

USO DE DIÓXIDO DE CARBONO NA AGRICULTURA

USE OF CARBON DIOXIDE IN AGRICULTURE

José Maria Pinto¹ Tarlei Arriel Botrel² Eduardo Caruso Machado³

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

RESUMO

O ciclo do carbono na biosfera tem sido significativamente alterado pela atividade do homem nos últimos 150 anos. O CO₂ emitido pela atividade humana é da ordem de 8,5 bilhões de toneladas anuais, como consequência a concentração de CO₂ atmosférico está aumentando. Estudos relacionando os efeitos do aumento artificial da concentração de CO₂ nas plantas para obtenção de produtos em maior quantidade e melhor qualidade permitem conhecer a capacidade das plantas de adaptarem-se a esses ambientes. No entanto, fatores relacionados à aplicação de dióxido de carbono necessitam de estudos ecofisiológicos mais detalhados referentes às trocas de CO₂.

Palavras-chave: dióxido de carbono, fotossíntese, qualidade de fruto.

SUMMARY

The carbon cycle in the biosphere has been significantly altered by man's activities in the last 150 years. The CO₂ emitted by human activity is approximately 8.5 billion of tons yearly, as a consequence, the carbon dioxide concentration is increasing. Studies related to the artificial increase effects of CO₂ concentration on plants used for obtaining products in greater quantity and with a better quality permit us to know the capacity of the plants to adapt in this environment. Therefore, factors related to the application of carbon dioxide need more accurate studies concerning to carbon dioxide changes.

Key words: carbon dioxide, photosynthesis, fruit quality.

INTRODUÇÃO

A concentração de CO₂ atmosférico tem sido significativamente alterada, pois era

250 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar antes da revolução industrial, atingiu 350 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar em 1989 (LONG, 1991), estando, atualmente, próximo de 365 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar, com tendência em aumentar (KEELING *et al.*, 1995). Continuando essa tendência de aumento, pode chegar a 530 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar por volta de 2050 (CASELLA *et al.*, 1996). Com esse aumento da concentração de dióxido de carbono, a temperatura global pode aumentar 4°C até o ano de 2100, porém simulações mostram que o aumento de temperatura pode ser menor, em torno de 0,2°C por década, devido à ação de resfriamento provocada por aerossóis sulfatados (MITCHELL *et al.*, 1995).

Atualmente, o dióxido de carbono emitido pela atividade humana é da ordem de 8,5 bilhões de toneladas anuais, sendo que apenas metade desse total permanece na atmosfera. A outra metade estima-se que seja incorporada pelo solo, florestas (Vitousek, 1991) e oceanos, cujos mecanismos ainda não são completamente esclarecidos (AIKEN *et al.*, 1991).

A modernização da produção agrícola tem na adoção de tecnologia instrumento para minimizar os efeitos dos fatores que limitam o processo fisiológico das culturas, aumentando a produtividade, reduzindo os custos de produção e melhorando a qualidade do produto. Entre as novas técnicas, uma promissora é o uso de dióxido de carbono misturado

¹Engenheiro Agrícola, Doutor, Pesquisador Embrapa Semi-Árido, CP 23, 56300-970 Petrolina, PE. E-mail: jmpinto@cpatsa.embrapa.br. Autor para correspondência.

²Engenheiro Agrícola, Doutor, Professor Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP. Piracicaba, SP.

³Engenheiro Agrônomo, Doutor, Pesquisador IAC, Campinas, SP. Bolsista CNPq.

à água de irrigação que está sendo adotado em culturas intensivas, com maior adensamento de plantas por área.

A aplicação de gás carbônico nas culturas melhora o metabolismo e o equilíbrio hormonal nas plantas, aumenta a fotossíntese e a absorção de nutrientes, resultando em plantas mais produtivas, mais resistentes a doenças e ao ataque de pragas, gerando frutos de melhor qualidade (KIMBALL *et al.*, 1994).

A técnica de aplicação de gás carbônico já é praticada por agricultores europeus há mais de cem anos. Inicialmente, eles costumavam queimar querosene e propano nas estufas para aumentar a concentração de dióxido de carbono, mas as impurezas produzidas no processo contaminavam as plantas. Atualmente, o dióxido de carbono é ainda obtido por combustão, mas é purificado e engarrafado por indústrias. Além disso, foram desenvolvidos equipamentos e técnicas adequados para sua aplicação em diversas condições climáticas e de plantio. Na Europa, o gás carbônico é aplicado dentro de estufas. O dióxido de carbono pode, também, ser dissolvido na água e levado às plantas por irrigação (KIMBALL, 1983).

No final dos anos 80, empresas norte-americanas que comercializavam gás carbônico para indústrias interessaram-se pelo processo na atividade agrícola e iniciaram trabalhos com injeção de gás carbônico na água utilizada para irrigação, em culturas a céu aberto, visando a aumentar a sua produtividade com resultados promissores (IDSO & IDSO, 1994).

No Brasil, a aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação é de uso recente e poucos são os estudos ecofisiológicos referentes às trocas de CO₂ em plantas. Existem, ainda, aspectos a esclarecer com relação aos efeitos sobre as plantas, estudando a influência da aplicação de CO₂ na produtividade e na melhoria da qualidade de frutos. Também é necessário definir doses e períodos de aplicação de CO₂ mais adequados para as diferentes culturas, visando maximizar a relação custo/benefício.

EFEITO DO DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE AS PLANTAS

A produção agrícola é o resultado da ação integrada da planta e dos estímulos do meio ambiente. Cabe ao solo fornecer as condições necessárias ao desenvolvimento das plantas, incluindo água e nutrientes. À planta cabe contribuir com o potencial genético, enquanto da atmosfera provêm o calor, o O₂ e o CO₂ entre outros.

Estudos relacionados aos efeitos causados pelo aumento da concentração de CO₂ sobre as

plantas são interessantes por dois aspectos (MUDRIK *et al.* 1997). Primeiro, cultivar plantas em casa de vegetação, com aumento artificial da concentração de dióxido de carbono, está sendo usado para obtenção de produtos em maior quantidade e melhor qualidade; segundo, estudar o desempenho das plantas em ambientes com elevada concentração de dióxido de carbono, uma vez que a concentração atmosférica está aumentando, possibilitando conhecer a capacidade das plantas de adaptarem-se a esses ambientes. 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 ínfima e lenta, o que permite às plantas alterações de desempenho e até adaptações genéticas para altas produções em tais ambientes (CHMORA & MOKRONOSOV, 1994).

O papel da hidrosfera no mecanismo de absorção de CO₂ atmosférico é vital, pois esta cobre sete décimos da superfície da terra. As águas oceânicas superficiais mostram incremento de 1 μmol de CO₂.kg⁻¹.d de água.ano⁻¹ em relação ao dióxido de carbono total (GUIMARÃES, 1995).

Um dos primeiros trabalhos sobre aplicação de CO₂ na agricultura foi publicado em 1918 por Cummings & Jones, citado por MOORE (1990). A aplicação de dióxido de carbono vem sendo utilizada em casa de vegetação para acelerar o crescimento e incrementar a produtividade das culturas.

Em condições de campo, a aplicação de dióxido de carbono pode ser viável em culturas com sistema de irrigação implantado e em funcionamento, em cultivos de alto valor econômico, porte baixo e culturas com grande densidade foliar. Irrigação com aplicação de CO₂ dissolvido na água de irrigação aumenta a sua concentração tanto no micro-ambiente das plantas quanto no ar do solo. Na zona do sistema radicular, maior concentração de dióxido de carbono provoca aumento na concentração de bicarbonato na solução do solo, alterando as atividades microbiológicas e o pH, influenciando na absorção de nutrientes pelas raízes das plantas (MOORE, 1990).

Diferentes espécies de plantas reagem de forma distinta em ambientes com alta concentração de dióxido de carbono. O teor de nitrogênio aumenta, e o conteúdo de tanino nas folhas diminui e o ataque de insetos é reduzido. Larvas desenvolvem-se menos em ambientes com maior concentração de dióxido de carbono, as fêmeas são mais afetadas que os machos (TRAW *et al.*, 1996).

O efeito do dióxido de carbono é maior no verão que no inverno. No verão, verifica-se ocorrência de déficit hídrico em menor intervalo de tempo

que no inverno. Além disso, microrganismos da rizosfera das plantas segregam ácidos orgânicos que aceleram a degradação química dos minerais do solo, especialmente fósforo, tornando-os disponíveis para as plantas. Como resposta, os microrganismos também produzem hormônios que estimulam o crescimento das raízes, induzindo a produção de mais raízes laterais (BABENKO *et al.*, 1985; CASELLA *et al.*, 1996).

O enriquecimento da atmosfera com dióxido de carbono fez com que certas plantas fossem capazes de absorver nutrientes escassos com mais eficiência (NORBY *et al.*, 1986). Como a absorção desses nutrientes requer dispêndio de energia, o aumento de carboidratos disponíveis, proporcionados pela elevada concentração de dióxido de carbono, melhora o processo de absorção de nutrientes (RUFTY *et al.*, 1989).

Nos últimos 15 anos, resultados experimentais citados por SARALABIA (1997) relatam que a absorção de carbono para fotossíntese aumentou em plantas cultivadas em ambientes com concentração de CO₂ acima de 600 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar. Algumas espécies florestais aumentaram a fotossíntese em 44%. Houve, também, aumento da biomassa do sistema radicular. Com maior desenvolvimento do sistema radicular, aumenta o volume de solo para extração de água e nutrientes, reduzindo as limitações de nutrição das plantas. O incremento da biomassa do sistema radicular pode induzir maior expiração de dióxido de carbono e exudação de substâncias, estimulando as atividades microbiológicas no solo (LUO *et al.*, 1994). Segundo MUDRIK *et al.* (1997), em experimentos com curtos períodos de tempo de aplicação de dióxido de carbono no ambiente, o aumento da concentração aumentou a fotossíntese em até 52% e 29% na produção em plantas C₃. Entretanto, períodos prolongados de exposição de plantas em concentrações de dióxido de carbono acima de 1000 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar podem causar fechamento de estômatos, maior produção de etileno e desenvolvimento de doenças (CURE & ACOCK, 1986).

Há variação entre espécies de plantas C₃ em relação à fotossíntese, crescimento vegetativo, massa foliar e desenvolvimento do sistema radicular quando desenvolvidas em ambientes enriquecidos com dióxido de carbono. Efeitos comumente observados são: redução da concentração de nitrogênio nos tecidos das folhas devido à baixa taxa de transpiração; aumento de carboidratos; modificação da distribuição de proteínas e compostos nitrogenados e aumento da massa fresca das folhas (VESSEY *et al.*, 1990). GAO & ZHANG (1997) observaram aumento de crescimento variando de 13 a 32% em

algumas espécies florestais quando a concentração de CO₂ foi aumentada de 365 para 700 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar. Em algumas plantas C₃, como o *Triticum aestivum* L., *Medicago sativa* L. e *Hordeum vulgare* L. aumentaram seu desenvolvimento vegetativo em 41%, as C₄ em 22% e as CAM em 5%, quando a concentração de CO₂ foi de aproximadamente 700 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar (Wong, 1979; Poorter, 1993; Soussana *et al.*, 1996; Fischer *et al.*, 1997). Variando a concentração de CO₂ de 365 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar para 700 μmolCO₂.mol⁻¹ de ar e intensidade luminosa, Ghannoum *et al.* (1997) encontraram variação de 71% no peso seco para plantas C₃ e 28% em plantas C₄. A magnitude do incremento depende da temperatura, pois quanto menor a temperatura, menor o efeito. O aumento da velocidade de assimilação de CO₂ pode atingir 80% ao ativar a enzima ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco), reduzindo a fotorrespiração, melhorando o metabolismo, o crescimento e a produção. A temperatura ótima para fotossíntese varia com o estágio de desenvolvimento das plantas, estando na faixa de 20 a 30°C para a maioria das plantas tanto C₃, como C₄ e CAM, sendo menor na fase de maturação (ACOCK *et al.*, 1990).

A concentração de nitrogênio por unidade de massa nos tecidos vegetais sempre decresce de 2 a 57% em ambiente com elevada concentração de dióxido de carbono, dependendo da espécie, como consequência do aumento de carboidratos e da diminuição da enzima ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase-oxigenase Rubisco e de proteínas (LUO *et al.*, 1996).

Vários estudos conduzidos com o enriquecimento de dióxido de carbono em ambientes controlados e em condições de campo mostram o aumento na fotossíntese, no desenvolvimento dos vegetais e na resistência ao estresse hídrico, o que pode ser explicado pela absorção de dióxido de carbono pelas raízes e conseqüente aumento na assimilação pelo metabolismo das plantas (GUINN, 1974; ARTECA *et al.*, 1979; COOKER & SCHUBERT, 1981; BARON & GORSKY, 1986). Entretanto, ARTECA & POOVAIAH, (1982) observaram que apenas 0,1% do carbono total fixado pela fotossíntese é absorvido pelas raízes. Outra explicação é que a absorção de dióxido de carbono pelas raízes influencia o equilíbrio hormonal, afetando os processos fisiológicos. Combinações equilibradas de etileno e dióxido de carbono no ar do solo podem reduzir os efeitos prejudiciais do etileno no desenvolvimento das raízes e, também, aumentam a concentração de bicarbonatos na solução do solo (FINN & BRUN, 1982).

A sensibilidade das trocas do CO₂ à deficiência hídrica é uma característica da espécie, sen-

do porém adaptável. Essa sensibilidade depende, ainda, da idade da planta, da posição de ramos e folhas na copa da árvore e da umidade do solo (LARCHER, 1995). Plantas submetidas a estresses hídricos freqüentes respondem melhor a maiores concentrações de dióxido de carbono (HAM *et al.*, 1995). Concentração de dióxido de carbono maiores que $900\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ de ar pode causar fechamento parcial dos estômatos, causando, como consequência, redução na transpiração (FAQUHAR *et al.*, 1978; KIMBALL, 1983; KIMBALL & IDSO, 1983; MORISON, 1985; CURE & ACOCK, 1986). Nessa situação, há aumento da taxa de crescimento, com produção de maior quantidade de matéria vegetal (MORISON & GIFFORD, 1984). Mesmo em condições de luminosidade inadequada e deficiência hídrica, a taxa de crescimento das plantas é aumentada em ambientes com alta concentração de dióxido de carbono, que ocorre devido ao fechamento dos estômatos e maior expansão do sistema radicular, possibilitando a exploração de um maior volume de solo (CURTIS *et al.*, 1990).

Aumentos na taxa de crescimento causados pelo aumento da concentração de CO_2 são menores em ambientes com baixa luminosidade. Entretanto, o desempenho das plantas pode variar, existem espécies que têm seu crescimento acelerado em ambientes enriquecidos com dióxido de carbono e baixa luminosidade, enquanto outras espécies reduzem o crescimento quando a concentração de dióxido de carbono aproxima-se de $700\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ de ar, provocando, também, atraso na colheita (IDSO & BRAZEL, 1984; PUTKHAL'SKAYA, 1997).

Folhas expostas por período maiores que duas semanas em concentração de dióxido de carbono acima de $700\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ de ar sofrem mudanças químicas em sua composição. Aumentando a concentração total de carboidratos, geralmente, aumenta a concentração de nitrogênio e a capacidade fotossintética diminui (KÖRNER & WÜRTH, 1996).

A simbiose de fungos em ambientes enriquecidos com dióxido de carbono pode prolongar a vida dos pêlos absorventes por alguns dias, aumentando a área de absorção de nutrientes das raízes (TINKER, 1984).

O uso de CO_2 , sob a forma de gás ou misturado à água de irrigação, melhora a qualidade das flores e frutos. O CO_2 reage com os cátions da solução do solo produzindo bicarbonatos, os quais são absorvidos pelas plantas (SMITH *et al.*, 1991). O CO_2 provoca, ainda, redução do pH do solo, aumenta a disponibilidade de fósforo e cálcio na solução do solo e favorece a absorção de zinco e manga-

nês. No algodão, aumentou o crescimento vegetativo e o tamanho do capulho (MAUNEY & HENDRIX, 1988). Todavia, o pH tende a retornar aos valores anteriores 24 horas após a aplicação (BASILE *et al.*, 1993). Mesmo em solo com limitação nutricional pode ocorrer maior desenvolvimento do sistema radicular, o que permite maior absorção de nutrientes e intensifica a translocação de produtos fotossintetizados das folhas para as raízes (NORBY *et al.*, 1992). GHANNOUM *et al.* (1997) constataram maior número de sementes em ambiente enriquecido com CO_2 , em *Panicum laxum* e *Panicum antidotale*. D'ANDRIA *et al.* (1990) observaram aumento na produção de tomates devido a aumento no tamanho dos frutos e não maior número de frutos, em cultivos com solo coberto por plástico e irrigado por gotejamento. PINTO (1997), em estudo em condições de campo a céu aberto, obteve produtividades de 38,6 e $37,1\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$, com aplicação de CO_2 diariamente e três vezes por semana, respectivamente. E, em ambiente protegido, aplicando CO_2 via água de irrigação, a produtividade foi de $28,68\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $22,53\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sem aplicação de CO_2 . Observou-se aumento na produtividade total e comercial, no número e no peso de frutos do meloeiro, sem alteração de qualidade. Verificou-se, ainda, aumento na taxa de assimilação de CO_2 com aplicação de dióxido de carbono. A eficiência do uso de água foi maior nos tratamentos com aplicação de CO_2 via água de irrigação (PINTO, 1988).

A elevação da concentração de dióxido de carbono para, aproximadamente, $1000\mu\text{molCO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ de ar em *Digitalis lanata*, cultivada em estufa, produziu aumento de duas vezes mais biomassa em comparação ao cultivo em condições de campo, sem aplicação de dióxido de carbono. O aumento da concentração de dióxido de carbono estimulou o metabolismo primário de duas maneiras: estimulação da carboxilação da ribulose-bisfosfato e redução da fotorrespiração. Entretanto, STUHLFAUTH & FOCK (1990) advertem que a manutenção da concentração de dióxido de carbono em casa de vegetação deve superar duas dificuldades: elevadas temperaturas, que afetam a fotossíntese e a perda de dióxido de carbono com a abertura da estufa para resfriamento.

OUTRAS APLICAÇÕES DO DIÓXIDO DE CARBONO NA AGRICULTURA

A atmosfera controlada também pode ser benéfica na conservação de frutos após a colheita, como demonstram pesquisas com melão. Resultados obtidos por STEWART (1979), em *Cantaloupe* 'PMR 45', indicaram que atmosfera enriquecida

com dióxido de carbono a 20% reduziu a severidade de ataque fúngico, danos superficiais e degradação da polpa quando comparada com atmosfera comum. O efeito mais benéfico ocorreu após a manutenção dos frutos por 14 dias a 5°C, seguido de três dias em ambiente a 20°C. O armazenamento dos frutos em atmosfera com aumento de 40% na concentração de CO₂ provocou danos fisiológicos, com alteração de sabor e liberação de odor desagradável.

A maçã 'Golden Delicious' armazenada em concentrações com 1% de O₂ e 4% de CO₂ apresentou uma melhor manutenção das qualidades físico-químicas após longo período de armazenamento sem apresentar sintomas de fermentação (BRACKMANN *et al.*, 1998). Em atmosfera controlada, a cor da epiderme manteve-se mais verde, com maior firmeza da polpa e maior acidez dos frutos (OSTER & BRACKMANN, 1999). A maçã 'Jonagold' não apresentou boa qualidade para o consumo após 10 meses de armazenamento em atmosfera com CO₂ e O₂ controlados (BRACKMANN & LUNARDI, 1999).

Estudos realizados por AHARONI *et al.* (1993), com atmosfera controlada em melão 'Galia', indicaram que o dióxido de carbono aumentado em 20% mostrou-se mais efetivo do que aumento de concentrações de 5% e 10%, no entanto, provocou mudanças de sabor e aroma. A combinação de 10% de dióxido de carbono e 10% de O₂ prolongou a armazenabilidade do fruto sem causar prejuízos de sabor e aroma. Todavia, atmosfera enriquecida com 10% de CO₂ e 10% de O₂, com aplicação de etileno, é a condição propícia para armazenamento de melão, sem problemas de amolecimento dos frutos e incidência de ataque de fungos, ou mesmo, sem mudanças do sabor e aroma.

CONCLUSÕES

O uso de dióxido de carbono é uma técnica promissora em culturas intensivas com maior adensamento de plantas por área. Todavia, deve-se determinar doses a serem usadas e períodos de aplicação mais adequados para os diferentes tipos de cultivos, para alcançar uma relação máxima benéfica custo.

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 for Horticultural Science**, v.115, n.4, p.525-529, 1990.
- AHARONI, Y., COPEL, A., FALIK, E. Storing 'Galia' melons in a controlled atmosphere with ethylene absorbent. **Hort Science**, v.28, n.7, p.725-727, 1993.
- AIKEN, R.M., JAWSON, M.D., GRAHAMMER, K., *et al.* Positional, spatially correlated and random components of variability in carbon dioxide efflux. **Journal of Environmental Quality**, v.20, n.1, p.301-308, 1991.
- ARTECA, R.N., POOVAIAH, B.W. Absorption of ¹⁴CO₂ by potato roots and its subsequent translocation. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.107, n.3, p.398-401, 1982.
- ARTECA, R.N., POOVAIAH, B.W., SMITH, O.E. Changes in carbon fixation, tuberization and growth induced by CO₂ applications to the root zone of potato plants. **Science**, v.205, n.4412, p.1279-1280, 1979.
- BABENKO, Y.S., TYRUGINA, G.I., ORIGOREEV, E.F., *et al.* Biological activity and physiological biochemical properties of phosphate dissolving bacteria. **Microbiology**, v.53, p.427-433, 1985.
- BARON, J.J., GORSKI, S.F. Response of eggplant to a root environment enriched with CO₂. **Hort Science**, v.21, n.3, p.495-498, 1986.
- BASILE, G., ARIENZO, M., ZENA, A. Soil nutrient mobility in response to irrigation with carbon dioxide enriched water. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.24, n.11/12, p.1183-1195, 1993.
- BRACKMANN, A., LUNARDI, R. Armazenamento de maçãs 'Jonagold' em condições de atmosfera controlada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 21, n. 1, p. 36-39, 1999.
- BRACKMANN, A., MAZARO, S.M., LUNARDI, R. Armazenamento da maçã cv. Golden delicious em atmosfera controlada com altas concentrações de CO₂ e ultra-baixas de O₂. **Ciência Rural**, v.28, n.2, p.215-219, 1998.
- CASELLA, E., SOUSSANA, J.F., LOISEAU, P. Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. I. Productivity and water use. **Plant and Soil**, v.187, n.1, p.83-99, 1996.
- 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.
- COOKER, R.T., SCHUBERT, K.R. Carbon dioxide fixation in soybean roots and nodules: I. Characterization and comparison with N₂ fixation and comparison of xylem exudate during early nodule development. **Plant Physiology**, v.67, n.4, p.691-696, 1981.
- CURE, J.D., ACOCK, B. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. **Agricultural Forest and Meteorology**, v.38, n.1/3, p.127-145, 1986.
- CURTIS, P.S., BALDUMAN, L.M., DRAKE, B.G., *et al.* Elevated atmospheric CO₂ effects on belowground processes in C₃ and C₄ stuarine marsh communities. **Ecology**, v.71, n.5, p.2001-2006, 1990.
- D'ANDRIA, R., NOVERO, R., SMITH, D.H. Drip irrigation of tomato using carbonated water and mulch in Colorado. **Acta Horticulturae**, v 278, p.179-185, 1990.

- FAQUHAR, G.D., DUBLE, D.R., RASCHKE, K. Gain of the feedback loop involving carbon dioxide and stomata, theory and measurement. **Plant Physiology**, v.62, n.3, p.406-412, 1978.
- FINN, G.A., BRUN, B.W. Effect of atmospheric CO₂ enrichment on growth, nonstructural content, and root nodule activity in soybean. **Plant Physiology**, v.69, n.2, p.327-331, 1982.
- FISCHER, M., MATTHIES, D., SCHMID, B. Responses of rare calcareous grassland plants to elevated CO₂: a field experiment with *Gentianella germanica* and *Gentiana cruciata*. **Journal of Ecology**, v.85, n.5, p.681-691, 1997.
- GAO, Q., ZHANG, X. A simulation study of responses of the Northeast China transect to elevated CO₂ and climate change. **Ecological Applications**, v.7, n.2, p.470-483, 1997.
- GHANNOUM, O., CAEMMERER, S.V., BARLOW, E.W.R., *et al.* The effect of CO₂ enrichment and irradiance on the growth, morphology and gas exchange of a C₃ (*Panicum laxum*) and a C₄ (*Panicum antidotade*) grass. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.24, n.2, p.227-237, 1997.
- GUIMARÃES, J.R. **Determinação e especiação de carbono inorgânico em águas naturais e atmosfera por análise em fluxo**. Campinas, 1995. 99p. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- GUINN, G. Abscission of cotton floral buds and bolls as influenced by factors affecting photosynthesis and respiration. **Crop Science**, v.14, n.2, p.291-293, 1974.
- HAM, J.M., OWENSBY, C.E., COYNE, P., *et al.* Fluxes of CO₂ and water vapor from a prairie ecosystem exposed to ambient and elevated atmospheric CO₂. **Agricultural Forest and Meteorology**, v.77, n.1/2, p.73-93, 1995.
- 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' research. **Agricultural Forest and Meteorology**, v.69, n.3/4, p.153-203, 1994.
- IDSO, S.B., BRAZEL, A.J. Rising atmospheric carbon dioxide concentrations may increase streamflow. **Nature**, v.312, n.5989, p.51-53, 1984.
- KEELING, C.D., WHORF, T.P., PFLIT, J.V.D. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. **Nature**, v.375, n.6533, p.666-670, 1995.
- KIMBALL, B.A. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observation. **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 Water Management**, v.7, n.1, p.55-73, 1983.
- KIMBALL, B.A., LaMORTE, R.L., SEAY, R.S., *et al.* Effects of free air CO₂ enrichment on energy balance and evapotranspiration of cotton. **Agricultural Forest and Meteorology**, v.70, n.1/4, p.259-278, 1994.
- KÖRNER, C., WÜRTH, M. A simple method for testing leaf responses of tall tropical forest trees to elevated CO₂. **Oecologia**, v.107, n.4, p.421-425, 1996.
- LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. 3.ed. New York: Springer-Verlag, 1995. 505p.
- LONG, S.P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration: has its importance been underestimated. **Plant, Cell and Environment**, v.14, p.729-739, 1991.
- LUO, Y., FIELD, C.B., MOONEY H.A. Producing responses of photosynthesis and root fraction to elevated CO₂: interactions among carbon, nitrogen, and growth. **Plant, Cell and Environment**, v.17, n.11, p.1195-1204, 1994.
- LUO, Y., JACKSON, R.B., FIELD, C.B. Elevated CO₂ increase belowground respiration in California grasslands. **Oecologia**, v.108, n.1, p.130-137, 1996.
- MAUNEY, J.R., HENDRIX, D.L. Responses of glasshouse grown cotton to irrigation with carbon dioxide-saturated water. **Crop Science**, v.28, n.5, p.835-838, 1988.
- MITCHELL, J.F.B., JOHNS, F.C., GREGORY, J.M., *et al.* Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. **Nature**, v.376, n.6540, p.501-504, 1995.
- MOORE, P.D. How do plants cope when they live in the shade? **Nature**, v.349, n.6304, p.22, 1991.
- MOORE, P.D. Potential for irrigation with carbon dioxide. **Acta Horticulturae**, v.278, p.171-178, 1990.
- MORISON, J.I.L. Sensitivity of stomata and water use efficiency to high CO₂. **Plant, Cell and Environment**, v.8, p.467-474, 1985.
- 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, 1984.
- MUDRIK, V.A., ROMANOVA, A.K., IVANOV, B.N., *et al.* Effect of increased CO₂ concentration on growth, photosynthesis, and composition of *Pisum sativum* L. plant. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.44, n.2, p.165-171, 1997.
- NORBY, R.J., GUNDERSON, C.A., WULLSCHLEGER, S.D., *et al.* Productivity and compensatory responses of yellow-poplar trees in elevated CO₂. **Nature**, v.357, n.6376, p.322-324, 1992.
- NORBY, R.J., O'NEIL 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.
- OSTER, A H., BRACKMANN, A. Condições de armazenamento refrigerado e atmosfera controlada para maçãs (*Malus domestica*, Borkh) 'Golden Delicious'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.21, n.1, p.40-44, 1999.
- PINTO, J.M. **Aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação em meloeiro**. Piracicaba, 1998. 82p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1997.
- PINTO, J.M., BOTREL, T.A., MACHADO, E.C., *et al.* Aplicação de CO₂ via água de irrigação em meloeiro. In: BALBUENA, R.H., BENEZ, S.H., JORAJURIA, D., (ed.) **Avances en el manejo del suelo y agua en la ingeniería rural latinoamericana**. La Plata : Editorial de la UNLP, 1998, p. 239-244.

- POORTER, H. Inter specific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. **Vegetatio**, v.104, p.77-97, 1993.
- PUKHAL'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.
- RUFTY Jr., T.W., MACKOWN, C.T., VOLK, R.M. Effects of altered carbohydrate availability on whole-plant assimilation of ¹⁵NO₃. **Plant Physiology**, v.89, n.2, p.457-463, 1989.
- SARALABAI, V.C., VIVEKANANDAN, M., SUREHBABU, R. Plant responses to high CO₂ concentration in the atmosphere. **Photosynthetica**, v.33, n.1, p.7-37, 1990.
- SMITH, D.H., MOORE, F.D., NOVERO, R., *et al.* Field-grown tomato response to carbonated water application. **Agronomy Journal**, v.83, n.5, p.911-916, 1991.
- SOUSSANA, J.F., CASELLA, E., LOISEUA, P. Long-term effects of CO₂ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. II. Plant nitrogen budgets and root fraction. **Plant and Soil**, v.187, n.1, p.101-114, 1996.
- STEWART, J.K. Decay of muskmelon stored in controlled atmospheres. **Scientia Horticulturae**, v.11, n.1, p.69-74, 1979.
- STUHLFAUTH, T., FOCK, H.P. Effect of whole season CO₂ enrichment on the cultivation of a medicinal plant, *Digitalis lanata*. **Journal Agronomy & Crop Science**, v.164, p.168-173, 1990.
- TINKER, P.B. The role of microorganisms in mediating and facilitating the uptake of plant nutrients from the soil. **Plant and Soil**, v.76, n.1/3, p.77-91, 1984.
- TRAW, M.B., LINDROTH, R.L., BAZZAZ, F.A. Decline in gypsy moth (*Lymantria dispar*) performance in an elevated CO₂ atmosphere depends upon host plant species. **Oecologia**, v.108, n.1, p.113-120, 1996.
- VESSEY, J.K., HENRY, L.T., RAPER Jr., C.D. Nitrogen nutrition and temporal effects of enhanced carbon dioxide on soybean growth. **Crop Science**, v.30, n.2, p.287-294, 1990.
- VITOUSEK, P.M. Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon dioxide? **Journal of Environmental Quality**, v.20, n.2, p.348-354, 1991.
- WONG, S.C. Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth. I. Interactions of nutrition and photosynthetic capacity in C₃ and C₄ plants. **Oecologia**, v.44, n.1, p.68-74, 1979.