

# Mudanças Climáticas e Modelos Ambientais: Caracterização e Aplicações

Josiclêda Domiciano Galvincto [Org.]



Editora  
Universitária UFPE

Recife - 2011

**Josiclêda Domiciano Galvêncio  
(Organizadora)**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MODELOS  
AMBIENTAIS: CARACTERIZAÇÃO E  
APLICAÇÕES**

# CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO EM CULTURAS AGRÍCOLAS NO VALE DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

Thieres George Freire da Silva<sup>11</sup>  
Magna Soelma Beserra de Moura<sup>12</sup>  
Luciana Sandra Bastos de Souza<sup>13</sup>

## Introdução

As recentes alterações nos padrões das variáveis climáticas, sobretudo da precipitação e da evapotranspiração, têm sido associadas ao aquecimento global, este resultado do incremento de dióxido de carbono na atmosfera. Além desses efeitos, o CO<sub>2</sub> pode influenciar diretamente em aspectos fisiológicos, produtivos, hídricos e na eficiência do uso de água das plantas e, conseqüentemente, na necessidade de água dos sistemas de produção agrícola. Entretanto, estas respostas não estão bem definidas, logo que as mesmas podem variar a depender do efeito conjunto entre o nível de CO<sub>2</sub> e outros fatores ambientais, do tipo de processo fotossintético das plantas, bem como das alterações da arquitetura e dos mecanismos das plantas nas novas condições de cultivo (Ainsworth e Rogers, 2007).

Com o aumento da [CO<sub>2</sub>] no ambiente, espera-se modificações dos parâmetros fisiológicos das culturas, como fotossíntese e transpiração, logo que tem efeito sobre a condutância estomática. Em geral, o processo fotossintético das plantas C<sub>3</sub> responderá melhor à elevada [CO<sub>2</sub>] quando comparada às plantas C<sub>4</sub>. Isto ocorre primeiramente por que dentro das células guardas das plantas C<sub>4</sub>, os níveis de CO<sub>2</sub> são próximos da

---

<sup>11</sup> Prof. Adjunto I, Agrometeorologista, UAST/UFRPE

<sup>12</sup> Pesquisadora, Agrometeorologista, Embrapa Semiárido

<sup>13</sup> MSc. Agrometeorologista, UFV

saturação e a fotorrespiração é praticamente ausente. Apesar disso, as plantas C<sub>4</sub> podem ser beneficiadas logo em tais condições a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> é aumentada, como resultado das melhorias nas relações hídricas das espécies (Ghannoum et al., 2000; Urban et al., 2002).

Em plantas C<sub>4</sub> (ex. sorgo), tem sido verificado que o enriquecimento de CO<sub>2</sub> (+ 200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) reduz a condutância estomática em até 32% e 37%, a taxa de assimilação aumenta em 23% e 9%, enquanto que, o potencial de água na folha torna-se menos negativo em 9% e 3%, para condições de maior (100% da irrigação) e menor (irrigação apenas no período de plantio e no meio da estação de crescimento) disponibilidade de água, respectivamente, quando comparados aos ambientes com [CO<sub>2</sub>] normal. Além do mais, o enriquecimento de CO<sub>2</sub> melhora os efeitos adversos do estresse hídrico, reduzindo a taxa de perda de água pelas plantas e melhorando a capacidade de absorção de água pelas raízes, indicando com isso, melhorarias na relação hídrica (Wall et al., 2000). Porém, devido à redução da condutância estomática há possibilidade de aumento da temperatura do dossel das plantas (T<sub>s</sub>), principalmente durante o período de maior intensidade luminosa, quando sob condições de maior [CO<sub>2</sub>] e de disponibilidade de água no solo, a temperatura foliar pode atingir valores elevados (de +1,47±0,09°C até +1,85±0,20°C) (Triggs et al., 2004)

O incremento de CO<sub>2</sub> na atmosfera também promove aumento da atividade fotossintética, porém a exposição a elevadas [CO<sub>2</sub>] podem causar alterações fisiológicas que reduzem a atividade e a concentração da enzima Rubisco. Em plantas C<sub>3</sub> (ex. amendoim), sob alta concentração de CO<sub>2</sub> (720 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e de temperatura do ar (1,5 e 6,0°C), apresentam um aumento do desempenho da atividade fotossintética das plantas, como resultado do incremento do conteúdo (5-12%) e da atividade da enzima Rubisco (9-20%) (Vu et al., 2005). Como resultado, os componentes de biomassa das culturas (peso seco dos frutos e total) podem ser modificados. Muitos autores têm demonstrado que a maioria das plantas C<sub>3</sub> pode apresentar aumentos significativos na biomassa total e no rendimento, como por exemplo, entre 40% e 45% de biomassa, com o ambiente

enriquecido com  $550 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , e entre 45 e 50% em condições com  $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , para a cultura da videira. No entanto, os efeitos positivos do aumento de  $\text{CO}_2$  poderão ser reduzidos, com o aumento da temperatura do ar, logo que diminuirá o tempo de atividade fotossintética e a duração dos estádios fenológicos, e aumentará a respiração das plantas (Bindi et al., 2001). Em planta  $\text{C}_4$  (ex. sorgo), tem sido observado, em ambientes com maior  $[\text{CO}_2]$ , o aumento significativamente da produtividade de grãos, restolhos e do rendimento total, em condições com ou sem restrição hídrica, o que pode estar relacionado com a redução da transpiração e o maior conteúdo de água no solo. Por outro lado, o desenvolvimento fenológico da cultura não foi afetado devido à restrição hídrica ou fechamento dos estômatos (Ottman et al., 2001).

Outro efeito do incremento de  $\text{CO}_2$  na atmosfera tem sido constatado por inúmeros autores, no que se refere à redução da evapotranspiração das culturas por causa da diminuição da transpiração das plantas (Wall et al., 2001). Contudo, ainda existem incertezas devido ao aumento de produtividade induzir ao incremento da área foliar, que pode favorecer para um aumento da transpiração e evapotranspiração das culturas, contrariando as possibilidades de redução da condutância estomática (Magliulo et al., 2003). Por outro lado, ainda tem-se que essas respostas dependem da existência ou não de fatores estressantes no ambiente de cultivo. Assim, para avaliar os efeitos do enriquecimento de  $\text{CO}_2$  sobre o processo de evapotranspiração, vários autores têm aplicado nos sistemas de enriquecimento de  $\text{CO}_2$  a campo (exemplo, FACE), o método do resíduo do balanço de energia (Magliulo et al., 2003; Triggs et al., 2004) e o método do balanço de água no solo (Hunsaker et al., 1996, 2000).

De modo geral, o que tem sido observado é que, em termos de evapotranspiração, existe uma grande possibilidade de benefícios do aumento da  $[\text{CO}_2]$  tanto para as plantas  $\text{C}_3$  quanto para as  $\text{C}_4$ . Magliulo et al. (2003), constataram para a cultura do tomateiro ( $\text{C}_3$ ), que o enriquecimento de  $\text{CO}_2$  reduziu o uso de água total sob condições de disponibilidade de água no solo quando comparado ao controle ( $360 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Observaram que o ambiente com maior concentração de  $\text{CO}_2$ , a

evapotranspiração relativa ( $ET_{rel}$ ) da cultura foi inferior durante todo o ciclo, resultando com isso em um maior conteúdo de água no solo. A economia de água constatada para essas condições foi de 11,8%. Em revisão realizada por estes autores, os mesmos constataram uma tendência similar para outras plantas  $C_3$ , por exemplo, o trigo, que sob condições irrigadas, a  $ET_{rel}$  foi reduzida em 7%. Porém, essas reduções não tem sido padrão para todas as culturas. Hunsaker et al. (1994) não observaram influências significativas sobre a  $ET_{rel}$  para a cultura da algodoeiro ( $C_3$ ) devido ao aumento da concentração de  $CO_2$  do ambiente (+ 180  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Para o sorgo ( $C_4$ ), cultivado sem restrição de água no solo, Triggs et al. (2004), elevando a  $[CO_2]$  em 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , observaram reduções em  $12,8 \pm 1,8\%$  da taxa de  $ET_{rel}$  da cultura, resultando ao final do ciclo, uma economia de água em 19%. Por outro lado, em baixa disponibilidade de água, as plantas também reduziram a  $ET_{rel}$ , no entanto, numa magnitude bem menor ( $-8,5 \pm 3,7\%$ ).

Assim, para ambientes de cultivo com menor disponibilidade de água será preferível o uso de culturas  $C_4$ , enquanto que, em ambientes com maior disponibilidade de água de irrigação e de precipitação serão preferíveis as plantas  $C_3$ .

Como resultado dos aumentos de biomassa e da redução da transpiração, existe uma tendência para o aumento do uso eficiente de água (UEA). Considerando uma redução apenas da taxa de transpiração, uma planta em condições de alta concentração de  $CO_2$  produzirá a mesma quantidade de biomassa utilizando menor quantidade de água, o que aumentará a fotossíntese líquida, por outro lado, reduzirá a condutância estomática. Porém, as incertezas de resposta do crescimento de algumas espécies como revisado por Kimball et al. (2002), ainda levam a dúvida quanto ao UEA das plantas, especialmente quando a cultura sob condições de estresse (Triggs et al., 2004). Melgar et al. (2008) observaram que plantas de oliveira em ambiente salino não apresentaram aumento do crescimento, porém, ainda apresentaram aumento do UEA. Wu et al. (2004) evidenciaram que sob condições de alta disponibilidade de água ( $\theta = 80\%$ ) e de  $CO_2$ , a cultura consumiu mais água durante o ciclo (+16,7%), quando comparado ao ambiente com baixa

disponibilidade de água no solo ( $\theta = 40\%$ ). Os aumentos no UEA da parte aérea e dos grãos do trigo foram em resposta aos efeitos diretos da elevação da  $[CO_2]$  sobre o aumento do peso fresco da parte aérea e do grão, do que por causa dos efeitos no consumo de água acumulado pela cultura. Os valores de UEA da parte aérea e dos grãos foram 62% e 128% superiores aos obtidos em ambiente normal. Hunsaker et al. (2000) também evidenciaram aumentos no UEA da cultura do trigo (17%) devido o enriquecimento de  $CO_2$  no ambiente, principalmente sob condições de alta disponibilidade de nitrogênio no solo. Wu e Wang (2000) verificaram que a elevação da  $[CO_2]$  no ambiente, aumentou o UEA de plantas de Faba, porém em condições de restrição de água no solo o benefício foi evidenciado apenas no índice de colheita, comprovando que os maiores benefícios da cultura serão constatados em ambientes com disponibilidade de água. Em condições de restrição hídrica, os efeitos do estresse hídrico reduziram expressivamente os benefícios do enriquecimento de  $CO_2$  sobre o crescimento das plantas. Triggs et al. (2004) constataram um aumento de 28% no UEA da cultura do sorgo ( $C_4$ ) sob condições de alta disponibilidade de água, especialmente devido à redução do consumo de água (em 19%), logo que a biomassa da cultura aumentou apenas 4%. Em condições de maior restrição de água, a cultura também apresentou aumentos do UEA (16%), nesse caso principalmente devido ao incremento da biomassa do sorgo (16%), uma vez que a evapotranspiração aumentou em 5%.

Desta forma, as mudanças climáticas podem afetar a atividade agrícola devido os efeitos sobre o crescimento e rendimento das culturas, bem como pela influência...

### **Estimativa dos efeitos das mudanças climáticas na evapotranspiração**

Para a análise dos efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade econômica da água de irrigação de culturas agrícolas, inicialmente faz-se necessário quantificar as repostas da evapotranspiração das culturas a estas novas condições do clima. Para isso, são utilizados dados climatológicos da região em

estudo e informações inerentes a espécies que se deseja avaliar. Os efeitos na evapotranspiração podem ser obtidos para as culturas como a cana-de-açúcar, uma planta C<sub>4</sub> semiperene, manga e videira, plantas C<sub>3</sub> perenes, para o milho, uma planta C<sub>4</sub> de ciclo anual, bem como para a vegetação nativa caatinga. Dentre os dados climatológicos, são utilizados os valores médios mensais da radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento. Como este estudo foi feito para a região do Vale do Submédio São Francisco, utilizou-se os dados registrados na estação meteorológica convencional de Bebedouro, que é pertencente à Empresa Brasileira de Agropecuária - Embrapa Semiárido, localizada (09°09'S; 40°22'W; 365 m), no município de Petrolina – PE, referente ao período de 1965 a 2007.

Nesta avaliação são considerados os efeitos do aumento da concentração do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e do déficit de pressão de vapor (DPV) sobre a evapotranspiração das culturas (ET<sub>c</sub>), bem como da disponibilidade de água para a vegetação caatinga. Além disso, assume-se a influência da temperatura do ar sobre a duração das fases fenológicas das culturas e para o ciclo da vegetação nativa.

Para a caatinga, assume-se um ano completo no cálculo da evapotranspiração da vegetação nativa (ET<sub>caat.</sub>). Enquanto, para as espécies agrícolas, a evapotranspiração da cultura acumulada (ΣET<sub>c</sub>) é calculada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), o coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) específico e a duração de dias de cada fase fenológica (ND<sub>FASE(x)</sub>):

$$\Sigma ET_c = (ET_o \cdot K_c \cdot ND)_{FASE(x)} + (ET_o \cdot K_c \cdot ND)_{FASE(x+1)} + \dots + (ET_o \cdot K_c \cdot ND)_{FASE(n)}$$

A ET<sub>o</sub> é obtida através do modelo original de Penman Monteith (ALLEN et al., 1988), logo permite incorporar os efeitos do incremento de CO<sub>2</sub> sobre a condutância estomática das plantas, bem como do DPV, ambos em decorrência das mudanças climáticas:



$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \frac{t \rho_a c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

onde,  $\Delta$  é declividade da curva da relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  é a radiação líquida ( $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $t$  é o fator conversão de escala de tempo ( $86400 \times 365$  dias);  $\rho_a$  é a densidade média do ar a pressão constante ( $\text{Kg m}^{-3}$ );  $c_p$  = representa o calor específico do ar ( $\text{MJ Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $(e_s - e_a)$  é o déficit de pressão do vapor do ar ( $\text{kPa}$ );  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $r_s$  é a resistência da superfície ( $\text{s m}^{-1}$ );  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ( $\text{sm}^{-1}$ ).

Os valores de  $r_s$  são estimados utilizando a seguinte expressão:

$$r_s = \frac{r_l}{0,5 \cdot \text{IAF}}$$

em que,  $r_l$  é a resistência dos estômatos da folha bem iluminada ( $\text{s m}^{-1}$ ), assumindo o valor de  $100 \text{ sm}^{-1}$ ;  $\text{IAF}$  é o índice de área foliar ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), sendo função de  $h$  (altura da cultura da grama), dada na expressão  $\text{IAF} = 24 h$ , sendo  $h$  igual a  $0,12 \text{ m}$ .

A influência do  $\text{CO}_2$ , do DPV e da disponibilidade de água na ETo é convertida em ETc da cana-de-açúcar, manga e da videira por meio do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) específico para cada uma das espécies, enquanto que para a vegetação nativa, utiliza-se a fração evaporativa (FE), obtida em função do índice efetivo de umidade ( $I_m$ ).

Na cana-de-açúcar, o  $K_c$  é estimado em função dos graus dias acumulados para cada mês produtivo, usando equações conforme desenvolvidas por Silva (2009). Na manga, considera-se  $0,80$ ;  $0,65$ ;  $0,25$ ;  $0,85$  e  $0,55$  como valores médios do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para as suas respectivas fases fenológicas, respectivamente. Na videira, estes valores de  $K_c$  são

iguais a 0,60 (Fase I), 0,85 (Fase II), 1,05 (Fase III) e 0,75 (Fase IV). Na cultura do milho, os valores de Kc são iguais a 0,86, 1,23, 0,97 e 0,52, nessa ordem, para as fase I, II, III e IV. Na caatinga, a FE é determinada assumindo uma relação com o índice efetivo de umidade (Im):

$$I_m = \left( \frac{P_m}{ETP_m} - 1 \right) \cdot 100$$

em que,  $P_m$  e  $ETP_m$  são a precipitação e a evapotranspiração mensais acumuladas ( $\text{mm mês}^{-1}$ ). Assim, a evapotranspiração da caatinga foi determinada por meio a ETo em ET.

Esta relação do Im com os valores anuais da fração evaporativa ( $FE = ET_{\text{caat}}/ETo$ ) (Figura 1) foi obtida por meio dos dados publicados em Teixeira et al. (2008) para dois anos (2004 e 2005), permitindo assim determinar os valores de FE e, conseqüentemente, da evapotranspiração da caatinga para diferentes condições de disponibilidade de água no solo, a partir da evapotranspiração de referência (ETo) da região. Nestes dois anos, os totais anuais de precipitação de 786,5 mm e 525,1 mm, caracterizados com padrões acima e abaixo da normal climatológica da região que é em torno de 549,8 mm, contemplando uma ampla faixa de disponibilidade hídrica anual da região. Assim, para um determinado ano "i", o valor de  $FE_i$  anual é estimado por meio do  $Im_i$  e, em seguida, a partir do produto entre os valores de  $FE_i$  anual e  $ETo_i$  anual é obtida a  $ET_{\text{caat}}$ .

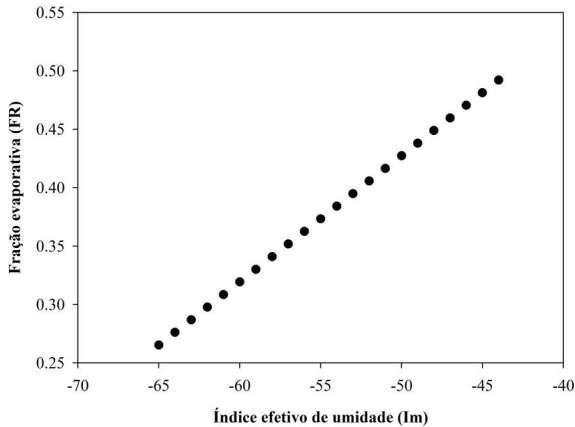


Figura 1. Relação entre a fração evaporativa (FE) e o índice efetivo de umidade (Im) (A).

Enquanto para a vegetação caatinga, a evapotranspiração é determinada assumindo um ano como sendo necessário para finalizar um ciclo produtivo médio, nas culturas agrícolas, o valor de ETC é obtida para cada uma das fases fenológicas. Para a cana-de-açúcar, videira e milho são considerados quatro fases representadas por I, II, III e IV. Para a cultura da manga são assumidos os subperíodos fenológicos: Subperíodo 1 (Sb1), que refere-se ao período de ocorrência da poda, adubação, início da brotação e aplicação de PBZ; Subperíodo 2 (Sb2), ocorrem a aplicação de PBZ, fase vegetativa, maturação dos ramos e repouso dos ramos; Subperíodo 3 (Sb3), há o repouso dos ramos, aplicação de nitrato e início da floração; Subperíodo 4 (Sb4), ocorre a floração plena, frutificação, quedas fisiológicas, crescimento e maturação dos frutos; e, no Subperíodo 5 (Sb5) é realizada a colheita.

A duração destas fases fenológicas é determinada em função dos graus dias acumulados (GDA) necessários para cada cultura concluir as suas respectivas fases fenológicas. Para a cana-de-açúcar, os valores são iguais a 452,9 (Fase I), 507,5 (Fase II), 509,4 (Fase III) e 587,0 (Fase IV), assumindo

temperatura base de 10°C (Silva, 2009). Para a videira, os valores limítrofes são iguais a 516,35 (Fase I), 428,3 (Fase II), 827,7 (Fase III) e 399,4 (Fase IV), com temperatura base de 10°C (BRANDÃO, 2008). Para o milho, os valores de GDA para cada fase fenológicas são 753,4 (Fase I), 224,1 (Fase II), 230,4 (Fase III) e 594,1 (Fase IV). Finalmente, para a cultura da manga, estes valores são 1434,8 (Sb1), 956,5 (Sb2), 478,3 (Sb3), 1913,0 (Sb4) e 956,5 (Sb5), sendo a temperatura base de 10°C (Moura et al., 2011).

A partir das projeções das variáveis climatológicas e da [CO<sub>2</sub>] e entaltecendo cenários futuros específicos para cada uma das superfícies vegetadas é possível avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre a evapotranspiração.

Para a caatinga foram definidos cinco cenários: I) Cenário atual (1965-2007), onde foi estimado os valores de ET<sub>caat</sub> para o período de 1965 a 2007; II) Cenário atual (1965-1990), onde foi estimado os valores de ET<sub>caat</sub> para o período de 1965 a 1990; III) Cenário atual (1991-2007), que se considerou os valores médios de ET<sub>caat</sub> para o período de 1990 a 2007; IV) Cenário futuro CO<sub>2</sub>, em que as projeções futuras dos valores de ET<sub>caat</sub> levou em consideração apenas os efeitos do CO<sub>2</sub> sobre a resistência estomática das folhas; V) Cenário futuro conjugado, onde foram quantificadas as projeções futuras dos valores de ET<sub>caat</sub> para o ano de 2099, incorporando as anomalias de t<sub>ar</sub>, UR, P e da [CO<sub>2</sub>]. Para a temperatura do ar foi considerado um incremento de 3,25°C, uma redução de 5,5% nos valores absolutos da umidade relativa do ar e um efeito do CO<sub>2</sub> na ET<sub>c</sub>, conforme citado por Lovelli et al. (2010), onde se prevê uma redução média de 22% da condutância estomática de uma folha bem iluminada (rl) e um aumento de 4% no IAF<sub>ativo</sub>. Na precipitação foi considerada uma diminuição de 20%.

A partir dos dados médios das variáveis meteorológicas t<sub>ar</sub>, UR e P (Tabela 1), verifica-se que, no período de 1991 a 2007, a temperatura média do ar foi inferior (25,8±0,6°C) quando comparada ao valor observado entre os anos de 1965 a 1990 (26,5±1,0°C), o que resultou em maiores valores de umidade relativa do ar (66,8±6,2). Entretanto, a quantidade de chuva tendeu a reduzir entre 1991 e 2007 (482±156 mm), chegando a

diminuir 13% da precipitação anual em relação ao período de 1965 a 1990. Apesar destas tendências, as projeções indicam, para o ano de 2099, um aumento da temperatura média do ar em torno de +3,25°C e uma redução da umidade relativa do ar podendo atingir -5,5% em termos absolutos. Além disso, os níveis pluviométricos tenderão a reduzir ainda mais (-20% P). Como consequência haverá uma redução na disponibilidade de água (-77,1), quando comparado às condições atuais (Tabela 1).

Tabela 1. Dados médios e projeções futuras para o ano de 2099 das variáveis meteorológicas e do índice efetivo de umidade para o município de Petrolina – PE.

<b>Variável meteorológica</b>	<b>1965 a 1990</b>	<b>1991 a 2007</b>	<b>1965 a 2007</b>	<b>Projeções futuras (2099)</b>
Temperatura do ar ( $t_{ar}$ , °C)	26,5±1,0	25,8±0,6	26,2±0,9	+3,25°C
Umidade relativa do ar (UR, %)	63,0±4,7	66,8±6,2	64,4±5,6	-5,5%
Precipitação (P, mm)	599±191	482±156	550±184	-20%P
Índice efetivo de umidade (Im)	-63,4	-69,0	-65,5	-77,1

Analisando os efeitos em termos de evapotranspiração, a redução na disponibilidade de água diminuirá a fração evaporativa (Figura 1) e, conseqüentemente, a  $ET_{caat}$ . Nos cenários atuais, a  $ET_{caat}$  média estimada para a caatinga, por meio da relação entre o Im e FE, foi em torno de 417 mm ano<sup>-1</sup>, para o período de 1965 e 2007 (Figura 2). Este valor é próximo aos informados por Teixeira et al. (2008) (398 e 688 mm ano<sup>-1</sup>). Entre os anos de 1965 e 1990, a  $ET_{caat}$  (463 mm ano<sup>-1</sup>) foi superior ao período subsequente (345 mm ano<sup>-1</sup>), devido a maior disponibilidade hídrica (Im = -63,4). Assumindo os cenários de mudanças climáticas, constatou-se que a caatinga reduzirá a evapotranspiração em torno de 10% (373 mm ano<sup>-1</sup>), assumindo

apenas o efeito da  $[CO_2]$  (Figura 2). Estes resultados estão de acordo com inúmeras pesquisas, que mostram que o aumento da  $[CO_2]$  atmosférico diminuirá a condutância estomática das folhas das plantas (AINSWORTH & ROGERS, 2007; MAGLIULO et al., 2003). Entretanto, considerando as demais variáveis ambientais, o aumento da temperatura com a redução da umidade relativa do ar ocasionará um maior déficit de pressão do ar, que em conjunto com a diminuição dos níveis pluviométricos reduzirá em 30% da  $ET_{caat}$  ( $260 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2).

Para as culturas agrícolas, considerando projeções similares aos aplicados para a caatinga, sem incorporar aquelas para a precipitação, foram definidos três cenários. No primeiro, caracterizado como cenário atual, a evapotranspiração da cultura foi obtida com base nas normais climatológicas sem considerar as projeções futuras. No cenário 2, considerou-se o efeito do incremento de  $2,2^\circ\text{C}$  da temperatura na duração do ciclo e na  $ET_c$ , bem como a redução de 5,5% nos valores absolutos da umidade relativa do ar e do incremento do  $CO_2$  na  $ET_c$ , conforme citado por Lovelli et al. (2010), onde se prevê uma redução média de 22% da condutância estomática de uma folha bem iluminada ( $ri$ ) e um aumento de 4% no  $IAF_{ativo}$ . No cenário 3, assumiu-se apenas os efeitos da temperatura do ar na duração do ciclo da cultura e unicamente do incremento do  $CO_2$  na  $ET_c$ . Ambas as anomalias da temperatura e umidade relativa do ar referem-se às projeções do cenário B1, mais otimista, oriundas do modelo acoplado do Hadley Centre for Climate Prediction and Research, da Inglaterra (HadCM3). Para estas simulações foi considerado primeiro de janeiro como o início do ciclo da cana-de-açúcar. O período de fevereiro a junho e de agosto a dezembro como as épocas de plantio e colheita dos primeiro e segundo semestres do ano para cultura da videira. Para a manga, variedade Kent, considerando o período de comercialização em outubro, a aplicação de PBZ, que define a colheita, foi simulada para o mês de janeiro.

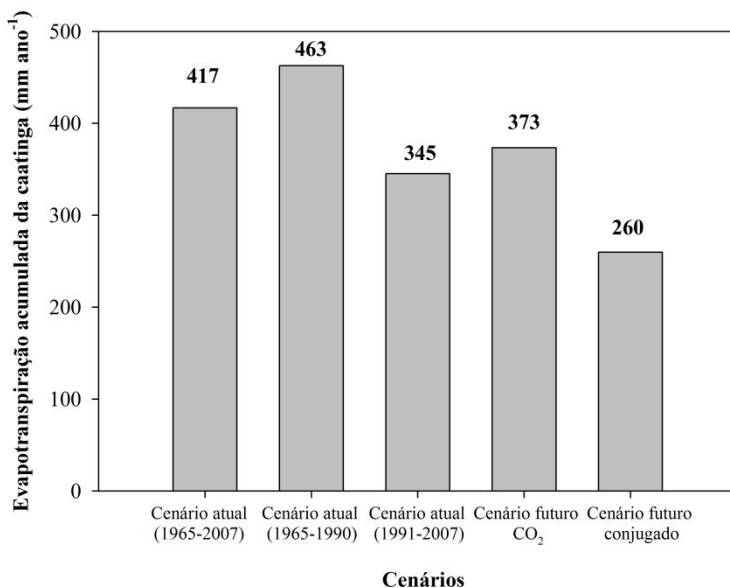


Figura 2. Evapotranspiração acumulada anual da caatinga (ETcaat) para diferentes cenários atual e futuros de mudanças climáticas.

### Efeitos das mudanças climáticas na produtividade econômica da água de irrigação

Para a análise da produtividade econômica da água de irrigação (PEAI, R\$ m<sup>-3</sup>) deve ser considerado o ganho econômico por unidade de área (GE, R\$ ha<sup>-1</sup>) e o requerimento bruto de água pela cultura, considerando as perdas inerentes ao sistema de produção, representado pela lâmina líquida de irrigação (LBI, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Assim, utiliza-se (Araya et al., 2011):

$$PEAI = \frac{GE}{LBI}$$

Os valores da LBI são determinados assumindo a eficiência total de aplicação de água (Ef, adimensional) e da lâmina líquida requerida no sistema de produção (m<sup>3</sup>):

$$LBI = \frac{LLI}{Ef}$$

No presente estudo, foram assumidos três grupos de produtores quanto aos níveis de eficiência de aplicação de água no sistema de produção. O primeiro grupo é composto por produtores em que as perdas de água por evaporação são reduzidas, o solo apresenta textura média, favorecendo a retenção de água próximo ao sistema radicular das plantas, e o sistema de irrigação possui eficácia na condução de água, resultando em uma eficiência total de 95%. O segundo grupo é composto por produtores em que as perdas por evaporação são mais expressivas, o solo apresenta textura em que promove mais drenagem ou escoamento superficial são mais efetivas, de modo que o conteúdo de água na profundidade efetiva do solo é menor, e o sistema de condução possui uma eficácia mediana, de modo que a eficiência total é em torno de 60%. O terceiro grupo de produtores as perdas de água devido a evaporação, tipo de solo e por causa da condução da água são significativas, resultando em uma baixa eficiência total de aplicação de água no sistema de produção, com valor de 40%.

Para a determinação dos valores de LLI foram considerados os valores acumulados de evapotranspiração das culturas (ETc), estimadas conforme já mencionado, e os valores de precipitação efetiva:

$$LLI = [ETc - P_m \cdot (1 - 0,25)] \cdot 10$$

em que, ETc e P<sub>m</sub> são a evapotranspiração das culturas e a precipitação mensais acumuladas (mm mês<sup>-1</sup>), o termo (1-0,25), refere-se a precipitação efetiva, assumindo 25% de perdas devido o escoamento superficial, e 10 é o fator de conversão de LLI de mm mês<sup>-1</sup> em m<sup>3</sup> mês<sup>-1</sup>.

Por meio dos valores de LBI também é possível determinar o potencial de área irrigável (PAI, ha) usando a expressão:



$$PAI = \frac{CHI}{LBI}$$

em que, CHI é a capacidade hídrica da região para irrigação ( $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ), assumindo um valor de  $44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , conforme os atuais valores utilizados neste segmento no Vale do Submédio São Francisco de acordo com a ANA (2003).

Finalmente, a eficiência econômica da água de irrigação pode ser avaliada em termo de produtividade de água da cultura determinada em função dos valores de LBI ou ETc, representando a eficiência real e máxima do uso de água pelas culturas, por meioda seguinte expressão:

$$PA_c = \frac{REND}{LBI \text{ ou } ETc}$$

em que, REND é o rendimento da cultura ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e LBI ou ETc, em  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

### **Bibliografia consultada**

Aeschlimann, U.; Nösberger, J.; Edwards, P.J. et al. Responses of net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange in managed grassland to long-term  $\text{CO}_2$  enrichment, N fertilization and plant species. *Plant, Cell and Environment*, v.28, p.823–833, 2005.

Amir, r.; Teitel, m.; schemer, l.  $\text{CO}_2$  enrichment in a fan-ventilated greenhouse under different ventilation modes. *ActaHorticulturae*, n.691, 10p., 2005.

Ainsworth, E. A.; Rogers, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising  $[\text{CO}_2]$ : mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment*, v.30, p.258–270, 2007.

Berkel, N.V. Injurious effects of high CO<sub>2</sub> concentrations on cucumber, tomato, chrysanthemum and gerbera. *Acta horticulturae*, n.162, 12p. 1984.

Bernacchi, C.J.; Kimball, B.A.; Quarles, D.R. et al. Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO<sub>2</sub>] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant Physiology*, v.143, p.134-144, 2007.

Bindi, M.; Fibbi, L.; Lanini, M.; Miglietta, F. Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitisvinifera*L.): I. Development and testing of the system for CO<sub>2</sub> enrichment. *European Journal of Agronomy*, v.14, p.135–143, 2001a.

Bindi, M.; Fibbi, L.; Lanini, M.; Miglietta, F. Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitisvinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO<sub>2</sub> concentrations. *European Journal of Agronomy*, v.14, p.145–155, 2001b.

Boodley, J.W. Gases. In: Boodley, J.W. *The commercial greenhouse*. 2ed. Albany, New York: Delmar Publishers, 1996. 612p.

Branco, R.B.F.; Goto, R.; Guimarães, V.F.; Carneiro Junior, A.G. et al. Efeitos da aplicação de dióxido de carbono na cultura do alface. *Horticultura Brasileira*, v.20, n.2, 2002.

Cararo, D.C.; Duarte, S.N. Injeção de CO<sub>2</sub> e lâminas de irrigação em tomateiro sob estufa. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 20, n. 3, p. 432-437, 2002.

Delgado, D. D. P. Comparative study using open-top growth chambers and ambient plots to evaluate the effect of chamber microclimate on sugarcane (*saccharumspontaneum* CV. US-67-22-2). 2007. 143p. Thesis of master's degree (Master of science). University of Puerto Rico Mayaguez Campus, Puerto Rico.

Dugas, W.A., Pinter Jr., P.J. The free-air carbon dioxide enrichment (FACE) cotton project: a new field approach to assess the biological consequences of global change, *Agricultural Forest Meteorology*, V.70, p.1–342, 1994.

Fleisher, D.H.; Timlin, D.J.; Reddy, V.R. Elevated carbon dioxide and water stress effects on potato canopy gas exchange, water use, and productivity. *Agricultural Forest and Meteorology*, v.148, p.1109-1122, 2008.

Ghannoum O, Von Caemmerer S, Ziska LH. The growth response of C4 plants to rising atmospheric CO<sub>2</sub> partial pressure: a reassessment. *Plant, Cell & Environment*, v.23, p.931–942, 2000.

Hanan, J.J. Carbon dioxide. In: Hanan, J.J. *Greenhouses: advanced technology for protected horticulture*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 1998. 684p.

Khavari-Nejad, R.A. Correlations between environmental CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentrations on photosynthesis and growth of tomato plants under controlled environments. *Acta Horticulturae*, n.162, 11p. 1985.

Hao, X.; Wang, Q.; Khosla, S. Responses of greenhouse tomatoes to summer CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Horticulturae*, n.797, 10p., 2008.

Heinemann, A.B.; Maia, A. de H.N.; Dourado-Neto, D. K.T. Ingram, GerritHoogenboom. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO<sub>2</sub> enrichment under different temperature regimes. *European Journal Agronomy*, v.24, p.52–61, 2006.

Hileman, D.R.; Huluk, G.; Kenjige, P.K. et al. Canopy photosynthesis and transpiration of field-grown cotton exposed to free-air CO<sub>2</sub>: enrichment (FACE) and differential irrigation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.70, p.189-207, 1994.

Hunsaker, D.J.; Hendrey, G.R.; Kimball, B.A.; Lewin, K.F.; Mauney, J.R.; Nagy, J. Cotton evapotranspiration under field conditions with CO<sub>2</sub> enrichment and variable soil moisture regimes. *Agricultural Forest Meteorology*, v.70, p.247–258, 1994.

Hunsaker, D.J.; Kimball, B.A.; Pinter Jr., P.J.; et al. CO<sub>2</sub> enrichment and soil nitrogen effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.104, p.85–105, 2000.

Kim, H. Y.; Lieffering, M.; Kobayashic, K. et al. Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research*, v.83 p.261–270, 2003.

Kim, S.H.; Reddya, V.R.; Baker, J.T. et al. Quantification of photosynthetically active radiation inside sunlit growth chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.126, p.117–127, 2004.

Kim, S.H.; Gitz, D. C.; Sicher, R. C. et al. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in

maize under elevated CO<sub>2</sub>. *Environmental and Experimental Botany*, v.61, p.224–236, 2007.

Kimball, B.A., Kobayashi, K., Bindi, M. Responses of agricultural crops to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Advances Agronomy*, v.77, p.293–368, 2002.

Lawson, T.; Craigon, J.; Black, C.R.; Colls, J.J.; Tulloch, A.-M.; Landon, G. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of potatoes (*Solanumtuberosum*) grown in open-top chambers. *Environmental Pollution*, v.111, p.479-491, 2001.

Lewin, K.F., Hendrey, G., Nagy, J., LaMorte, R.L. Design and application of a free air carbon dioxide facility. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.70, p.15–29, 1994.

Lyra, G. B. Estimativa da evapotranspiração e análise de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico em condições de casa-de-vegetação. 87p. Dissertação (Mestrado em Agronomia (Meteorologia Agrícola)) - Universidade Federal de Viçosa. 2002.

Manderscheid, R.; Burkart, S.; Bramm, A.; Weigel, H.J. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *European Journal Agronomy*, v.19, p.411-/425, 2003.

Mansfield, T.A.; Murray, A.J.S. Pollutants generated in greenhouses during CO<sub>2</sub> enrichment. *ActaHorticulturae*, n.162, 8p., 1985.

Magliulo, V., Bindi, M., Rana, G. Water use of irrigated potato (*Solanumtuberosum* L.) grown under free air carbon dioxide enrichment in central Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environmental*, v.97, p.65–80, 2003.

Moore, B. D., Cheng, S. H., Sims, D., and Seemann, J. R. The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Plant Cell Environmental*, v.22, p.567–582, 1999.

Nagy, J. Lewin, K. F., Hendrey, G. R. et al. FACE facility CO<sub>2</sub> concentration control and CO<sub>2</sub> use in 1990 and 199. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.70, p.31-48, 1994.

Ottman, M.J.; Kimball, B.A.; Pinter Jr.; P.J.,Wall; G.W.; Vanderlip, R.L.; Leavitt, S.W.; LaMorte, R.L.; Matthias, A.D.; Brooks, T.J. Elevated CO<sub>2</sub> increases sorghum biomass under drought conditions. *New Phytologist*, v.150, n.2, p.261–273, 2001.

Pan, H.; Zhang, Q.; Liu, Q. ; Liang, S.; Kang, H. Effects of different CO<sub>2</sub> enrichment programs during the day on production of cut roses. *ActaHorticulturae*, n.776.\, 10p., 2008.

Reddy, V.R.; Wang, Z.; Reddy, K.R. Growth responses of cotton to aldicarb and temperature.*Environmental and Experimental Botany*, v.38, p.39-48, 1997.

Reddy, K. R.; Hodgesl, H. F.; Read, J. J.; Mckinion, J. M.; Baker, J. T.; Tarpley, L.; Eddy, V. R. R. Soil-plant-atmosphere-research (SPAR) facility: a tool for plant research and modeling. *Biotronics*, v.30, p.27-50, 2001.

Robles, W.G.R. Dióxido de carbono via fertirrigação em batateira (*Solanumtuberosum* L.) sob condições de campo. 2003. 175p. Tese (doutorado em irrigação e drenagem). Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo.

Saxes, H.; Christensen, O. V. Effects of carbon dioxide with and without nitric oxide pollution on growth, morphogenesis and production time of potted plants. *Acta horticulturae*, n.162, 8p., 1985.

Triggs, J.M., Kimball b, B.A., Pinter Jr, P.J., et al. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment effects on the energy balance and evapotranspiration of sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.124 p.63–79, 2004.

Timlin, D.; Fleisher, D.; Kim, S.H. et al. Evapotranspiration Measurement in Controlled Environment Chambers: A Comparison between Time Domain Reflectometry and Accumulation of Condensate from cooling Coils. *Agronomy Journal*, v.99, p.166–173, 2007.

Urban, L.; Six, S.; Barthélémy, L.; Bearez, P. Effect of elevated CO<sub>2</sub> on leaf water relations, water balance and senescence of cut roses. *Journal Plant Physiology*, v.159. p.717–723, 2002.

Vu, J.C.V. Acclimation of peanut (*Arachishypogaea* L.) leaf photosynthesis to elevated growth CO<sub>2</sub> and temperature. *Environmental and Experimental Botany*, v.53, p.85–95, 2005.

Yang, L.; Huang, J.; Yang, H. et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on dry matter

production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, v.98, p.12–19, 2006.

Wall, G.W., Brooks, T. J., Adam, N. R., Cousins, A. B., Kimball, B. A., Pinter, P. J. Jr., LaMorte, R. L., Triggs, J., Ottman, M. J., Leavitt, S. W., Matthias, A. D., Williams, D. G., and Webber, A. N. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> improved Sorghum plant water status by ameliorating the adverse effects of draught. *New Phytologist*, v.152, p.231–248, 2001.

Wand SJE, Midgley GF, Jones MH, Curtis PS. Responses of wild C4 and C3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. *Global Change Biology*, v.5, p.723–741, 1999.

Wolting, H.G.; Remortel, E.A.M. van; Berkel, N. van. Air quality in greenhouses with and without CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Horticulturae*, n.174, 10p., 1985.

Wu, D.X., Wang, G.X. Interaction of CO<sub>2</sub> enrichment and drought on growth, water use, and yield of broad bean (*Vicia faba*). *Environmental and Experimental Botany*, v.43, p.131–139, 2000.

Wu, D.X.; Wang, G.X.; Bai, Y.F.; Liao, J.X. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.104, p.493–507, 2004.