: testing of *ecosys* with the free air CO₂ enrichment (FACE) experiment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.95, n.1, p.27–51, 1994.

- GURI, S.; MARFA, O.; SAVÉ, R. **Efecto de la irrigación carbónica en la producción de un cultivo de pimiento**. Barcelona: IRTA, Departamento de Tecnología Hortícola, 1999. 6p.
- HAAG, H. P.; HOMA, P.; KIMOTO, T. Nutrição mineral de hortaliças. V: Absorção de nutrientes pela cultura do pimentão. **O Solo**, v.60, n.2, p.7–11, 1970.
- HALL, D. O; RAO, K. K. **Fotossíntese**. São Paulo: EDUSP, 1980. 88p. (Temas de Biologia)
- HAM, J. M.; OWENSBY, C. E.; COYNE, P.; BREMER, D. J. Fluxes of CO₂ and water vapor from a prairie ecosystem exposed to ambient and elevated atmospheric CO₂. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.77, n.1/2, p.73–93, 1995.
- HARTZ, T. K. Water management in drip-irrigated vegetable production. **HortTechnology**, v.6, n.3, p.165–167, 1996.
- HEIG, G.; UFFELEN, J. A. M. van,. Effects of CO₂ concentration on growth of glasshouse cucumber. **Acta Horticulturae**, n.162, p.29–36, 1984.
- HOCKING, P. J.; MEYER, C. P. Effects of CO₂ enrichment and nitrogen stress on growth, and partitioning of dry matter and nitrogen in wheat and maize. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.18, n.4, p.339–356, 1991.
- HULUKA, G.; HILEMAN, D. R.; BISWAS, P. K.; LEWIN, K. F.; NAGY, J.; HENDRY, G. R. Effects os elevated CO₂ and water stress on mineral concentration of cotton. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.70, n.1/4, p.141–152, 1994.
- HUNSAKER, D. J.; KIMBALL, B. A.; PINTER JR., P. J.; WALL, G. W.; LAMORTE, R. L.; ADAMSEN, F. J.; LEAVITT, S. W.; THOMPSON, T. L.; MATHIAS, A. D.; BROOKS, T. J. CO₂ enrichment and soil nitrogen effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.104, n.2, p.85–105, 2000.
- IDSO, S. B.; KIMBALL, B. A. WALL, G. W.; GARCIA, R. L.; LAMORTE, R.; PINTER, P. J.; MAUNEY, J. R.; HENDREY, G. R.; LEWIN, K.; NAGY, J. Effects of free-air CO₂ enrichment on the light response curve of net photosynthesis in cotton leaves. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.70, n.1/4, p.183–188, 1994.

- IDSO, K. E.; IDSO, S. B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.69, n.3/4, p.153-203, 1994.
- ISLAM, S.; MATSUI, T.; YOSHIDA, Y. Effect of carbon dioxide enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity. **Scientia Horticulturae**, v.65, n.2/3, p.137-149. 1996.
- KEELING, C. D.; WHORF, T. P. **Atmospheric CO₂ concentrations (ppmv) derived from in situ air samples collected at Mauna Loa Observatory, Hawaii**. <http://www.cdiac.esd.ornl.gov/ndps/nd001.html>. (maio, 1999).
- KIMBALL, B. A. CO₂ stimulation of growth and yield under environmental restraints. In: ENOCH, H. Z.; KIMBALL, B. A. (Ed.) **Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops**. Boca Raton: CRC Press, 1986. v.2: Physiology, yield and economics, cap.5, p.53-67.
- KIMBALL, B. A. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. **Agronomy Journal**, v.75, n.5, p.779-788, 1983.
- KIMBALL, B. A.; IDSO, S. B. Increase atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use, and climate. **Agricultural and Water Management**, v.7, n.1. p.55-73, 1983.
- KIMBALL, B. A.; MITCHELL, S. T. Tomato yields from CO₂ enrichment in unventilated and conventionally ventilated greenhouses. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.104, n.4, p.515-520, 1979.
- KIMBALL, B. A.; LAMORTE, R. L.; SEAY, R. S.; PINTER, P. J.; ROKEY, R. R.; HUNSAKER, D. J.; DUGAS, W. A.; HEUER, M. L.; MAUNEY, J. R.; HENDREY, G. R.; LEWIN, K. F.; NAGY, J. Effects of free air CO₂ enrichment on energy balance and evapotranspiration of cotton. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.70, n.1/4, p.259-278, 1994.
- KÖRNER, C.; ARNONE III. J. A. Response to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. **Science**, v.257, n.5077, p.1672-1675, Sept. 1992.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.

- MARTINS, G.; CASTELLANE, P. D.; VOLPE, C. A. Influência da casa de vegetação nos aspectos climáticos e em épocas de verão chuvoso. **Horticultura Brasileira**, v.12, n.2, p.131–234, 1994.
- MEDEIROS, J. F. de. Manejo da água de irrigação salina em estufa cultivada com pimentão. Piracicaba, 1998. 152p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- MELO, A. M. T. de. Análise genética de caracteres de fruto em híbridos de pimentão. Piracicaba, 1997. 112p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- MEYER, W. S.; GREEN, G. C. Comparison of stomatal action of orange, soybean and wheat under field conditions. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.8, n.1, p.65–76, 1981.
- MILLER, C. H.; McCOLLUM, R. E. ; CLAIMON, S. Relationships between growth of bell peppers and nutrient accumulation during ontogeny in field environments. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.104, n.6, p.852–857, 1979.
- MINAMI, K. Pesquisa em plasticultura no Brasil. In: ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS AGRÔNOMOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Programa de plasticultura para o Estado de São Paulo**. São Paulo, 1995. 109p.
- MOORE, P. D. How do plant cope when they live in the shade? **Nature**, v.349, n.6304, p.22, 1991.
- MORISON, J. I. L.; GIFFORD, R. M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations. I. Leaf area, water use and transpiration. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.11, n.5, p.361–374, 1984a.
- MORISON, J. I. L.; GIFFORD, R. M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations. II. Plant dry weight, partitioning and water use efficiency. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.11, n.5, p.375–384, 1984b.
- MORTENSEN, L. M. Review: CO₂ enrichment in greenhouses. **Crop Response. Scientia Horticulturae**, v.33, n.1/2, p.1–25, 1987.

- MORTENSEN, L. M.; MOE, R. Growth responses of some greenhouse plants to environment. VI. Effect of CO₂ and artificial light on growth of *chrysanthemum morifolium* ramat. **Scientia Horticulturae**, v.19, n.1/2, p.141–147, 1983.
- MORTENSEN, L. M.; ULSAKER, R. Effect of CO₂ concentration and light levels on growth flowering and photosynthesis of *begonia x hiemalis* Fotoch. **Scientia Horticulturae**, v. 27, n.1/2, p.133–141, 1985.
- MUDRICK, V. A.; ROMANOVA, A. K.; IVANOV, B. N.; NOVICHKOVA, N. S.; POLYAKOVA, V. A. Effects of increased CO₂ concentration on growth, photosynthesis, and composition of *Pisum sativum* L. planta. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.44, n.2, p.165–171, 1997.
- NANNETTI, D. C.; SOUZA, R. J. **A cultura do pimentão**. Lavras: UFLA, 1998. 53p. (Boletim Técnico: Série Extensão).
- NEDERHOFF, E. M. Effects of CO₂ on greenhouse grown eggplant (*Solanum melongena* L.) I. Leaf conductance. **Journal of Horticultural Science**, v.67, n.6, p.795-803, 1992.
- NEDERHOFF, E. M.; DE GRAAF, R. Effects of CO₂ on leaf conductance and canopy transpiration of greenhouse grown cucumber and tomato. **Journal of Horticultural Science**, v.68, n.6, p.925–937, 1993.
- NEDERHOFF, E. M.; RIJSDIJK, A. A.; GRAAF, R. de. Leaf conductance and rate of crop transpiration of greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. **Scientia Horticulturae**, v.52, n.4, p.283–301, 1992.
- NEGREIROS, M. Z. de. Crescimento, partição de matéria seca, produção e acúmulo de macronutrientes de plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em cultivo podado e com cobertura morta. Piracicaba, 1995, 187p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- NILWIK, H. J. M. Photosynthesis of whole sweet pepper plants 2. Response to CO₂ concentration, irradiance and temperature as influenced by cultivation conditions. **Photosynthetica**, v.14, n.3, p.382–391, 1980.

- NORBY, R. J.; O'NEILL, E. G.; LUXMOORE, R. J. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on the growth and mineral nutrition of *Quercus alba* seedlings in nutrient-poor soil. **Plant Physiology**, v.82, n.1, p.83–89, 1986.
- PÁDUA, J. G. Aspectos climáticos na cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.). In: MULLER, J. J. V.; CASALI, V. W. D. **Seminários de olericultura**. 2.ed. Viçosa: UFV, 1982. v.2, p.387-413.
- PÁDUA, J. G. de; CASALI, V. W. D.; PINTO, C. M. F. Efeitos climáticos sobre pimentão e pimenta. **Informe Agropecuário**, v.10, n.113, p.31-34, 1984.
- PAEZ, A.; HELLMERS, H.; STRAIN, B. R. Carbon dioxide enrichment and water stress interaction on growth of two tomato cultivars. **Journal of Agricultural Science**, v.102, n.3, p.687–693, 1984.
- PEET, M. M. Acclimation to high CO₂ in monoecious cucumbers. I. Vegetative and reproductive growth. **Plant Physiology**, v.80, n.1, p.59–62, 1986.
- PELLITERO, M.; PARDO, A.; SIMÓN, A.; SUSO, M. L.; CEROLAZA, A. Effect of irrigation regimes on yield and fruit composition of processing pepper (*Capsicum annuum* L.). **Acta Horticulturae**, v.335, n.23/27, p.257–263, 1993.
- PEÑUELAS, J.; BIEL, C.; ESTIARTE, M. Growth, biomass allocation, and phenology response of pepper to elevated CO₂ concentrations and different water and nitrogen supply. **Phosynthetica**, v.31, n.1, p.91–99, 1995a.
- PEÑUELAS, J.; BIEL, C.; SAVÈ, R.; ESTIARTE, M. Detrimental effects of fluctuating high CO₂ concentrations on peppers. **Phosynthetica**, v.31, n.3, p.361–370, 1995b.
- PEREIRA, E. C. Avaliação do crescimento e da produtividade de pimentão amarelo (*Capsicum annuum* L.) sob diferentes potenciais matriciais de água no solo, em condições de casa de vegetação. Botucatu, 1995. 61p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: Edur. 1998. 159p.

- PINTO, J. M. Aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação em meloeiro. Piracicaba, 1997. 85p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- POLOWICK, P. L.; SAWHNEY, V. K. Temperature effects on male fertility and flower and fruit development in *Capsicum annuum* L. **Scientia Horticulturae**, v.25, n.2, p.117-127, 1985.
- PUTKHAL'SKAYA, N. V. Generative development of barley at an elevated atmospheric concentration of CO₂ and varying temperature conditions. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.44, n.2, p.177-182, 1997.
- RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. **Carta de solos do Município de Piracicaba**. Piracicaba: ESALQ, 1966. 85p.
- RASCHKE, K. The influence of the CO₂ content of the ambient air on stomatal conductance and the CO₂ concentration in leaves. In: ENOCH, H. Z.; KIMBALL, B. A. (Ed.) **Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops**. Boca Raton: CRC Press, 1986. v.2: Physiology, yield and economics. cap.7, p.87-103.
- REINART, R. A.; EASON, G.; BARTON, J. Growth and fruiting of tomato as influenced by elevated carbon dioxide and ozone. **New Phytologist**, v.137, n.3, p.411-420, 1997.
- RETUERTO, R.; WOODWARD, F. I. The influences of increased CO₂ and water supply on growth, biomass allocation and water use efficiency of *sinapis alba* L. grown under different wind speeds. **Oecologia**, v.94, n.3, p.415-427, 1993.
- ROBLEDO, F. P.; MARTIN, L. V. **Aplicación de los plasticos en la agricultura**. Madrid: Mundi-Prensa, 1988. 267p.
- ROGERS, G. S.; MILHAM, P. J.; THIBAUD, M. C.; CONROY, J. P. Interactions between rising CO₂ concentration and nitrogen supply in cotton. I. Growth and leaf nitrogen concentration. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.23, n.2, p.119-125, 1996.
- RUSSO, D. Leaching and water requirement studies in a gypiferous desert soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, n.2, p.432-437, 1985.

- RYSLKI, I., SPIGELMAN, M. Effects of different diurnal temperature combination on fruit set of sweet pepper. **Horticultural Abstract**, v.52, n.9, p.588, 1972.
- SCHAFFER, B.; WHILEY, A. W.; SEARLE, C. Atmospheric CO₂ enrichment, root restriction, photosynthesis, and dry-matter partitioning in subtropical and tropical fruit crops. **HortScience**, v.34, n.6, p.1033–1037, 1999.
- SCHOCH, P. G. Effects of shading on structural characteristics of the leaf and yield of fruit in *Capsicum annuum* L. **The Journal of the America Society for Horticultural Science**, v.97, n.4, p.446–464, 1972.
- SENTELHAS, P. C. Estimativa diária de evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática. Piracicaba, 1998. 97p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SHAER, Y. A.; VAN BAVEL, C. H. M. Relative role of stomatal and aerodynamic resistances in transpiration of a tomato crop in a CO₂ enriched greenhouse. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.41, n.1/2, p.77–85, 1987.
- SILVA, M. A. G. da. Efeito do nitrogênio e potássio na produção e nutrição do pimentão em ambiente protegido. Piracicaba, 1998. 86p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- STANEV, V. P.; TSONEV, T. D. CO₂ enrichment in some countries of Eastern Europe: Research and practical application. In: ENOCH, H. Z.; KIMBALL, B. A. (Ed.) **Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops**. Boca Raton: CRC Press, 1986. v 1: Status and CO₂ sources, cap.3, p.35–48.
- STORLIE, C. A.; HECKMAN, J. R. Bell pepper yield response to carbonated irrigation water. **Journal of Plant Nutrition**, v.19, n.10/11, p.1477–1484, 1996.
- TEODORO, R. E. F.; OLIVEIRA, A. S.; MINAMI, K. Efeitos da irrigação por gotejamento na produção de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em casa de vegetação. **Scientia Agricola**, v.50, n.2, p.327–343, 1993.
- THOMAS, R. B.; STRAIN, B. R. Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. **Plant Physiology**, v.96, n.2, p.627–634, 1991.

- TIVELLI, S. W. A cultura do pimentão. In: GOTO, R.; TIVELLI, S. W. (Org.) **Produção de Hortaliças em ambiente protegido: condições subtropicais**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. 319p.
- TOLLEY, L. C.; STRAIN, B. R. Effects of CO₂ enrichment and water stress on gas exchange of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* seedlings grown under different irradiance levels. **Oecologia**, v.65, n.2, p.166–172, 1985.
- TURNER, N. C.; BEGG, J. E.; RAWSON, H. M.; ENGLISH, S. D.; HEARN, A. B. Agronomic and physiological response of soybean and sorghum crops to water deficits III. Components of leaf water potential, leaf conductance, ¹⁴CO₂ photosynthesis, and adaptation to water deficits. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.5, n.2, p.179–194, 1978.
- VECCHIA, P. T. D.; KOCH, P. S. História e perspectiva da produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil. **Informe Agropecuário**, v.20, n.200/201, p.5–10, 1999.
- VILLA NOVA, N. A.; SANTIAGO, A. V.; REZENDE, F. C. **Energia solar: aspectos físicos e de captura pela biomassa**. Piracicaba: ESALQ, 2001. 20p.
- WIERENGA, P. J.; SADIQ, M. H. Optimum soil water tension for trickle irrigated chile peppers. In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE IRRIGATION CONGRESS, 3., Fresno, 1985. **Proceedings**. Fresno: ASAE. 1985. p.193–197.
- WITTWER, S. H. World wide status and history of CO₂ enrichment –an overview. In: ENOCH, H. Z.; KIMBALL, B. A. (Ed.) **Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops**. Boca Raton: CRC Press, 1986. v. 1: Status and CO₂ sources, cap.1, p.3–15.
- YELLE, S.; JR. BEESON, R. C.; TRUDEL, M. J.; GOSSELIN, A. Duration of CO₂ enrichment influences growth, yield, and gas exchange of tomato species. **The Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.115, n.1, p.52–57, 1990.
- ZARBI, A. W.; BURRAGE, S. W. The effects of vapour pressure deficit (VPD) and enrichment with CO₂ on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) os sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grown by NFT. **Acta Horticulturae**, v.458, p.351–356, 1998.

ZISKA, L. H.; TERAMURA, A. H. Intraspecific variation in the response of rice (*oriza sativa*) to increased CO₂ – photosynthetic, biomass and reproductive characteristics. **Physiologia Plantarum**, v.84, n.2, p.269–276, 1992.