



**JOÃO PAULO PENNACCHI**

**MODELOS TEÓRICOS DE RESPOSTAS  
FISIOLÓGICAS NO CONTEXTO DO  
ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DE CANA-  
DE-AÇÚCAR**

**LAVRAS – MG**

**2013**

**JOÃO PAULO PENNACCHI**

**MODELOS TEÓRICOS DE RESPOSTAS FISIOLÓGICAS NO  
CONTEXTO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa

**LAVRAS – MG**

**2013**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Pennacchi, João Paulo.

Modelos teóricos de respostas fisiológicas no contexto do zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar / João Paulo Pennacchi. – Lavras : UFLA, 2013.

100 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa.

Bibliografia.

1. Fotossíntese. 2. Mudanças climáticas. 3. Eficiência do uso da água. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 584.92041

**JOÃO PAULO PENNACCHI**

**MODELOS TEÓRICOS DE RESPOSTAS FISIOLÓGICAS NO  
CONTEXTO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Fisiologia Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de Fevereiro de 2013

Dr. Luiz Edson Mota de Oliveira UFLA

Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi UFLA

Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2013**

*A todos aqueles que direta, ou indiretamente, contribuíram para mais uma vitória e cumprimento de mais uma etapa de minha formação, pessoal e profissional.*

*Especialmente à minha família, amigos, colegas de trabalho e ao meu orientador, que me sustentaram e acompanharam em todos os momentos.*

*A Deus, por estar sempre a frente pra me guiar, ao meu lado pra me acompanhar e atrás de mim para me guardar.*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal (PPGFV) pela oportunidade concedida e pela confiança.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Aos professores do PPGFV pelos conhecimentos transmitidos.

Ao meu orientador Dr. João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa pelo profissionalismo, amizade, compreensão, segurança, prontidão e oportunidades oferecidas.

Aos servidores do departamento pelos serviços prestados e amizade.

Aos colegas de mestrado pelo companheirismo e ensinamentos.

Aos membros da banca pelo auxílio através de suas experiências e conhecimentos.

Aos colegas do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Funcionamento de Ecossistemas (LEFE) pelo auxílio e trabalho.

Aos amigos da UFLA e de moradia pela paciência e coleguismo.

À minha família pela base e criação que culminaram com a vontade de vencer sempre.

*“Para onde quer que voltemos nossos olhos - grãos, raízes, fibras, frutas, legumes, pastagens, florestas - encontramos o testemunho formidável do trabalho dos engenheiros agrônomos, estes heróis que, somando sua luta à dos agricultores brasileiros, construíram o Brasil, hectare por hectare, semente por semente, décadas e décadas de anônima dedicação.”*

Roberto Rodrigues

## RESUMO

A preocupação com as alterações climáticas globais e seus prognósticos para a agricultura são temas que têm atraído a atenção de pesquisadores. Diante disso, este trabalho objetivou desenvolver um modelo teórico do comportamento de parâmetros fisiológicos, a eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) e a fotossíntese (A) em relação a componentes climáticos como temperatura do ar (T) e água disponível no solo (ADS), para a cultura da cana-de-açúcar. Para isso, baseou-se em trabalhos anteriores com a cultura da cana ou com outras gramíneas C<sub>4</sub> em diferentes condições de temperatura e disponibilidade de água. A partir desses dados, formulou-se o modelo teórico. Esse modelo foi inicialmente aplicado a condições históricas de temperatura e água disponível no solo, para três localidades diferentes, na região da Bacia do Rio Grande (Areado-MG, Ribeirão Preto-SP e Uberaba-MG), a fim de verificar sua sensibilidade a alterações climáticas. Posteriormente, esse modelo foi validado através da correlação entre os parâmetros fisiológicos preditos pelo modelo e dados históricos de um índice de sensoriamento remoto (NDVI) para cada uma das áreas, no período entre 2002-2011. Finalmente esses modelos foram utilizados para prever o comportamento teórico dos parâmetros fisiológicos em cenários climáticos futuros propostos. Verificou-se que os modelos apresentam sensibilidade espaço-temporal e respondem às alterações, em longo prazo, das condições climáticas e dos locais de estudo.

Palavras chave: Fotossíntese. Eficiência do uso da água. Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

Concerns about global climate change and the predictions to agriculture are issues that have attracted the attention of researchers. Therefore, this study aimed to develop a theoretical model of the behavior of physiological parameters, the intrinsic water use efficiency (IWUE) and photosynthesis (A) in relation to climatic components as air temperature (T) and soil water (SWR), to the sugarcane culture. This model was based on previous works with the cultivation of sugarcane or other C<sub>4</sub> grasses in different conditions of temperature and water availability. From these data, it was formulated the theoretical model. This model was initially applied to historical conditions of temperature and water availability in the soil for three different locations in the region of the Rio Grande Basin (Areado-MG, Ribeirão Preto-SP and Uberaba-MG), to verify its sensitivity to climate changes. Later, this model was validated by the correlation between physiological parameters predicted by the model and historical data from a remote sensing index (NDVI) for each of the areas in the period 2002-2011. Finally, these models were used to predict the theoretical behavior of physiological parameters in future proposed climate scenarios. It was found that the models exhibit sensitivity spatiotemporal and respond to changes in long-term climatic conditions and places of study.

Keywords: Sugarcane. Photosynthesis. Water use efficiency. Climate change.

**LISTA DE ABREVIATURAS**

abr.	Abril
ago.	Agosto
dez.	Dezembro
Dr.	Doutor
Dra.	Doutora
fev.	Fevereiro
jan.	Janeiro
jul.	Julho
jun.	Junho
mai.	Maió
mar.	Março
n.	Número
nov.	Novembro
out.	Outubro
p.	Páginas
set.	Setembro
v.	Volume

**LISTA DE SIGLAS**

BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
LEFE	Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Funcionamento de Ecossistemas
MG	Estado de Minas Gerais
PPGFV	Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal
SP	Estado de São Paulo
UFLA	Universidade Federal de Lavras

### LISTA DE SÍMBOLOS

°	Graus
°C	Graus Celsius
μmol	Micro mol
'	Minuto
%	Porcento
''	Segundo
A	Fotossíntese/Photosynthesis
ADS	Água disponível no solo
ATP	Adenosina tri fosfato
ATS	Água total no solo
C <sub>3</sub>	Plantas que formam uma molécula de 3 carbonos como o primeiro composto estável na fotossíntese
C <sub>4</sub>	Plantas que formam uma molécula de 4 carbonos como o primeiro composto estável na fotossíntese
CC	Capacidade de campo
CO <sub>2</sub>	Molécula de gás carbônico
EIUA	Eficiência intrínseca do uso da água
f <sub>c</sub>	Fator de correção de volume
H <sub>2</sub> O	Molécula de água
ha	Hectare
Km	Kilômetro
IWUE	Intrinsic Water Use Efficiency
l <sub>raiz</sub>	Comprimento da raiz
l	Litro
m	Metro
MJ	Mega Joule
NDVI	Normalized difference vegetation index
O	Oeste
O <sub>2</sub>	Molécula de Oxigênio
PMP	Ponto de murcha permanente
R	Coefficiente de correlação de Pearson
R <sup>2</sup>	Ajuste de equação
RuBisCO	Ribulose-1,5-bifosfato carboxilase oxigenase
S	Sul
SWR	Soil water relation
T	Temperatura/Temperature

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1	Etapa 1: Coleta de dados literários de interesse .....	25
3.2	Etapa 2: Áreas de estudo e dados meteorológicos.....	26
3.3	Etapa 3: Balanço de água no solo.....	28
3.4	Etapa 4: Elaboração dos modelos teóricos.....	30
3.4.1	Adequação da fotossíntese (A) em função da temperatura (T)...	30
3.4.2	Adequação da eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) em função da temperatura (T).....	32
3.4.3	Adequação da fotossíntese (A) em função da água disponível no solo (ADS).....	34
3.4.4	Adequação da eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) em função da água disponível no solo (ADS).....	35
3.5	Etapa 5: Proposição de cenários futuros.....	38
3.6	Etapa 6: Validação do modelo.....	43
3.7	Etapa 7: Análise de dados.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Sensibilidade dos modelos teóricos propostos.....	45
4.2	Exercício de validação.....	55
4.3	Análise das respostas dos parâmetros fisiológicos frente a alterações nas condições ambientais em cenário futuros.....	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
	ANEXO 1.....	87
	ANEXO 2.....	89

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção da produção vegetal frente a riscos climáticos, de forma sustentável, tem sido destacada como um dos principais desafios da agricultura do século XXI. Dentro dessa problemática, vários estudos foram realizados na última década com o objetivo de prever modificações nas áreas de cultivo e na produção agrícola, frente a alterações no clima, sobretudo considerando a elevação da temperatura média do ar e a redução da pluviosidade. De maneira geral, os resultados apontam o grande potencial que as alterações nos padrões espaço-temporais históricas dessas variáveis possuem em causar profundas modificações no panorama agrícola atual.

A resposta das plantas cultivadas ao clima é, geralmente, definida em função de seus limites de temperatura e precipitação, mínimas, máximas e ótimas, a partir dos quais se tem o nicho ideal para produção sustentável de cada cultura. Considerando as previsões realizadas, com essa abordagem, para algumas culturas de importância para o Brasil observa-se que em geral existe uma tendência de culturas tropicais terem sua área reduzida e migração para latitudes maiores, além da possível necessidade de irrigação em algumas áreas onde atualmente é feito cultivo de sequeiro, conforme a temperatura do ar se eleva e a precipitação anual é reduzida. Esse é o caso da cana-de-açúcar, uma cultura de elevado valor socioeconômico e ambiental para o Brasil, e que ocupa vastas áreas de cultivo, especialmente na região Sudeste.

Na região Sudeste do Brasil, a cana é cultivada, tradicionalmente, na Bacia hidrográfica do Rio Grande, onde se destaca como uma das culturas que mais gera renda direta e indireta para a região. Diante disso, compreender como será o comportamento da cana em face às alterações climáticas nessa região, com maior representação da realidade, é de importância estratégica para estabelecer ações de manejo que permitam reduzir a vulnerabilidade da cadeia

produtiva sucroalcooleira a riscos climáticos, como ondas de calor e eventos extremos de seca.

Para compreender melhor como será o comportamento da cana frente a variações no clima e/ou eventos extremos, deve-se considerar que como todo vegetal, a cana possui capacidade de responder de maneira plástica a variações ambientais, adequando-se às diferentes condições de cultivo. Dentre as formas de ajuste comumente utilizadas pelas plantas (alterações anatômicas, morfológicas e fisiológicas, por exemplo), aquelas que visam manter um balanço favorável de carbono e de água merecem destaque. Um balanço favorável de carbono significa que, durante um ciclo da cultura, a quantidade de carbono fixada pela fotossíntese é maior do que a perda pela respiração total da planta. Já para a água, um balanço favorável significa que a planta é capaz de ajustar suas relações com o solo e a atmosfera de forma a não perder mais água pela transpiração que aquela absorvida pelas raízes. Diante disso, a eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) é uma característica importante a ser observada como capacidade de ajuste dos vegetais às variações ambientais, pois agrega a capacidade da planta em manter ganho de carbono com um aproveitamento eficiente da água, o que também pode ser um indicativo de produção sustentável frente a condições adversas de cultivo.

Dessa maneira, uma abordagem das variáveis fisiológicas da cana-de-açúcar voltada para a capacidade de ajuste destas às situações de adversidade ambiental e a implementação dessas características aos modelos agrometeorológicos conhecidos pode apresentar um novo cenário para o zoneamento climático-fisiológico da cultura. Como mencionado anteriormente, esse novo cenário permite incorporar a plasticidade das plantas e criar representações mais realistas para a análise do comportamento da cultura, colaborando para a segurança alimentar e diminuindo os riscos socioeconômicos

e ambientais de regiões mais vulneráveis a alterações climáticas ou ocorrência de eventos extremos.

Diante do exposto, objetivou-se propor uma estrutura de abordagem das respostas fisiológicas de fotossíntese líquida (A) e EIUA da cana frente a variações de temperatura e disponibilidade de água no solo, bem como desenvolver metodologia para incorporação dessas características a modelos agroclimáticos. Com esse escopo, pretendeu-se: i) desenvolver modelos teóricos para descrever a adequação de variáveis fisiológicas, em nível foliar, da cana-de-açúcar; ii) aplicar esses modelos para estimar as limitações sazonais impostas pela temperatura e pela disponibilidade de água no solo na fotossíntese e na EIUA em áreas de cana na Bacia do Rio Grande; iii) verificar a sensibilidade dos modelos em descrever esses padrões de adequação fisiológica em cenários futuros de alterações climáticas; iv) verificar como os modelos propostos para a escala de folha se comportam em escalas maiores através de correlações com valores observados de NDVI.

Por fim, espera-se contribuir para o avanço das pesquisas no sentido de incorporar elementos fisiológicos em análises climatológicas da vegetação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

As alterações dos padrões de consumo, o aumento da população, as alterações climáticas globais e a necessidade do uso consciente dos recursos naturais têm alterado o panorama da atividade agrícola mundialmente. Nos próximos anos, serão vários os desafios a serem superados pelos agricultores e cientistas da área agrícola visando, sobretudo, o fornecimento de alimentos, água, fibras e energia de forma sustentável, socialmente e ambientalmente justa (BOGARDI et al., 2012; IIASA, 2010; MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005; THORNTON, 2012; TSCHARNTKE et al., 2012), para uma população que deve atingir 9 bilhões de pessoas até 2050 (FAO, 2009; GODFRAY et al., 2010).

Considerando esses desafios, algumas espécies cultivadas assumem um papel de destaque, principalmente aquelas que são capazes de se inserir em diferentes cadeias produtivas e, dessa forma, suprir mais de uma das necessidades da crescente população mundial. Isso ocorre, por exemplo, com a cultura da cana-de-açúcar que é capaz de fornecer uma fonte nutricional de alta energia (o açúcar), além de uma fonte de combustível renovável e alternativa ao uso de combustíveis fósseis (o etanol). Em adição a isso, a cana se destaca pela alta produção de biomassa, o que resulta em fixação de uma grande quantidade de carbono atmosférico, possibilitando também, a seus produtores o uso de créditos relativos ao seqüestro de carbono atmosférico (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008).

A cana-de-açúcar é uma planta da família *Poaceae*, tendo o seu centro de origem na região do Sudeste da Ásia. Seu gênero é o *Saccharum* sendo a usada no Brasil um híbrido multiespecífico, chamado *Saccharum spp.* É uma cultura historicamente e amplamente difundida no Brasil, sendo que o país é o maior produtor mundial, seguido de longe por Índia, China e outros

(FAO, 2011). A safra de 2011/2012 foi de 642 milhões de toneladas produzidas em uma área de 8442,8 mil hectares, sendo 48% do total destinado à produção de açúcar e 52% para álcool. Além do uso para alimentação e como fonte de energia, os subprodutos da cana também são muito utilizados, destacando ainda mais as propriedades da cultura. Tais subprodutos são: a torta de filtro e a vinhaça, ricos em fósforo e potássio, respectivamente, e reutilizados na adubação de áreas agrícolas; fibras que podem ser utilizadas para fins artesanais; e a biomassa seca que pode ser queimada e transformada em biogás. Os maiores estados produtores, em termos da área total, são: São Paulo (52,8%), Minas Gerais (8,8%) e Goiás (8,0%) (CONAB, 2012).

Grande parte da área cultivada com cana no Brasil pertence à bacia do Rio Grande que abrange o norte do estado de São Paulo (a área de maior produção de cana do estado), sudoeste de Minas Gerais e a divisa de Minas Gerais e Goiás. Nota-se que a região da bacia do Rio Grande é uma área com grandes extensões de cana-de-açúcar e grande presença de usinas canavieiras, caracterizando-se como uma importante zona sucroalcooleira a nível nacional (CONAB, 2012).

Quanto às condições climáticas gerais para a cultura, a cana-de-açúcar ocorre entre a latitude 36,7° N e 31,0° S, do nível do mar até 1000 metros de altitude. Em relação à pluviosidade, um total de chuva entre 1100 e 1500 mm é adequado se a distribuição for ideal, abundante nos meses de crescimento vegetativo seguido por um período de menor pluviosidade na fase de amadurecimento. Para a temperatura as condições ideais variam de acordo com a fase fenológica, porém, basicamente as faixas são entre 20 e 35°C. Quanto à umidade relativa, alta umidade (80-85%) favorece um rápido alongamento do colmo da cana durante o período de crescimento e um valor moderado (45-65 %) é favorável durante a fase de amadurecimento. Quanto ao ambiente radiativo,

uma irradiância de 18 a 36 MJ.m<sup>-2</sup> é o requerido (SUGARCANE CROPS, 2012).

A cana-de-açúcar é uma espécie C<sub>4</sub>, sendo capaz de fixar grandes quantidades de carbono por área foliar em comparação com outras culturas (em especial as C<sub>3</sub>) em condições ideais de cultivo, devido, principalmente, à anatomia Kranz de suas folhas e aos mecanismos de concentração de CO<sub>2</sub> nas células da bainha do feixe onde o carbono é efetivamente fixado. Apresenta também menores taxas de fotorrespiração, favorecendo o balanço positivo de carbono, a produção de biomassa e a alocação desta aos órgãos de reserva na planta (RAGHAYENDRA; SAGE, 2010). Porém, a alta produção de biomassa relacionada à fixação de carbono não garante alta produção de sacarose. Dessa forma, a alocação dos fotoassimilados irá definir como a fotossíntese líquida irá se relacionar com a produção de sacarose.

Apesar de suas características fisiológicas, que garantem capacidade produtiva em condições mais extremas de ambiente, o cultivo da cana-de-açúcar pode ser influenciado pelas alterações climáticas (VU; ALLEN JR, 2009). Estudos realizados por Marin et al. (2009) demonstram tendência de alteração na produtividade da cana-de-açúcar na região Sudeste como resposta a alterações nos padrões climáticos. Dessa maneira, não só a produtividade da cultura é afetada, mas, toda a economia da região dependente do cultivo da cana.

Em geral, as alterações climáticas já têm trazido conseqüências para a agricultura. Alguns estudos apontam perdas de produção e redução das áreas de cultivo devido, principalmente, ao aumento da temperatura média global (CERRI et al., 2007; KERR, 2005) e das alterações do padrão de distribuição de chuvas (HAYLOCK et al., 2006). Hegerl, Hanlon e Beierkuhnlein (2011) destacam que a influência das alterações climáticas na agricultura pode ocorrer, basicamente, de duas formas: através de eventos extremos ou por alterações graduais e lentas no clima.

Os eventos extremos caracterizam-se por uma alteração brusca dos padrões de um ou mais fatores formadores do clima (GUTSCHIICK; BASSIRIRAD, 2003) e são mais difíceis de serem previstos. Por isso, potencialmente, podem causar danos mais severos aos cultivos, dependendo de sua intensidade e duração (DE BOECK et al., 2011). Já uma alteração gradual dos parâmetros climáticos pode ser mais facilmente prevista, por seguir uma tendência de mudança, e seus efeitos podem ser mais bem controlados por meio de técnicas de cultivo e manejo (SMITH, 2011).

Frente a esses fatos, diversos estudos de zoneamento agroclimatológico têm apontado que a alteração nos padrões climáticos de uma região poderá alterar sua aptidão para algumas atividades agrícolas (GOUVÊA et al., 2009, JARVIS et al., 2012, MARIN et al., 2009, WALDHEIM et al., 2006). Em geral, esses estudos levam em conta as faixas de temperatura e pluviosidade ideais para as culturas analisadas, sem, contudo, considerar a capacidade de ajuste das plantas às variações ambientais. Normalmente, essas faixas ideais são definidas pelas características do material genético utilizado, porém, em muitos casos, mesmo em faixas não ideais, a produtividade em campo não é diminuída significativamente.

Isso ocorre porque as plantas dispõem de diversos mecanismos para isolar ou atenuar os efeitos desfavoráveis de alterações no ambiente em seu comportamento. Esses mecanismos podem ser de longo e curto prazo e podem estar relacionados a alterações morfológicas, anatômicas e fisiológicas (AHMAD; PRASAD, 2012).

Dentre as condições do meio que podem afetar as plantas, Waraich, Ahmad e Ashraf (2011) e Silva et al. (2008), apontam que o estresse hídrico, resultado da combinação da baixa disponibilidade de água e da alta temperatura, é o fator que mais afeta o crescimento e desenvolvimento de plantas e diminui a produtividade de cultivos agrícolas. Frente a condições não ideais de

temperatura e disponibilidade de água no solo, as plantas podem, por exemplo, apresentar alteração de seu comportamento fotossintético. Características fisiológicas relacionadas às trocas gasosas (taxa fotossintética, respiratória e evapotranspiratória) das folhas são, em geral, altamente sensíveis à condição de deficiência hídrica, permitindo analisar e compreender melhor as alterações causadas na planta por condições ambientais adversas (CARLIN; SANTOS, 2009, ENDRES et al., 2010, GILBERT; ZWIENIECKI; HOLBROOK, 2011, GRAÇA et al., 2010, KOONJAH et al., 2006).

Dwyer et al. (2007), Lawlor e Teraza (2009), Ripley, Frole e Gilbert (2010) e Sage e Kubien (2007) ressaltam o papel do movimento estomático como acoplador do metabolismo do carbono e das relações hídricas das plantas. Ao controlar a saída de água da planta, os estômatos regulam também a entrada de gás carbônico e alteram as trocas gasosas nas folhas. O acoplamento desses dois processos pode ser estudado, no curto prazo, através da eficiência intrínseca do uso da água (EIUA), que se traduz pela razão entre a taxa fotossintética líquida e a condutância estomática, e indica, em termos gerais, a restrição causada à fotossíntese pelo controle estomático. Dessa forma, a capacidade de manter valores de EIUA mais elevados pode ser um indicativo de ajustes fisiológicos em plantas sob condições adversas.

De acordo com Sage e Coleman (2001), a fotossíntese pode ser limitada por fatores estomáticos e não-estomáticos e pelas condições do ambiente. Em um ciclo diário, para plantas  $C_3$  e  $C_4$ , são três os principais fatores que limitam a fotossíntese. Inicialmente, a energia radiante proveniente do sol, que, ativa a fase fotoquímica da fotossíntese e produz energia e poder redutor que serão consumidos na fase bioquímica. Posteriormente, pela atividade do complexo enzimático responsável pela fixação de carbono, onde a principal enzima é a ribulose-1,5-bifosfato-carboxilase-oxigenase (RUBISCO). Finalmente, essa restrição pode estar relacionada à diminuição das concentrações das moléculas

intermediárias do Ciclo de Calvin, como as trioses-fosfato e o ribulose-bisfosfato.

Especificamente, as condições de altas temperaturas e baixa disponibilidade de água no solo podem afetar as várias etapas da fotossíntese e atuar em cada um dos pontos de limitação, estomáticos e não-estomáticos. A baixa disponibilidade de água no solo pode afetar a regeneração da ribulose-bisfosfato (BOTA; MEDRANO; FLEXAS, 2004), diminuir a atividade da RUBISCO (PARRY et al., 2002), o rendimento do fotossistema II (HE, WANG; LIANG, 1995). Pinheiro e Chaves (2011) também confirmam essas influências. Um aumento da temperatura, por sua vez, pode influenciar a ativação e a atividade da RUBISCO (PRASAD et al., 2004; SALVUCCI; CRAFTS-BRANDNER, 2004), caso ultrapasse os limites ideais de temperatura para a enzima. Causa também alteração na solubilidade e difusão dos gases, como o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{O}_2$ , alterando a eficiência fotossintética (HO et al., 2012; KALDENHOFF, 2012; LEA; LEEGOOD, 1999). Além disso, o aumento de temperatura tem influência sobre o fotossistema II, uma vez que pode alterar a fluidez da membrana do tilacóide (HAVAUX, 1992; MARUTANI et al., 2012).

Diante disso, relacionar as alterações dos parâmetros fisiológicos da cana-de-açúcar à alteração de medidas de crescimento da cultura pode auxiliar na compreensão das reais conseqüências das alterações das condições ambientais ao cultivo. Dessa forma, a análise de parâmetros como o índice de área foliar (IAF) e a taxa assimilatória líquida (TAL) podem auxiliar a inferir sobre o rendimento da fixação de carbono na cana-de-açúcar. Além disso, a compreensão da partição dos compostos carbônicos nas diferentes partes da planta, juntamente com os fatores acima citados podem fornecer uma relação mais realista entre condições ambientais, parâmetros fisiológicos e produtividade da cultura.

Porém, o balanço de carbono na planta não está relacionado apenas à fotossíntese, mas, também, à respiração. Estes são fenômenos que ocorrem em períodos e locais diferentes nas plantas: a fotossíntese ocorre em tecidos verdes jovens (predominantemente folhas) e só acontece na presença de luz; a respiração ocorre em todos os tecidos vivos das plantas (raiz, caule, ramos e folhas - tanto as fotossinteticamente ativas como as não-ativas), durante todo o tempo (CIESLIK; OMASA; PAOLETTI, 2009). A respiração na planta é, teoricamente, dividida em duas: a de manutenção e a de crescimento. A respiração de manutenção é representada pela quantidade de compostos carbônicos consumidos através da respiração, gerando ATP para manter o metabolismo da biomassa já existente na planta. Já a respiração de crescimento é representada pela quantidade de compostos carbônicos consumidos através da respiração, gerando ATP para a formação de novas moléculas que irão compor uma nova biomassa, alocada em alguma parte da planta (FARRAR, 2006).

Da mesma maneira que para a fotossíntese, alterações nos padrões das condições ambientais causarão alteração na respiração total da planta, porém, essa relação não é muito simples e direta e se diferencia entre espécies e depende, principalmente, do estágio fenológico da planta. Graça et al. (2010) e Pereira et al. (2009) encontraram diminuição nas taxas respiratórias em condições de baixa disponibilidade de água para a cultura da cana-de-açúcar. Já a temperatura aparece como sendo mais importante na alteração da taxa respiratória em plantas e a relação é a de que um aumento na temperatura causa aumento instantâneo na respiração da planta (SEARLE et al., 2011).

Por ser a respiração uma medida mais complexa que a fotossíntese, alguns resultados experimentais são discordantes, porém, Mittler (2006), resume que, de maneira geral, um aumento na temperatura causa aumento na respiração, a baixa disponibilidade de água causa diminuição e as duas condições em conjunto também levam a um aumento da respiração total da planta.

Do ponto de vista da transpiração, um aumento da temperatura causa um aumento na quantidade de vapor de água presente no meio celular e, por conseqüência, na câmara sub-estomática, podendo aumentar a diferença entre as pressões de vapor de água interna da planta e externa, aumentando a transpiração. Baixas concentrações de água no solo, por sua vez, diminuem o fluxo de água do solo para as folhas, causando murcha das células guarda dos estômatos e fechamento estomático, diminuindo a condutância estomática ao vapor de água e diminuindo a transpiração (LOVELLI et al., 2012).

Em relação à temperatura, inicialmente, a eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) aumenta com o aumento da temperatura, motivado por um aumento na fotossíntese líquida maior que o aumento da transpiração. Ao alcançar a faixa ótima de temperatura, alcança-se o ponto máximo de EIUA. Em temperaturas superiores à faixa ideal, o balanço de carbono passa a diminuir (diminuição da fotossíntese e aumento da respiração) e a transpiração passa a aumentar consideravelmente, causando queda da EIUA.

Para a quantidade de água no solo, o comportamento é diferente. Em um solo com alta disponibilidade de água, o fluxo de água raiz-parte aérea-folha ocorre normalmente, sendo que a condutância estomática é alta tanto para o gás carbônico, quanto para o vapor de água, devido à abertura estomática. Com a redução do teor de água no solo, os estômatos tendem a se fechar, diminuindo a condutância para ambos os gases. Dessa forma, a transpiração é diminuída rapidamente, porém, a fotossíntese ainda é mantida em níveis altos, devido à alta concentração de carbono nos tecidos internos das folhas, sendo esse o ponto de máxima EIUA. Porém, em um aumento ainda mais pronunciado da restrição hídrica no solo, os estômatos diminuem ainda mais sua condutância aos gases, a transpiração diminui, porém, a fotossíntese é comprometida pela falta de substrato (gás carbônico) nas células da folha, decaindo a EIUA.

Diante do exposto, a análise das características A e EIUA permitem inferir sobre os balanços de carbono e água nas plantas de cana-de-açúcar. O balanço de carbono (basicamente representado pela fotossíntese bruta menos a respiração total) está intimamente ligado à produção de biomassa da planta e à produtividade do cultivo (BLUM, 2009; MALHI, 2012). Um balanço positivo de carbono permite à planta investir em novas estruturas e alocá-las, providenciando crescimento e aumento de matéria seca. O balanço de água (basicamente representado pela água absorvida pelas raízes menos a água perdida pela transpiração), por sua vez, se relaciona ao balanço de carbono pela influência no movimento estomático na entrada de carbono na planta. Além disso, um controle do potencial hídrico da planta é fundamental para a manutenção do metabolismo e bom desenvolvimento do indivíduo. Como citado, alterações das condições ambientais (temperatura e disponibilidade de água no solo, no caso deste trabalho), acarretam alterações nos balanços de água e carbono na planta e interferem na produtividade e viabilidade de culturas no campo (MEDYIGY et al., 2010; ZHAO; RUNNING, 2010).

Por isso, pode-se dizer que a inclusão de respostas fisiológicas como A e EIUA às variações do ambiente nos modelos agrometeorológicos de nicho permitirão uma melhor representação do comportamento da cultura da cana-de-açúcar, bem como, da sua adequação aos novos cenários climáticos. Isso permitirá uma maior confiabilidade do modelo, aproximando-se o comportamento predito do observado (HELAOUËT; BEAUGRANG, 2009; KEARNEY; PORTER, 2009), permitindo maior segurança nas estimativas do zoneamento. Além disso, esses modelos podem ser adequados para comportamentos das mais diversas culturas agrícolas, levando-se em conta as suas características metabólicas específicas, principalmente em relação aos processos de trocas gasosas.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em sete etapas. Na primeira etapa foi feita uma coleta de informações presentes na literatura para a construção de uma base de dados a ser utilizada para o desenvolvimento dos modelos teóricos de comportamento de A e EIUA em função de temperatura e água no solo. Após, na segunda etapa, foram definidas as áreas de estudo e obtidas séries históricas dos dados meteorológicos de cada uma das áreas de estudo. A terceira etapa consistiu no desenvolvimento de um modelo de armazenamento e retirada de água do solo, e evapotranspiração da cultura, visando transformar os dados de pluviosidade acumulada em dados de água disponível no solo. Na quarta etapa, foram definidos os modelos teóricos de adequação de duas variáveis fisiológicas, eficiência intrínseca de uso da água e fotossíntese líquida, em função da temperatura do ar e conteúdo de água no solo para a cultura da cana-de-açúcar. Tais modelos foram alimentados com os dados históricos no período de 2002–2011, para cada uma das áreas de estudo. Na quinta etapa, definiram-se os cenários climáticos futuros a serem estudados e os modelos foram aplicados a cada um deles, em cada uma das áreas de estudo. Na sexta etapa, os modelos foram validados através de uma análise de dados históricos de um índice de vegetação, obtido por sensoriamento remoto. Finalmente, a sétima etapa consistiu da análise de dados. A figura 1 apresenta a estrutura simplificada da abordagem metodológica utilizada.

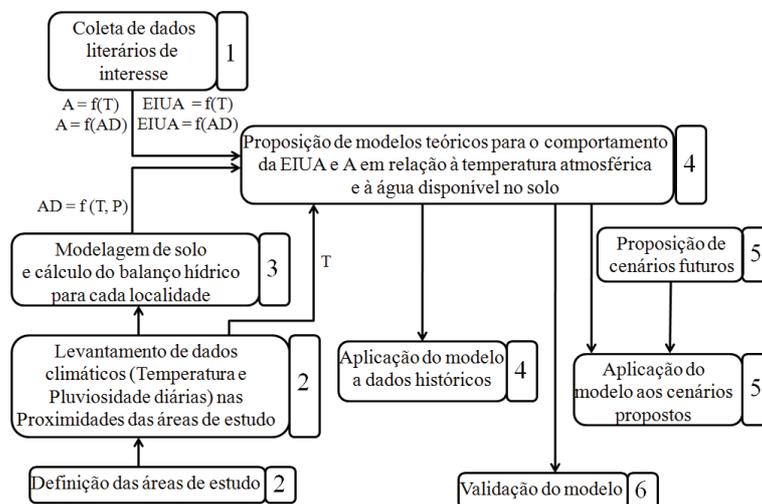


Figura 1 Fluxograma representativo da metodologia utilizada no trabalho

Cada uma das etapas do trabalho é descrita, em detalhes, na seqüência.

### 3.1 Etapa 1: Coleta de dados literários de interesse

Nessa primeira etapa, foi realizado um levantamento e a busca por trabalhos que tratassem de temas relevantes à análise proposta por este projeto. Foram pesquisados dados de experimentação com a cultura da cana-de-açúcar ou gramíneas tropicais  $C_4$  com foco nas características fisiológicas de interesse em resposta a alterações das condições ambientais. Essa etapa permitiu a construção de um banco de dados que foi utilizado, juntamente com outros dados, para a montagem dos modelos na etapa 4. Dessa forma, os modelos teóricos propostos são apoiados por dados de experimentação, como será apresentado adiante.

### 3.2 Etapa 2: Áreas de estudo e dados meteorológicos

As áreas de estudo foram escolhidas na região da Bacia do Rio Grande com histórico do cultivo da cana-de-açúcar nas proximidades da divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais. Essas áreas despertaram interesse de estudo por apresentarem contrastes climáticos, principalmente nos parâmetros ambientais analisados no trabalho. Além disso, o uso histórico para a cana-de-açúcar e a disponibilidade de dados climáticos também contribuíram para a escolha. As áreas selecionadas encontram-se nos municípios de Areado – MG, Ribeirão Preto – SP e Uberaba – MG. Utilizando-se imagens históricas de satélite e interpretação visual (RUDORFF et al., 2010), elegeram-se áreas que eram cultivadas com cana-de-açúcar desde o ano de 2002 e que se mantiveram sob esse cultivo até o fim de 2011. Para as áreas de Areado e Uberaba foram definidas três parcelas, cada uma com dimensões de 0,2025 km<sup>2</sup> (aproximadamente 20 ha, com comprimento e largura de 450 m). Para Ribeirão Preto, foram definidas duas áreas, uma com as mesmas dimensões citadas acima e outra, maior, com 0,3375 Km<sup>2</sup> (aproximadamente 34 ha, com comprimento de 750 m e largura de 450 m). As coordenadas geográficas (latitude e longitude) do centro de cada uma das áreas de estudo são:

- Areado 1: 21°20'18.70"S e 46°15'18.20"O
- Areado 2: 21°20'24.92"S e 46°17'32.29"O
- Areado 3: 21°19'38.26"S e 46°18'54.53"O
- Ribeirão Preto 1: 20°56'44.03"S e 47°57'31.35"O
- Ribeirão Preto 2: 20°58'9.95"S e 47°55'7.96"O
- Uberaba 1: 19°58'45.91"S e 48°12'7.24"O
- Uberaba 2: 19°58'37.04"S e 48°14'7.44"O
- Uberaba 3: 19°53'48.90"S e 48°7'54.43"O

A figura 2 ilustra as áreas de cana estudadas no trabalho.

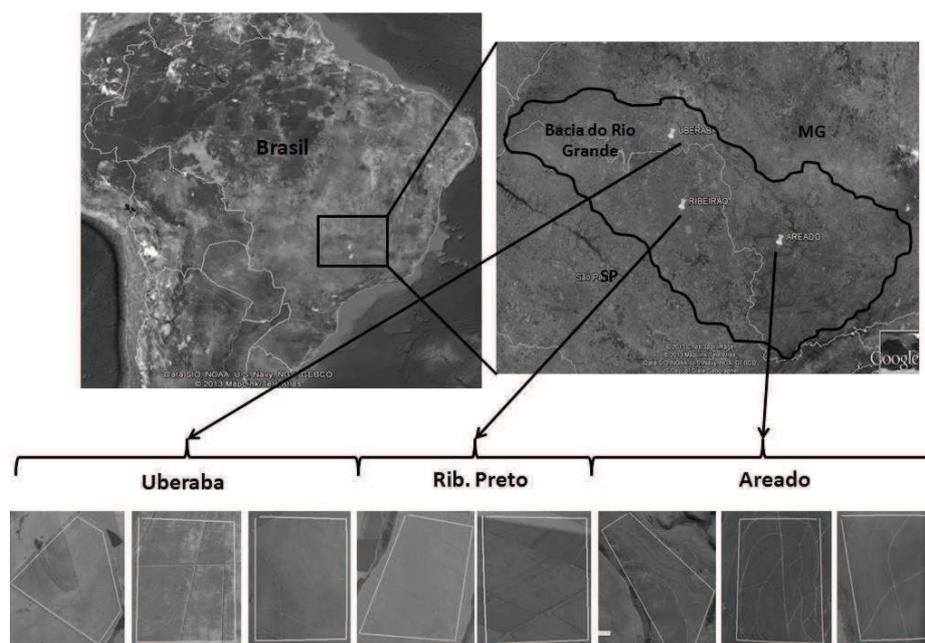


Figura 2 Fluxograma representativo da metodologia utilizada no trabalho

Os dados de temperatura e pluviosidade foram obtidos do banco de dados meteorológicos (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>). Foram coletados os dados de temperatura máxima e mínima diária e pluviosidade acumulada diária nas áreas de interesse na Bacia do Rio Grande com aptidão para cana-de-açúcar, no intervalo de 01/01/2002 a 31/12/2011. A partir desse banco de dados, foram calculados os valores de temperatura média diária, através da média simples entre a temperatura máxima e mínima. Por fim, foram

calculados os dados de temperatura média mensal, por meio da média simples das temperaturas médias diárias de todos os dias do mês e, também, da pluviosidade acumulada mensal, por meio da soma das pluviosidades diárias durante cada mês.

Para as áreas de estudo no município de Areado, foram utilizados dados da estação meteorológica de Machado – MG, que foram completados com a série do banco de dados do INMET de Lavras – MG. Para as áreas de estudo no município de Ribeirão Preto, foram utilizados dados da estação meteorológica de Franca – MG. Da mesma maneira, alguns dados faltantes foram complementados com os dados da estação de São Sebastião do Paraíso – MG. Para as áreas de estudo no município de Uberaba – MG foram utilizados os dados da estação da mesma localidade, não havendo, neste caso, falhas na série histórica.

As estações das quais foram obtidos os dados climáticos distam menos de 100 km em linha reta das áreas de cana-de-açúcar analisadas, em todos os casos.

### **3.3 Etapa 3: Balanço de água no solo**

Inicialmente foi feito um levantamento do tipo de solo predominante nas três áreas de estudo, utilizando-se mapas de solos. O tipo de solo predominante foi o latossolo vermelho (EMBRAPA, 2011). De acordo com Ruiz, Ferreira e Pereira (2003), a capacidade de campo média de latossolos vermelhos é de  $0,28 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Dardengo et al. (2005), por sua vez, cita três valores diferentes para a capacidade de campo de latossolos, sendo cada um obtido através de um método de medição ( $0,3879$ ;  $0,3516$  e  $0,3094 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Para este estudo foi utilizado o valor médio entre os quatro indicados acima, de  $0,315 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Considerou-se

uma camada única e uniforme, em termos de porosidade e capacidade de retenção de água na elaboração do modelo de solo.

De acordo com o trabalho de Rypley, Frole e Gilbert (2010), foram definidos os pontos limítrofes de água no solo em que o padrão de comportamento de EIUA e A eram alterados. Para ajustar os valores de capacidade de campo do trabalho de Rypley, Frole e Gilbert (2010) com os do latossolo, foi feita uma relação entre as capacidades de campo ( $0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  no experimento e  $0,315$  definido para as áreas de análise) e, através dessa relação foram definidos os demais pontos de limite da curva para a realidade das áreas escolhidas e o ponto de murcha permanente ( $0,034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) da cultura.

Após a definição dos valores de capacidade de campo, estimou-se a água disponível no solo. Para isso, definiu-se a profundidade de exploração do solo pelo sistema radicular da cana-de-açúcar como sendo de um metro, considerando essa exploração de forma homogênea, de acordo com as características das variedades mais utilizadas na região Sudeste do Brasil (FARAONI; TRIVELIN, 2006). De posse dos dados de capacidade de campo, ponto de murcha permanente e profundidade do perfil de solo explorado pelas raízes, calculou-se a quantidade de água total no solo e a quantidade de água disponível máxima, através das equações (1) e (2), respectivamente.

$$ATS = l_{\text{raiz}} \cdot CC \cdot f_c \quad (1)$$

onde:

ATS – água total no solo (em litros)

$l_{\text{raiz}}$  – profundidade efetiva da raiz (1 metro)

CC – capacidade de campo em  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

$f_c$  – fator de correção para litros (1000)

$$ADS = ATS - (PMP \cdot f_c) \quad (2)$$

onde:

ADS – água disponível no solo (em litros)

PMP – ponto de murcha permanente em  $m^3 \cdot m^{-3}$

$f_c$  – fator de correção para litros (1000)

Finalmente, a partir dos valores de ATS e ADS, pluviosidade mensal acumulada e temperatura média mensal em cada região, foi feito um balanço hídrico para cada localidade, de acordo com Thornthwaite e Mather (1955).

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura também foi utilizado o método de Thornthwaite e Mather (1955), porém, os valores do coeficiente de cultura para a cana-de-açúcar foram definidos de acordo com Doorenbos e Pruitt (1975), sendo os estágios fenológicos determinados considerando-se o plantio da cultura no mês de Fevereiro.

### **3.4 Etapa 4: Elaboração dos modelos teóricos**

#### **3.4.1 Adequação da fotossíntese (A) em função da temperatura (T)**

O processo de modelagem teórica do comportamento fotossintético da cana-de-açúcar frente alterações na temperatura baseou-se nos dados de Dwyer et al. (2007), Da Matta et al. (2001) e Graça et al. (2010). A partir dos dados de Dwyer et al. (2007), definiu-se o padrão de comportamento da fotossíntese de plantas  $C_4$  em função de diferentes temperaturas. Esse padrão segue uma função de segundo grau, sendo que, para as plantas cultivadas previamente em casas de vegetação aclimatadas em temperaturas de 25/20°C (temperatura média

diurna/noturna), ajustou-se uma curva com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,764. A partir de dados de Da Matta et al. (2001) e Graça et al. (2010), definiu-se a faixa de temperatura para qual a fotossíntese é máxima para a cana-de-açúcar. O ponto de fotossíntese potencial máxima (com saturação de luz e  $CO_2$ ) para cana-de-açúcar ocorre em  $35^\circ C$  e o ponto de fotossíntese real máxima ocorre em  $29,4^\circ C$ .

Assim, definiu-se o ponto de máxima fotossíntese líquida relativa (1,00) entre os valores de temperatura de  $30$  a  $40^\circ C$ . O ponto de compensação de temperatura foi definido de acordo com Liu, Kingston e Bull (1998), que define que a  $15^\circ C$  a fotossíntese líquida é zero para a cana-de-açúcar.

Dessa forma, o comportamento da fotossíntese líquida da cana foi definido como: em temperaturas abaixo de  $15^\circ C$  a fotossíntese líquida é nula; entre  $15^\circ C$  e  $30^\circ C$  a fotossíntese aumenta linearmente de acordo com a equação (3) até alcançar o ponto de máxima (1,00); entre  $30$  e  $40^\circ C$  a fotossíntese se mantém em seu máximo; entre  $40$  e  $55^\circ C$  a fotossíntese decai do máximo ao mínimo (de 1,00 a 0,00) de forma linear, conforme a equação (4). Esse comportamento pode ser representado graficamente, como mostrado na figura 3.

$$A = (0,0667 \cdot T) - 1 \quad (3)$$

$$A = (-0,0667 \cdot T) + 3,667 \quad (4)$$

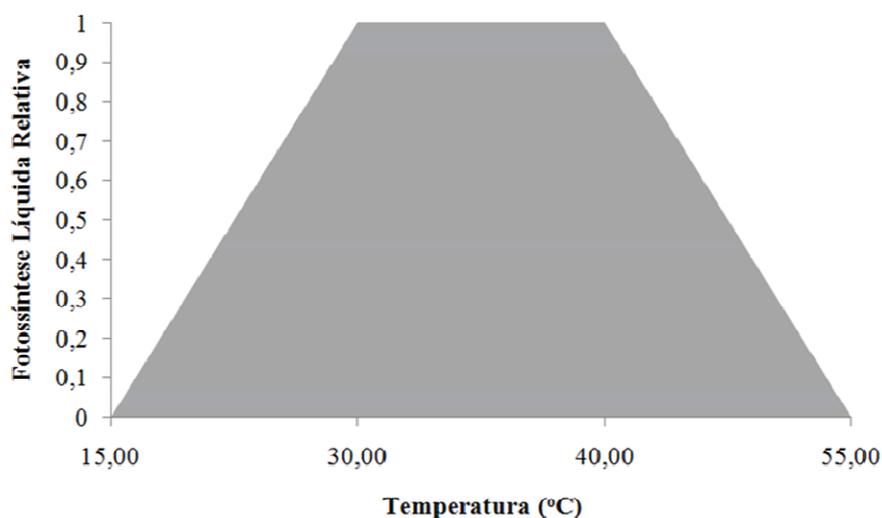


Figura 3 Modelo teórico de adequação da fotossíntese líquida (valores relativos) em função da temperatura do ar para cana-de-açúcar

### 3.4.2 Adequação da eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) em função da temperatura (T)

O modelo teórico do comportamento da eficiência intrínseca de uso da água da cana-de-açúcar frente alterações de temperatura foi desenvolvido a partir de dados de Dwyer et al. (2007). A eficiência intrínseca de uso da água foi calculada pela razão entre a fotossíntese líquida (A) e a condutância estomática (gs). Dwyer et al. (2007) apresenta o comportamento da fotossíntese e da condutância estomática de três espécies de poáceas, C<sub>4</sub>, cultivadas previamente em casas de vegetação aclimatadas em duas diferentes temperaturas, 25/20°C e 35/30°C (temperatura média diurna/noturna) e expostas a diferentes condições de temperatura. Os dados utilizados para a definição do modelo teórico do comportamento da variável EIUA foram os relativos às medições das plantas aclimatadas em 25/20°C, por representarem melhor as médias anuais das regiões analisadas no decorrer do trabalho.

Inicialmente, foram ajustadas equações polinomiais de segundo grau para o comportamento de cada uma das 3 espécies, definindo-se os pontos de máxima para cada uma delas (um par temperatura, EIUA). Após isso, obteve-se a média dos valores de EIUA para cada temperatura avaliada entre as 3 espécies. Esses pontos foram plotados em gráfico de dispersão procedendo-se a análise de regressão. Para a resposta à temperatura, ajustou-se uma curva polinomial de segundo grau, com  $R^2$  de 0,994, com ponto de máximo em 31°C, resultando em uma EIUA de 232  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ , valor este utilizado como base para normalização dos demais valores e construção do modelo.

Os pontos limítrofes do modelo foram definidos da seguinte maneira: o ponto de mínima EIUA foi definido da mesma maneira que para a fotossíntese, uma vez que a nulidade da fotossíntese líquida implica em nulidade da razão  $A \cdot \text{gs}^{-1}$ . O intervalo de máxima EIUA para a cana foi baseado na EIUA das espécies de poáceas utilizadas por Dwyer et al. (2007). Cada uma das 3 espécies alcança a máxima EIUA em uma temperatura diferente (28 °C para *F. bidentis*, 31,5 °C para *P. coloratum* e 33 °C para *C. ciliares*). Dessa forma, escolheu-se a menor e a maior temperatura dentre as 3, definindo-se a máxima EIUA para a cana entre 28 e 33 °C. O limite superior foi definido em 46 °C, de modo que as diferenças entre os pontos de máxima e mínima EIUA sejam iguais (13°C entre 15 e 28 e entre 33 e 46 °C). Entre os pontos de mínimo (0,00) e máximo (1,00) EIUA foram definidas equações polinomiais de primeiro grau, sendo que entre 15 e 28 °C a EIUA se comporta de acordo com a equação (5) e entre 33 e 46 °C, de acordo com a equação (6). Esse comportamento pode ser representado graficamente, como mostrado na figura 4:

$$\text{EIUA} = (0,0769 \cdot T) - 1,154 \quad (5)$$

$$\text{EIUA} = (- 0,0769 \cdot T) + 3,538 \quad (6)$$

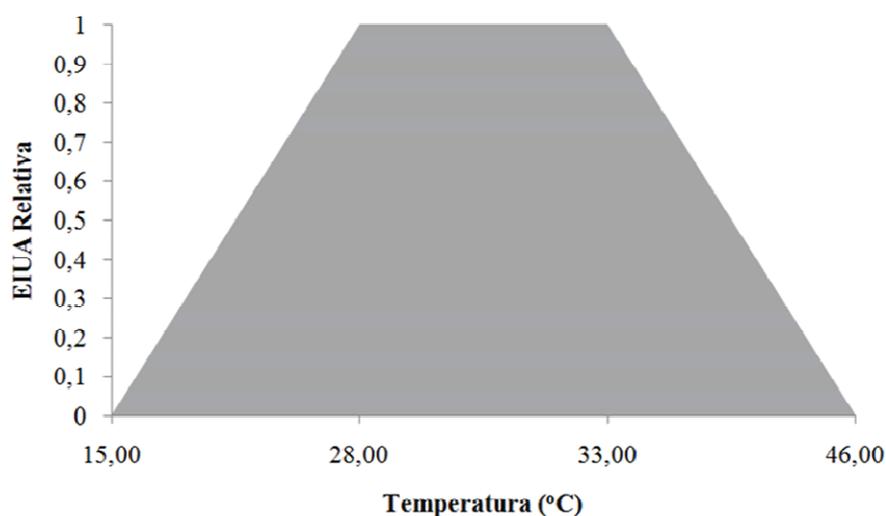


Figura 4 Modelo teórico de adequação da eficiência intrínseca do uso da água (valores relativos) em função da temperatura do ar para cana-de-açúcar

### 3.4.3 Adequação da fotossíntese (A) em função da água disponível no solo (ADS)

Para a modelagem teórica do comportamento fotossintético da cana-de-açúcar frente alterações na água disponível no solo, foram utilizadas as informações publicadas por Rypley, Frole e Gilbert (2010). De acordo com os dados desses autores, quando o solo atinge o ponto de murcha permanente (ADS=0), a atividade fotossintética é nula. Já a taxa máxima de fotossíntese ocorre no ponto em que o solo se encontra na capacidade de campo e a disponibilidade de água é máxima. Dessa forma, os pontos limítrofes foram definidos em ADS igual a 0,00 e fotossíntese líquida relativa igual a 0,00 e em ADS máxima, onde a fotossíntese líquida relativa é máxima e igual a 1,00. O comportamento entre esses dois pontos foi definido através do incremento linear segundo a equação (7). Esse comportamento pode ser representado graficamente, como mostrado na figura 5:

$$A = ADS \quad (7)$$

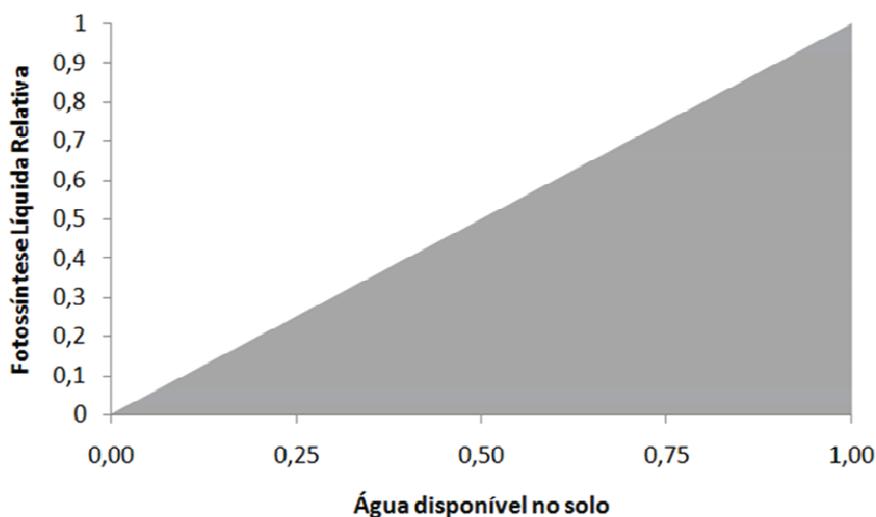


Figura 5 Modelo teórico de adequação da fotossíntese líquida (valores relativos) em função da água disponível no solo (valores relativos) para cana-de-açúcar

#### 3.4.4 Adequação da eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) em função da água disponível no solo (ADS)

O modelo teórico de comportamento da eficiência intrínseca de uso da água da cana-de-açúcar como resposta a diferentes quantidades de água disponível no solo durante o ano foi desenvolvido a partir de dados de Ripley Rypley, Frole e Gilbert (2010). O autor apresenta o comportamento da fotossíntese e da condutância estomática em diferentes quantidades de água no solo, de três espécies de gramíneas  $C_4$  cultivadas em casa de vegetação (*Tristachya leucothrix*, *Themeda triandra* e *Heteropogon contortus*). Inicialmente, adequou-se uma equação polinomial de terceiro grau para o comportamento de cada uma das 3 espécies utilizadas no trabalho, e definiram-

se os pontos de máxima EIUA da função para cada uma delas (um par ADS, EIUA).

Dentre as 3 espécies, o maior ponto de máximo foi para *T. leucothrix*. Esse valor máximo foi alcançado com  $0,105 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  de água no solo e definido como o limite inferior para a faixa de máxima EIUA. Nesse valor de  $0,105 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  de água disponível no solo, as outras duas espécies analisadas não estão em seu ponto de máximo. Para ambas, a EIUA nessa condição de água disponível é reduzida para 98% da máxima. Utilizando-se a espécie *T. leucothrix* como modelo, definiu-se o ponto em que sua EIUA alcançava 98% da máxima como limite superior da faixa de máxima EIUA (EIUA igual a 1,00). Essa EIUA foi alcançada em  $0,125 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  para *T. leucothrix*. O limite inferior (EIUA igual a 0,00) foi definido em  $0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  que foi o ponto de murcha permanente. O limite superior foi definido de acordo com a média dos dados a partir de ADS de  $0,105 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Essa média foi de  $98 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ , que, define um valor de  $0,152 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , de acordo com a função de terceiro grau ajustada para o comportamento médio das três espécies. A EIUA de  $98 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$  representa 73% da EIUA máxima, sendo esse o valor final e constante. O comportamento entre os pontos de mínimo (0,00 em 0,00) e máximo (1,00 em 0,39) foi definido conforme a equação (8) e, entre o ponto de máximo EIUA (1,00 em 0,47) e final (0,73 em 0,62) através da equação (9). Por fim, esses valores dos limites foram ajustados para a capacidade de campo de  $0,315 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  e colocados em percentagem do valor total (capacidade de campo). Assim, na figura 5, o valor 1,00 no eixo x representa a capacidade de campo e o valor 0,00 representa o ponto de murcha permanente.

$$\text{EIUA} = 2,564 \cdot \text{ADS} \quad (8)$$

$$\text{EIUA} = (-1,8 \cdot \text{ADS}) + 1,846 \quad (9)$$

A figura 6 ilustra o modelo.

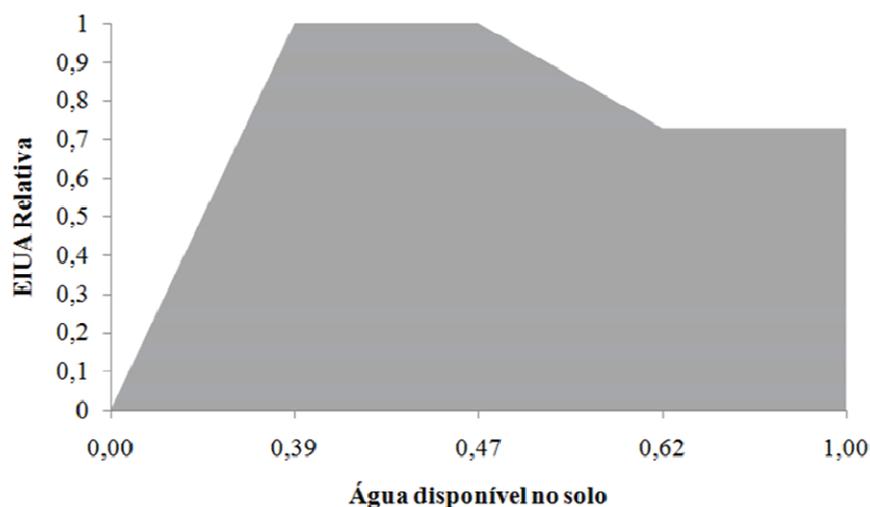


Figura 6 Modelo teórico de adequação da eficiência intrínseca do uso da água (valores relativos) em função da água disponível no solo (valores relativos) para cana-de-açúcar

Dessa forma, o modelo final para adequação da eficiência intrínseca do uso da água é dado por:

$$\begin{cases}
 \text{Se } \left\{ \begin{array}{l}
 T < 15 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } EIUA_T = 0 \\
 15 \text{ }^\circ\text{C} < T < 28 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } EIUA_T = (0,0769 \cdot T) - 1,154; \\
 28 \text{ }^\circ\text{C} < T < 33 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } EIUA_T = 1; \\
 33 \text{ }^\circ\text{C} < T < 46 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } EIUA_T = (-0,0769 \cdot T) + 3,538; \\
 T > 46 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } EIUA_T = 0.
 \end{array} \right. \\
 \text{Se } \left\{ \begin{array}{l}
 ADS = 0, \text{ então } EIUA_{ADS} = 0; \\
 0 < ADS < 0,39, \text{ então } EIUA_{ADS} = 2,564 \cdot ADS; \\
 0,39 < ADS < 0,47, \text{ então } EIUA_{ADS} = 1; \\
 0,47 < ADS < 0,62, \text{ então } EIUA_{ADS} = (-1,8 \cdot ADS) + 1,846; \\
 ADS > 0,62, \text{ então } EIUA_{ADS} = 0,73;
 \end{array} \right.
 \end{cases}$$

$$\text{Se } \begin{cases} \text{EIUA}_T < \text{EIUA}_{\text{ADS}}, \text{ então EIUA} = \text{EIUA}_T \\ \text{EIUA}_{\text{ADS}} < \text{EIUA}_T, \text{ então EIUA} = \text{EIUA}_{\text{ADS}} \\ \text{EIUA}_{\text{ADS}} = \text{EIUA}_T, \text{ então EIUA} = \text{EIUA}_{\text{ADS}} = \text{EIUA}_T \end{cases}$$

Já o modelo final para adequação da fotossíntese líquida é dado por:

$$\text{Se } \begin{cases} T < 15 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } A_T = 0 \\ 15 \text{ }^\circ\text{C} < T < 30 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } A_T = (0,0667 \cdot T) - 1; \\ 30 \text{ }^\circ\text{C} < T < 40 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } A_T = 1; \\ 40 \text{ }^\circ\text{C} < T < 55 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } A_T = (-0,0667 \cdot T) + 3,667; \\ T > 55 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ então } A_T = 0. \end{cases}$$

$$\text{Se } \begin{cases} 0 < \text{ADS} < 1, \text{ então } A_{\text{ADS}} = \text{ADS}; \\ A_T < A_{\text{ADS}}, \text{ então } A = A_T \\ A_{\text{ADS}} < A_T, \text{ então } A = A_{\text{ADS}} \\ A_{\text{ADS}} = A_T, \text{ então } A = A_{\text{ADS}} = A_T \end{cases}$$

De posse dos modelos teóricos de adequação da fotossíntese e eficiência intrínseca do uso da água, utilizaram-se os dados históricos de temperatura e água disponível no solo como dados de entrada e verificou-se o comportamento dos modelos em cada localidade. Os gráficos relativos ao comportamento dos parâmetros fisiológicos entre os anos de 2002-2011 são apresentados no Anexo 1.

### 3.5 Etapa 5: Proposição de cenários futuros

Os cenários climáticos utilizados no estudo foram definidos a partir da análise de uma série de cenários futuros propostos pelo IPCC (2007) e por Marengo; Valverde (2007). Esses cenários foram definidos para os próximos 20

anos (2012–2031), de maneira que a alteração foi dividida em duas partes, entre 2012–2021 e, outra alteração entre 2022–2031.

Tais cenários foram baseados nos dados climáticos de cada uma das áreas de estudo entre 2002–2011. Assim, para o ano de 2012, utilizou-se como base o ano de 2002, para 2013, a de 2003 e assim por diante até o ano de 2021, baseado no ano de 2011. Para o período de 2022–2031, foi realizado o mesmo procedimento, baseando-se nos dados de 2012–2021.

Para a temperatura, foram propostos três cenários:

- Cenário 1: aumento de 2 °C na temperatura média de todos os meses entre 2012–2021 e posterior aumento de mais 2 °C na temperatura média de todos os meses entre 2022–2031.

- Cenário 2: aumento de 1,5 °C na temperatura média do mês mais frio, do mês anterior e posterior a ele, entre 2012–2021 e posterior aumento de mais 1,5 °C na temperatura média dos mesmos meses entre 2022–2031. O mês mais frio foi definido analisando-se os dados históricos de 2002–2011, sendo considerado o mês mais frio aquele que apresentou a temperatura mais baixa do ano mais vezes durante os dez anos analisados. Para as três localidades o mês de Julho foi o mais frio.

- Cenário 3: aumento de 1,5 °C na temperatura média do mês em que se encerra a estação seca e dos dois meses anteriores, entre 2012–2021 e posterior aumento de mais 1,5 °C na temperatura média dos mesmos meses entre 2022–2031. O mês de fim da seca foi definido analisando-se os dados históricos de 2002–2011, sendo considerado o mês de fim da seca aquele que apresentou uma quantidade representativa de chuva após o período de estiagem mais vezes durante os dez anos analisados. Para as três localidades este foi o mês de Outubro.

Para a pluviosidade foram definidos dois cenários:

- Cenário 1: diminuição de 15% da pluviosidade acumulada dos meses de Setembro, Outubro, Março e Abril e distribuição equitativa do total reduzido nos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro entre 2012–2021. Para o período entre 2022–2031, fez-se o mesmo procedimento, porém, com diminuição de 30%, baseado na série de 2002–2011.
- Cenário 2: as alterações foram as mesmas do cenário 1, porém, os dados de pluviosidade utilizados como base foram os do ano com menor pluviosidade acumulada entre os anos de 2002–2011.

As figuras 7 a 9 ilustram os novos cenários de temperatura e as figuras 10 e 11 os de pluviosidade.

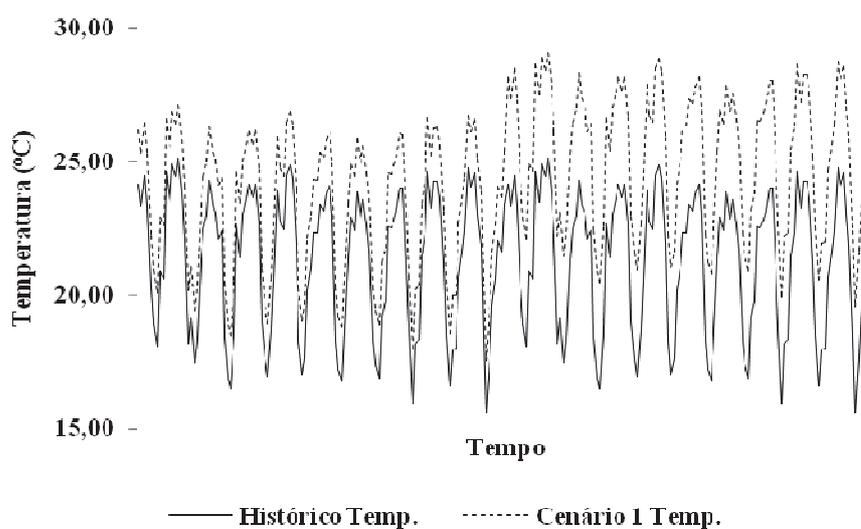


Figura 7 Cenário 1 proposto para a temperatura entre 2012 e 2031

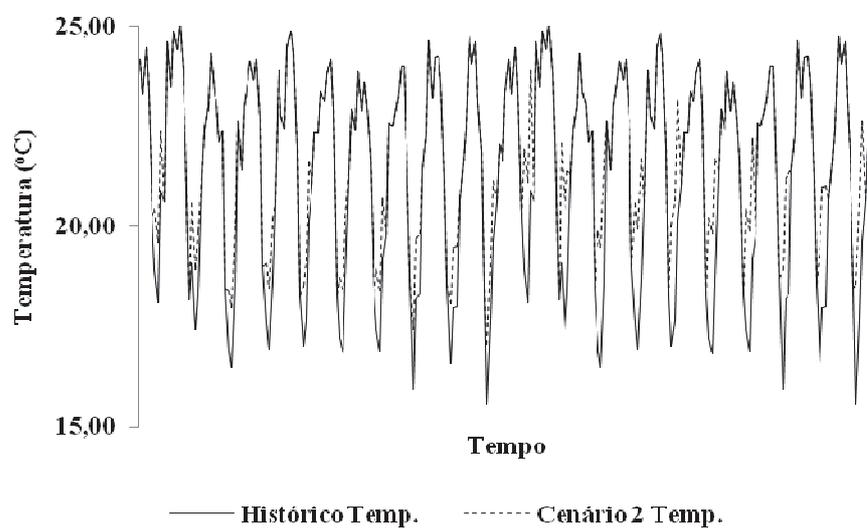


Figura 8 Cenário 2 proposto para a temperatura entre 2012 e 2031

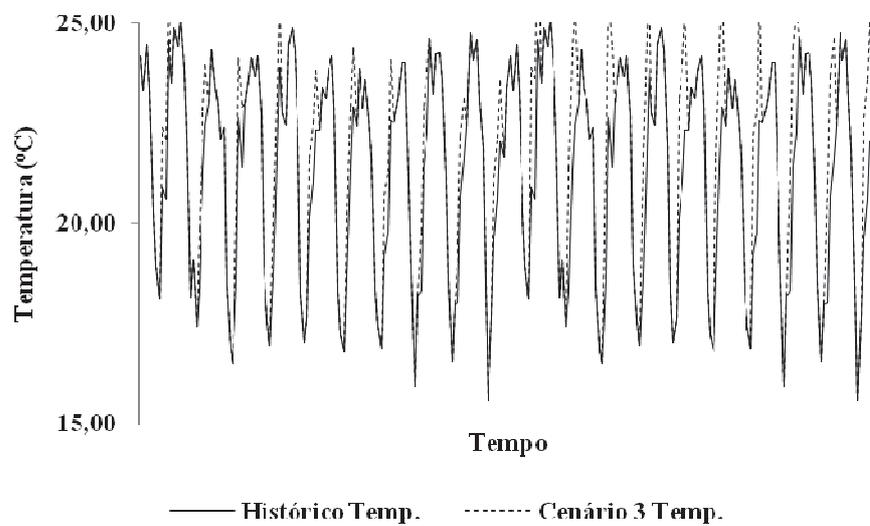


Figura 9 Cenário 3 proposto para a temperatura entre 2012 e 2031

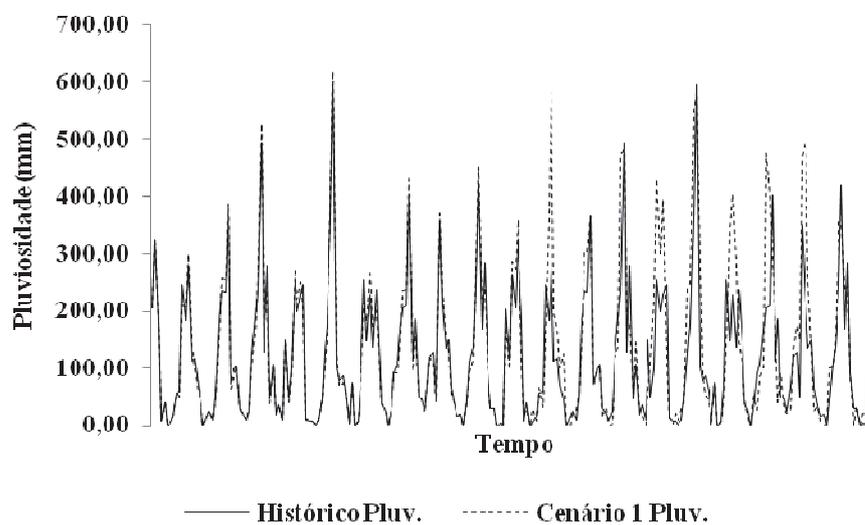


Figura 10 Cenário 1 proposto para a pluviosidade entre 2012 e 2031

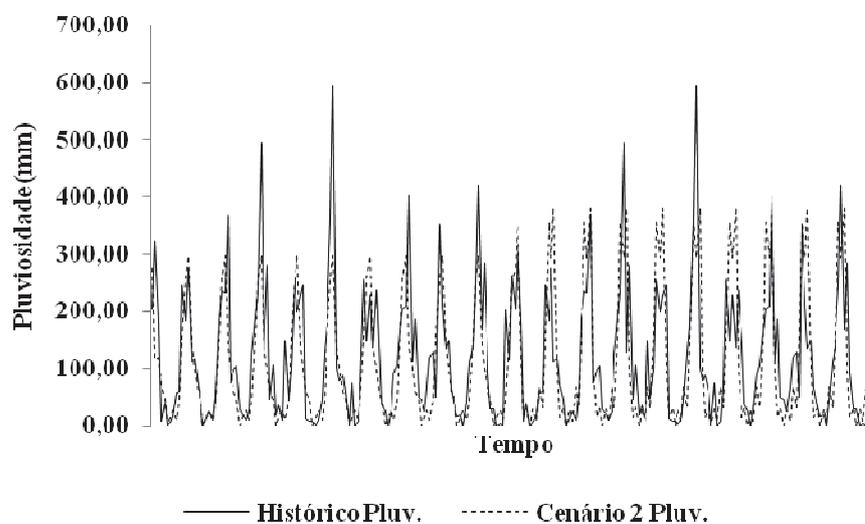


Figura 11 Cenário 2 proposto para a pluviosidade entre 2012 e 2031

Esses cenários de temperatura e pluviosidade foram combinados gerando seis cenários futuros, os quais foram aplicados como dados de entrada aos

modelos teóricos de adequação da fotossíntese e eficiência intrínseca do uso da água. Os gráficos relativos ao comportamento dos parâmetros fisiológicos nos cenários propostos são apresentados no Anexo 2.

### **3.6 Etapa 6: Validação do modelo**

A validação dos modelos teóricos de EIUA e A foi feita através da comparação entre o comportamento médio mensal das características adequação da EIUA e adequação de A com as médias mensais de NDVI, entre os anos de 2002-2011, para cada uma das localidades de estudo. O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, ROUSE et al., 1974) é um índice obtido por sensoriamento remoto e seu valor representa o estado físico e fisiológico da vegetação. Por reconhecer ondas refletidas no comprimento de onda da cor verde, fornece uma estimativa da cobertura vegetal em uma área determinada e da quantidade de clorofila presente nas folhas. Dessa maneira, pode estar associado a importantes processos fisiológicos e fenológicos, sendo um bom índice para diagnóstico de plantas e estimativa do balanço de água e carbono (KLESHCHENKO; GONCHAROVA; NAIDINA, 2012).

Dessa maneira, uma alta correlação do NDVI com as adequações de EIUA e A permite a validação dos modelos teóricos propostos e utilizados neste trabalho.

As comparações foram feitas através do cálculo da correlação de Pearson ( $r$ ). Valores de  $r$  acima de 0,70 com 5% de significância foram considerados como representando uma alta correlação.

### **3.7 Etapa 7: Análise de dados**

Para a análise dos dados das adequações de fotossíntese e eficiência intrínseca do uso da água, dividiu-se o ano em quatro épocas, sendo: a época chuvosa (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), uma época de transição entre a chuvosa e a seca (Março, Abril e Maio), uma época seca (Junho, Julho e Agosto) e uma época de transição entre a seca e a chuvosa (Setembro, Outubro e Novembro). Para cada uma delas, fez-se o cálculo da média, do desvio padrão e do erro padrão dos valores finais de adequação dos parâmetros (seja na série histórica ou nos cenários futuros). Essas médias foram comparadas por meio do teste do Erro Padrão, de acordo com metodologia proposta por Cumming, Fidler e Vaux (2007). Foram feitas comparações dos valores médios de adequação para cada estação, das variáveis analisadas dentro de cada área de estudo. Também foram comparados os valores médios das áreas de estudo dentro de cada época do ano, considerando os cenários propostos e a série histórica 2002-2011.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa etapa do trabalho foi dividida em três partes principais. Inicialmente, buscou-se analisar os padrões de comportamento médio mensal da adequação da fotossíntese e eficiência intrínseca do uso da água em função da temperatura do ar e da água disponível no solo, para os dados históricos entre 2002-2011, para as três localidades, visando verificar a sensibilidade dos modelos a variações, de espaço e tempo, das condições do ambiente. Na segunda etapa são apresentados os gráficos de comparação das variáveis ambientais e fisiológicas em relação ao índice NDVI, para os dados de 2002-2011, utilizados na validação dos modelos. Por fim, os modelos teóricos validados foram utilizados para simular a adequação da A e da EIUA em cenários futuros propostos, visando demonstrar a aplicabilidade dos modelos.

### 4.1 Sensibilidade dos modelos teóricos propostos

O comportamento da EIUA predito pelos modelos teóricos apresentou padrão similar de comportamento em escala temporal, dentro das áreas estudadas. Já na escala espacial, para cada estação do ano, não houve um padrão generalizado para a adequação dessa variável.

Observou-se elevados valores de correlação ( $r$ ) entre a água disponível no solo e os valores de adequação da EIUA, para as três áreas estudadas ( $r=0,93$ ;  $0,94$  e  $0,96$  para Areado, Ribeirão Preto e Uberaba, respectivamente) (Figura 12), indicando que o modelo proposto foi eficaz em retratar a elevada dependência das trocas gasosas ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) à disponibilidade hídrica no solo, conforme ressaltado por Angelocci (2002).

Maiores valores de EIUA relativa ocorreram nos dois primeiros trimestres, Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) e Março-Abril-Maio (MAM). Em

MAM, apesar das temperaturas serem altas, e a demanda evaporativa também, a ADS está em níveis elevados, com o fim da estação chuvosa. Com a redução das chuvas no fim desse trimestre e a progressiva redução da ADS, a EIUA também tende a diminuir. Esse fato, juntamente com o encurtamento do fotoperíodo e a diminuição na temperatura do ar, induz a sinalização de mecanismos de proteção à perda de água, aumentando a EIUA, em meses do início da época seca (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003). Assim, quando ADS atinge valores muito baixos no trimestre Junho-Julho-Agosto (JJA), a EIUA tende a estabilizar em valores maiores, como mecanismo de proteção à dessecação (KATUL et al., 2012).

Os menores valores de EIUA relativa ocorrem no trimestre Setembro-Outubro-Novembro (SON), indicando perda de controle estomático, pois, apesar do fim da estiagem coincidir com esse trimestre, a necessidade de repor a água do solo e o aumento da temperatura do ar criam um cenário desfavorável à manutenção de altos valores da EIUA (BLUM, 2009). De forma geral, esses resultados sinalizam que os modelos propostos para estimativa da adequação de EIUA foram eficientes em responder às variações temporais das condições ambientais e, portanto, apontam elevada sensibilidade dos modelos, especialmente às variações da ADS em escala sazonal.

Com relação ao comportamento da A em relação à ADS, observou-se um padrão de comportamento semelhante ao da EIUA, com valores de correlação também elevados ( $r=0,97$ ;  $0,98$  e  $0,99$  para Areado, Ribeirão Preto e Uberaba, respectivamente) (Figura 13). Porém, em Maio, houve uma recuperação da EIUA, mas, não de A. Esse resultado observado pela aplicação dos modelos está de acordo com o comportamento fisiológico descrito por Flexas et al. (2012), que descreve o fechamento estomático como o mais importante mecanismo de proteção à perda de água, agindo primeiro em situações de déficit hídrico. Com isso, EIUA aumenta por meio da diminuição

da perda de água, com posterior diminuição da quantidade interna de CO<sub>2</sub> na planta, mantendo a tendência de diminuição da fotossíntese observada nas simulações.

Em escala temporal, pode-se notar que os maiores valores de A ocorreram no trimestre MAM. Isso se deve ao fato de que a limitação estomática é reduzida devido à alta quantidade de água disponível no solo (LAWLOR; TEZARA, 2009) e também pelo fato das temperaturas serem ideais para a cultura (SAGE; KUBIEN, 2007). No trimestre JJA, a diminuição da água no solo e a queda de temperatura média, favorecem a queda na atividade fotossintética (RIPLEY; FROLE; GILBERT, 2010). A baixa disponibilidade de água no solo e a necessidade de sua reposição são os fatores que contribuem para que a limitação estomática leve a taxa de fotossíntese a seus menores valores, no trimestre SON. Em DJF, a recuperação dos níveis de água no solo e a elevação da temperatura favorecem um aumento de A, alcançando valores intermediários entre as estações de Março a Maio e de Junho a Agosto.

Em relação ao padrão de comportamento da EIUA em resposta à temperatura do ar, pode-se observar que a maior correlação entre as duas variáveis acontece no primeiro quadrimestre do ano (Figura 14). Isso se deve, provavelmente, porque nessa época, as reservas de água no solo estão em níveis bastante elevados e o fator limitante para a cultura passa a ser a temperatura. É exatamente nesse período chuvoso que são registradas as maiores temperaturas médias mensais. Dessa forma, a limitação ocorreu sempre por altas temperaturas nessa época. Além disso, cabe ressaltar que, no período em que as temperaturas baixas poderiam se tornar limitantes, a água no solo foi mais limitante que esse fator. Isso pode ser notado para as três localidades estudadas. O mesmo ocorre para a fotossíntese (Figura 15). Em geral, em escala anual, os valores de correlação observados, tanto para A quanto para EIUA, foram baixos e não significativos.

As figuras 16 e 17 ilustram o comportamento padrão médio dos parâmetros fisiológicos estimados pelos modelos para os dados históricos de 2002-2011 para as três localidades durante o ciclo de um ano. Além disso, as figuras apresentam qual foi o fator mais limitante (água no solo ou temperatura) em cada trimestre do ano

De forma geral, pode-se perceber que, para a EIUA, a temperatura foi mais limitante nos trimestres MAM e JJA e a água no solo nas outras duas estações. Já para a fotossíntese, a temperatura foi mais limitante nos trimestres DJF e MAM, e a água no solo nas outras estações.

Através dos resultados apresentados foi possível verificar alguns pontos relevantes sobre o desempenho dos modelos em escala temporal e espacial. Ao trazer resultados diferentes para cada época do ano, de acordo com as alterações dos padrões dos fatores ambientais, o modelo mostrou sua sensibilidade em escala temporal. Além disso, os diferentes comportamentos do modelo em cada localidade mostram a sensibilidade em escala espacial. Essas duas características do modelo são necessárias para que ele possa ser utilizado para estimar a adequação da cultura a cenários futuros propostos, tanto durante um ciclo climático como em diferentes localidades de interesse.

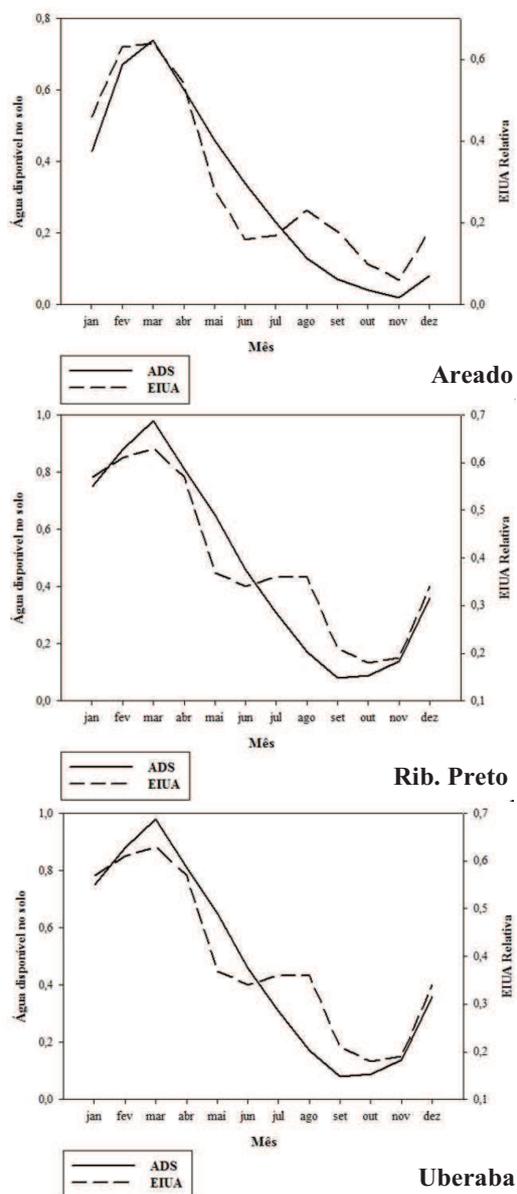


Figura 12 Padrões de comportamento médio mensal da Água disponível no solo e Adequação de EIUA para os dados relativos ao período de 2002-2011

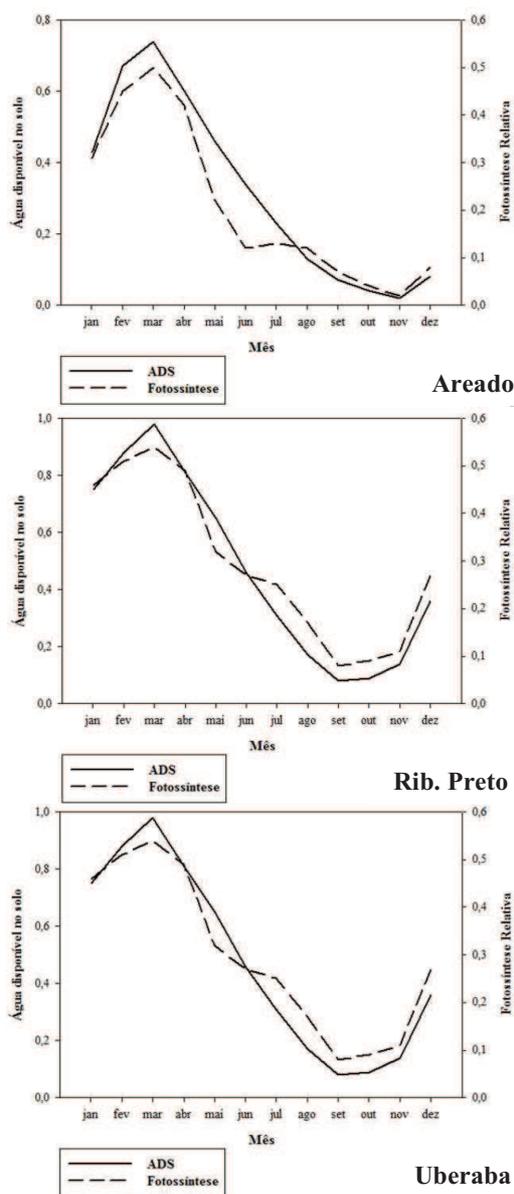


Figura 13 Padrões de comportamento médio mensal da Água disponível no solo e Adequação de Fotossíntese para os dados relativos ao período de 2002-2011

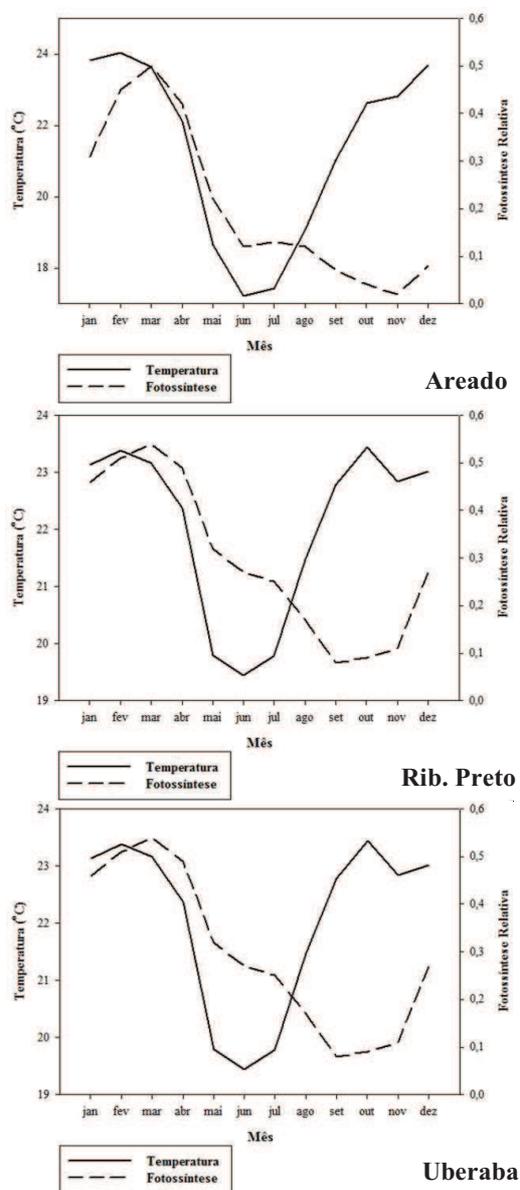


Figura 14 Padrões de comportamento médio mensal da Temperatura e Adequação de EIU para os dados relativos ao período de 2002-2011

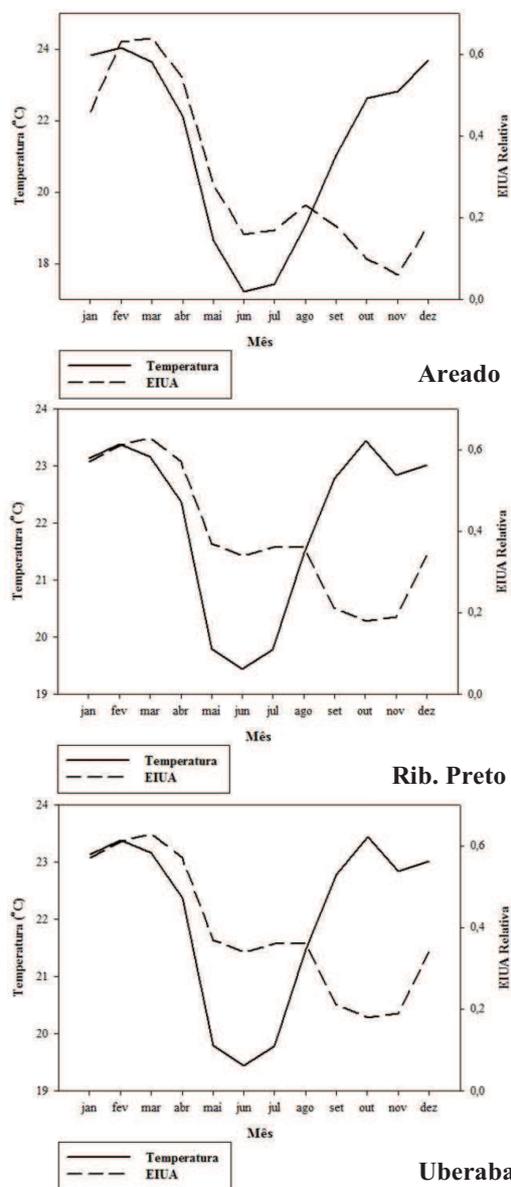


Figura 15 Padrões de comportamento médio mensal da Temperatura e Adequação de Fotossíntese para os dados relativos ao período de 2002-2011

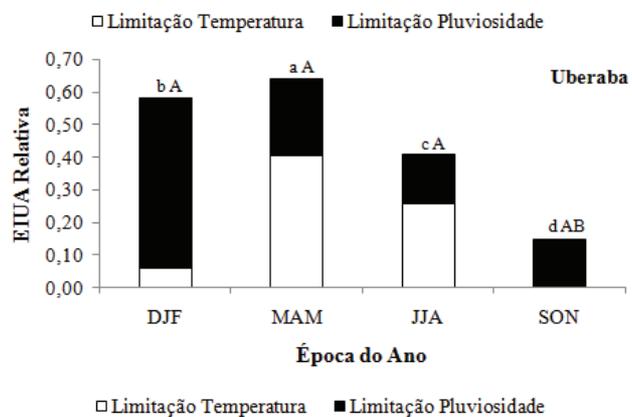
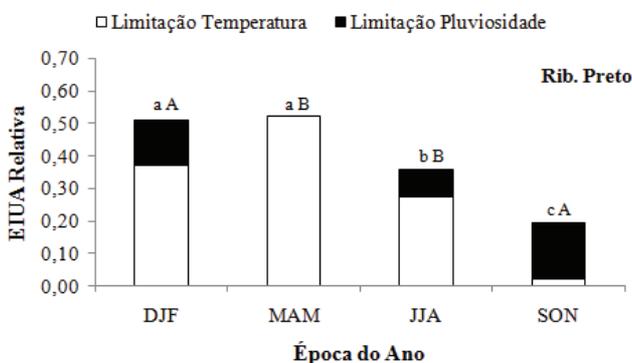
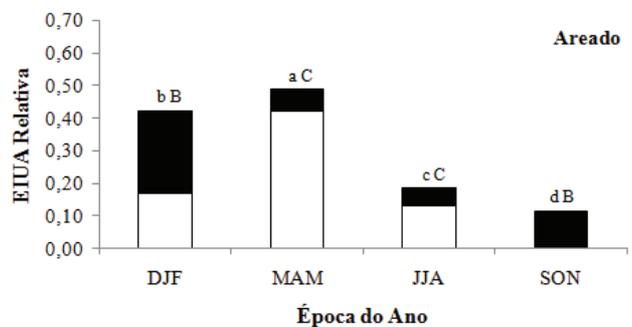


Figura 16 Média da EIUA em diferentes épocas do ano para a série histórica de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

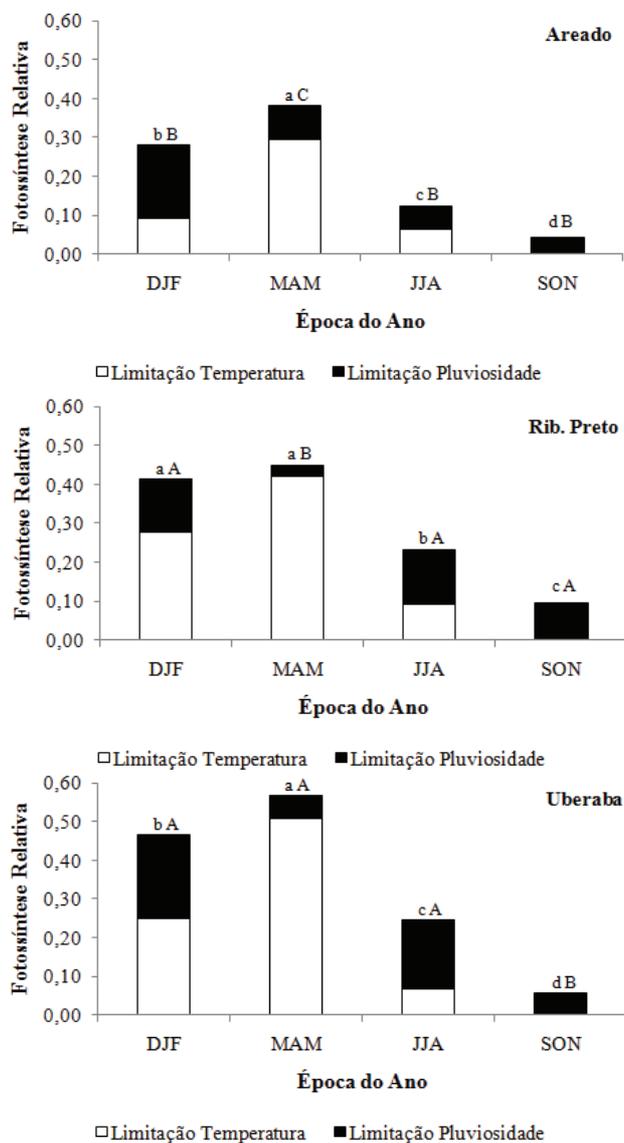


Figura 17 Média da A em diferentes épocas do ano para a série histórica de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

## 4.2 Exercício de Validação

Os resultados da análise dos padrões temporais de NDVI evidenciaram, de forma geral, uma defasagem em relação ao padrão de temperatura do ar. Isso ocorre principalmente pelo atraso na resposta da vegetação (perda de folha e amarelecimento, ou ganho de folhas e enverdecimento) em resposta à diminuição ou aumento da temperatura, ocasionando baixos valores dos coeficientes de correlação entre o NDVI e a temperatura (Figura 18). Contudo, os padrões temporais de comportamento do NDVI foram bem similares ao da água disponível no solo (Figura 19), o que é evidenciado pelos elevados valores do coeficiente de correlação entre as duas variáveis, sendo de 0,87; 0,83 e 0,81 para Areado, Ribeirão Preto e Uberaba, respectivamente.

Como se pode observar, os padrões espaço-temporais de NDVI e das variáveis simuladas através dos modelos teóricos propostos acompanham as variações nas condições ambientais. Porém, são diferentes variáveis em termos das escalas e das bases que lhes dão origem. Enquanto o NDVI é uma característica relacionada ao dossel e à sua condição óptica, as adequações teóricas de A e EIUA são calculadas a partir de mecanismos em nível foliar. Mesmo com essas discrepâncias, encontrou-se elevados valores de correlação entre eles, provavelmente, por possuírem características de resposta da mesma natureza.

A adequação da fotossíntese (Figura 20) tem uma alta correlação com NDVI, pois, tanto NDVI do dossel quanto fotossíntese na folha, estão diretamente relacionados à quantidade de clorofila na folha. Os valores da correlação entre a adequação de A e NDVI foram de 0,84; 0,84 e 0,82 para Areado, Ribeirão Preto e Uberaba, respectivamente.

A adequação da EIUA (figura 21) também apresenta uma alta correlação com o NDVI, com valores da correlação de 0,79; 0,74 e 0,78 para Areado, Ribeirão Preto e Uberaba, respectivamente.

Diante desses resultados, pode-se inferir que, apesar de existirem limitações, principalmente relacionadas aos problemas de escalas das variáveis, os modelos propostos para descrever aspectos fisiológicos em nível foliar da cana apresentaram-se eficientes em fornecer informações sobre o comportamento da cultura em escala de dossel, comprovado pelos elevados valores de correlação com dados observados de NDVI. Mcnaughton e Jarvis (1991) discutem sobre o acoplamento de modelos teóricos foliares a imagens de satélites e verificam a possibilidade de suas utilizações e limitações. NOUVELLON et al. (2001) discutem e apresentam metodologia para acoplar modelos em diferentes escalas. No caso específico desse trabalho, tem-se que a ADS é um fator ambiental importante no controle fisiológico em ambas as escalas analisadas, sendo assim, potencialmente útil como fator acoplador entre esses modelos de diferentes escalas espaciais. No entanto, mais estudos deverão ser conduzidos em campo e em casa de vegetação a fim de se consolidar os modelos teóricos desenvolvidos e também permitir que o processo de mudanças de escalas seja realizado com maior segurança

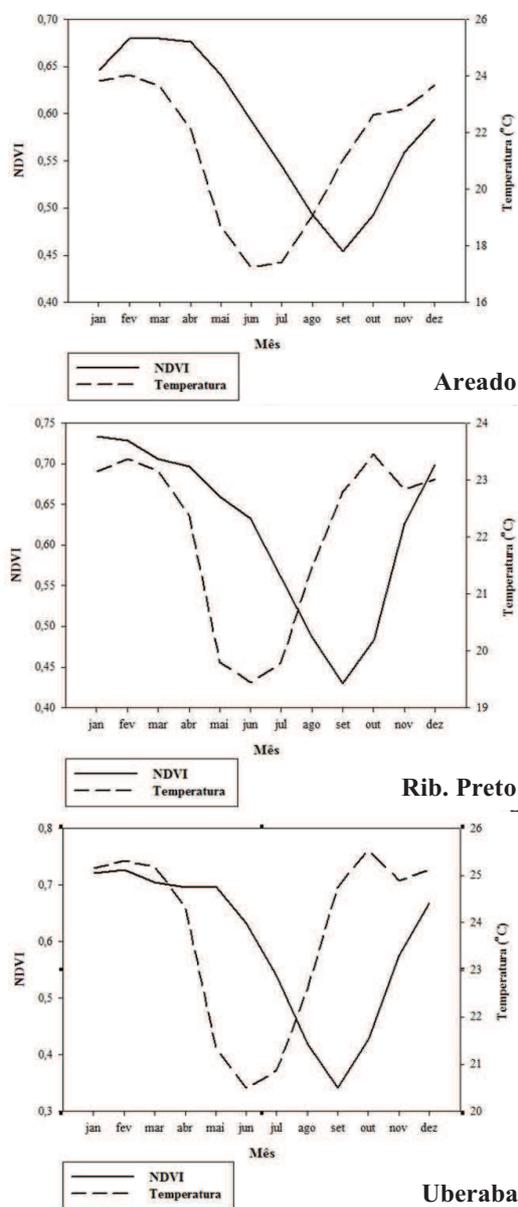


Figura 18 Padrões de comportamento médio mensal do NDVI e Temperatura para os dados relativos ao período de 2002-2011

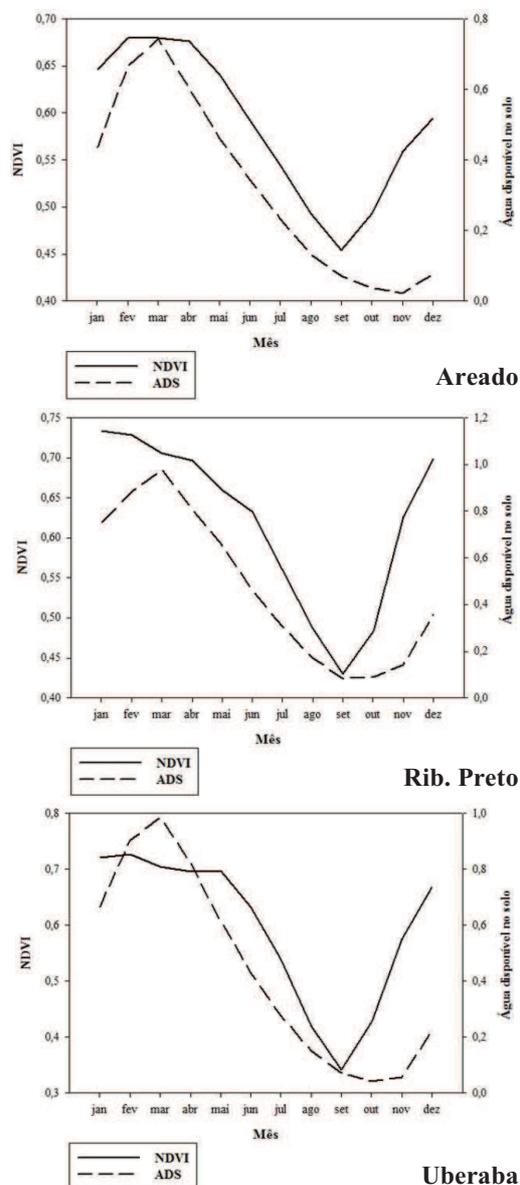


Figura 19 Padrões de comportamento médio mensal do NDVI e Água disponível no solo para os dados relativos ao período de 2002-2011

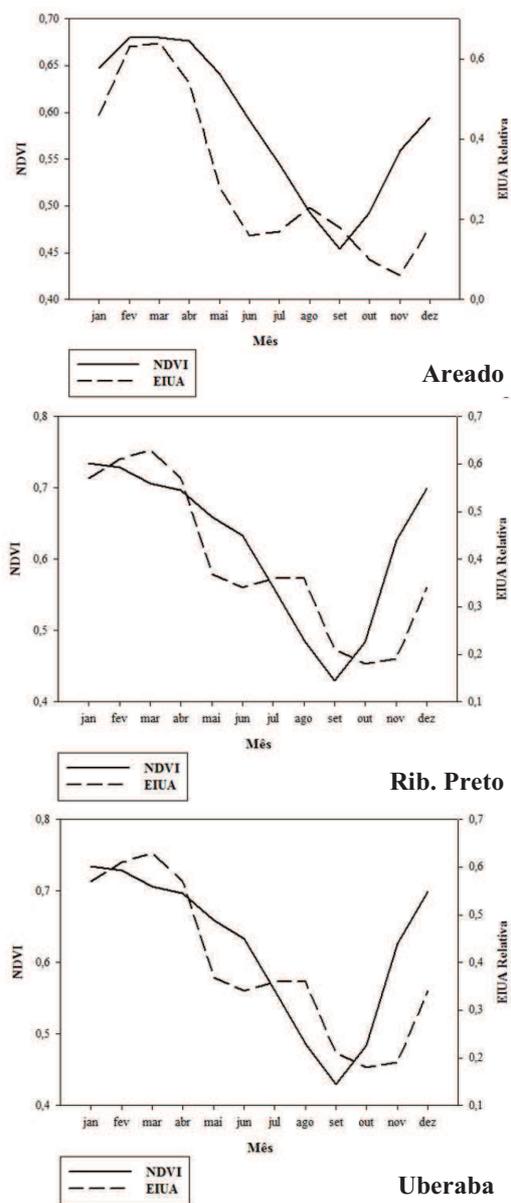


Figura 20 Padrões de comportamento médio mensal do NDVI e Adequação da EIU A para os dados relativos ao período de 2002-2011

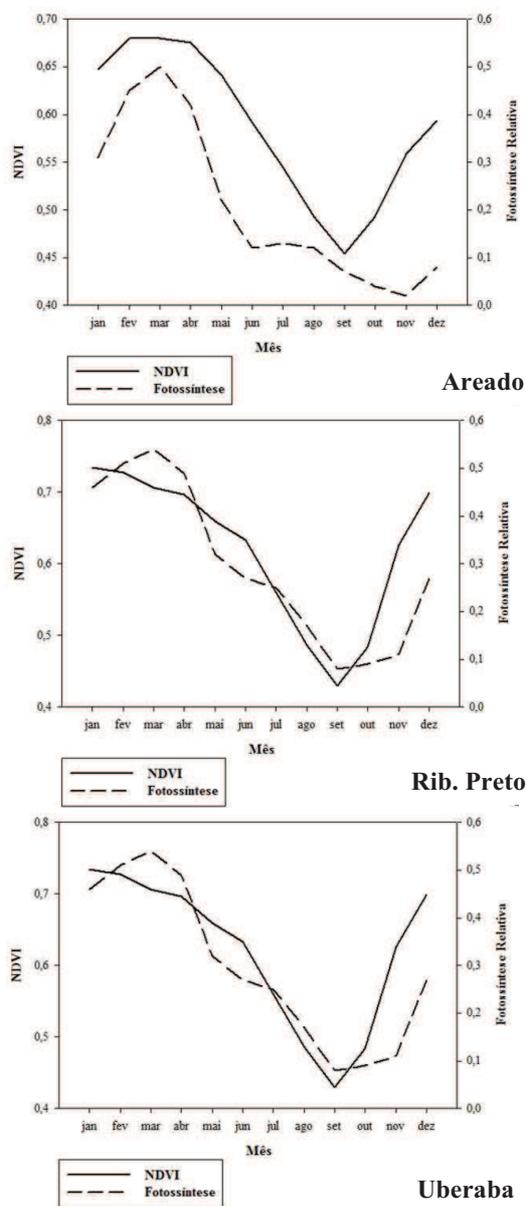


Figura 21 Padrões de comportamento médio mensal do NDVI e Adequação da Fotossíntese para os dados relativos ao período de 2002-2011

### **4.3 Análise das respostas dos parâmetros fisiológicos frente alterações nas condições ambientais em cenários futuros**

Nessa etapa, cenários climáticos futuros propostos nesse trabalho foram utilizados como dados de entrada para os modelos de EIUA e A, já validados na etapa anterior. Os resultados, apresentados na seqüência, são divididos em 4 trimestres durante o ano e apresentam o comportamento médio anual, estimado pelo modelo, dos dois parâmetros fisiológicos em estudo.

Como citado na etapa de correlação entre as variáveis ambientais e fisiológicas, o comportamento médio anual da EIUA e da fotossíntese seguiu um padrão característico durante o ano. O padrão de comportamento nos cenários climáticos propostos foi mantido em grande parte das simulações. Porém, em alguns casos foram observadas distorções em relação ao padrão geral. Nesses casos, uma discussão simplificada dessas alterações é apresentada.

Na figura 16, para a localidade de Ribeirão Preto, percebe-se que a EIUA é maior no trimestre DJF e é, estatisticamente, igual ao trimestre posterior. Esse fato pode ser explicado por uma maior pluviosidade no início da estação chuvosa, principalmente no mês de Novembro, de acordo com o verificado nos dados históricos coletados na região. Por este mesmo motivo, na mesma figura percebe-se que, no primeiro trimestre, há maior limitação por temperatura que nas demais.

Já para a figura 22, nota-se uma alteração nos padrões típicos observados com base nos dados históricos. Esse cenário 1-1 propõe uma redução na pluviosidade dos meses de Setembro, Outubro, Março e Abril. Com isso, há um atraso na recuperação de água no solo, o que, causa diminuição da EIUA no trimestre DJF. Além disso, a diminuição da pluviosidade em Março e Abril sinaliza o início da seca, levando a um aumento da EIUA. Assim nesse cenário,

a EIUA do trimestre MAM se aproxima ou se iguala, ou, pode mesmo ultrapassar os valores da EIUA do trimestre DJF. Nota-se também um predomínio da limitação por água no solo, uma vez que o pequeno aumento da temperatura favorece a fotossíntese.

Para o cenário 1-2, na figura 23, ocorre o mesmo que para o cenário 1-1, porém ainda mais explícito, devido a uma diminuição mais pronunciada da pluviosidade, de acordo com o proposto no cenário.

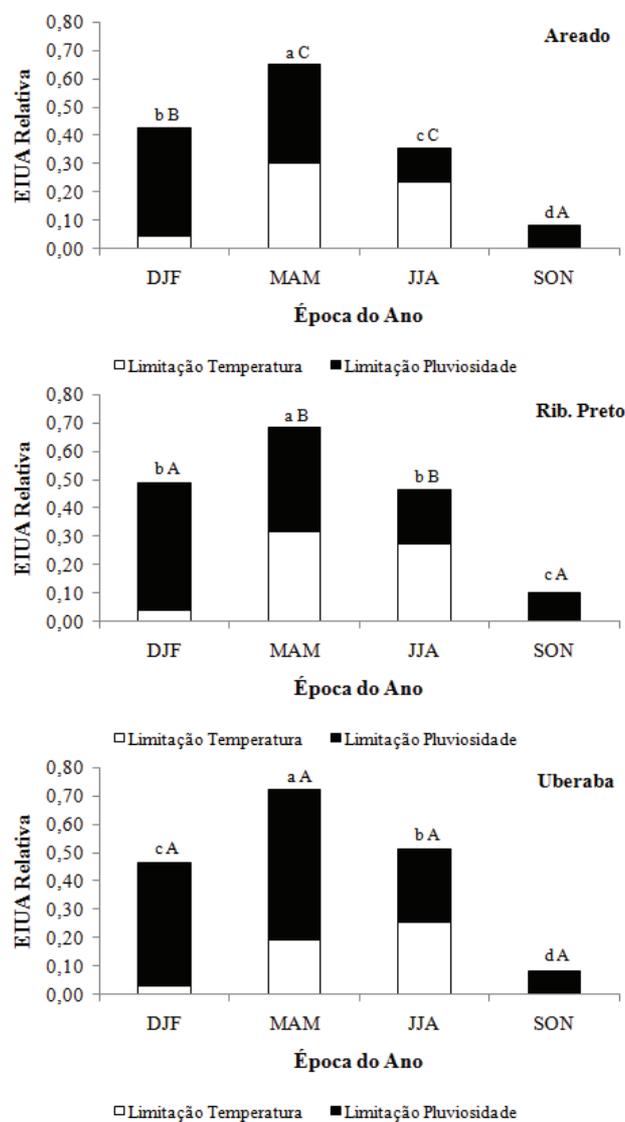


Figura 22 Média da EIUa em diferentes épocas do ano para o cenário 1-1 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

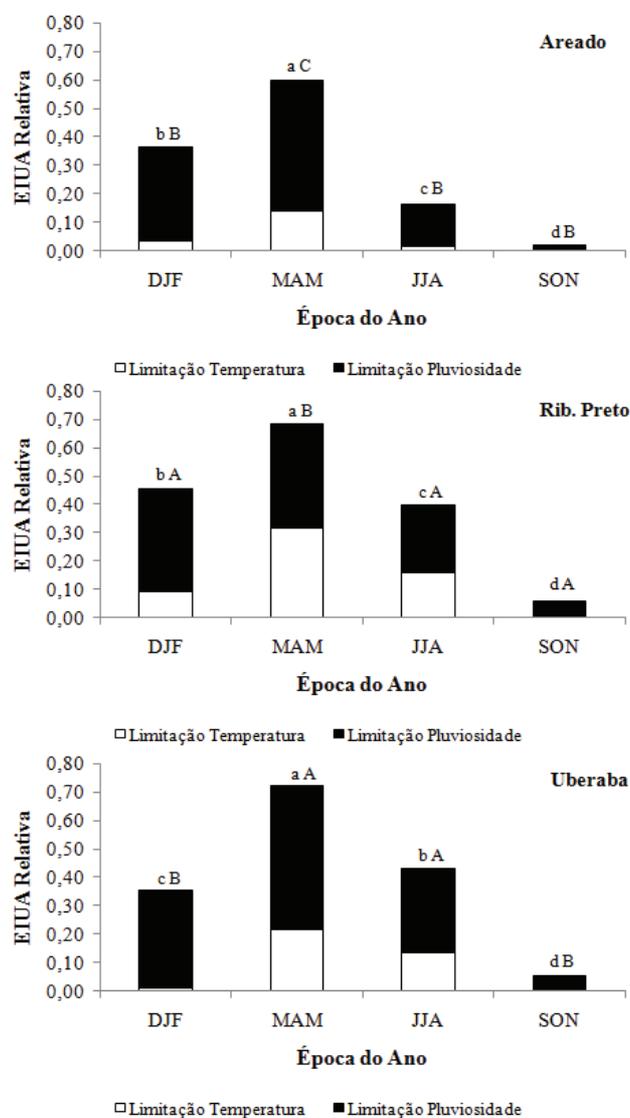


Figura 23 Média da EIUA em diferentes épocas do ano para o cenário 1-2 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

No cenário 2-1 (figura 24), pode-se perceber pouca alteração com relação ao padrão. Porém, essa manutenção dos comportamentos se deve ao fato de que o aumento da temperatura no trimestre JJA, acentuaria a retirada de água do solo por evapotranspiração nessa época. Porém a rápida reposição de água no solo, no trimestre DJF, permitiria a manutenção do padrão. Os trimestres que apresentam maiores desvios em relação aos padrões neste cenário podem ser devidos à sensibilidade dos modelos teóricos no espaço e a especificidade para cada região. O mesmo acontece para o cenário 2-2 (figura 25).

No cenário 3-2 (figura 27), a combinação de aumento da temperatura nos meses de Setembro, Outubro e Novembro e a diminuição da pluviosidade alteram o padrão de comportamento. Isso pode ser visto em menores valores de EIUA para a estação que vai de Setembro a Novembro. Já para o cenário 3-1 (figura 26) os efeitos do aumento da temperatura nos meses de fim da seca são amenizados pela rápida reposição de água no solo no trimestre DJF, mantendo o padrão inicial de comportamento.

É interessante observar que nas figuras 24 a 27, para a localidade de Ribeirão Preto, há uma totalidade de limitação pela temperatura no trimestre MAM. Isso ocorre, pois, de acordo com os dados históricos, a região de Ribeirão Preto apresenta média de água no solo maior que as demais regiões analisadas. Além disso, no período de MAM, a taxa de água no solo está muito próxima da capacidade de campo nessa região e a adequação para a EIUA fica próxima de 0,73. Dessa forma, as temperaturas baixas normais dessa época fazem com que o valor da adequação da EIUA caia para valores menores que 0,73, de acordo com o modelo proposto, ocasionando a total limitação por temperatura. Isso não ocorre nos dois primeiros cenários (Figuras 22 e 23, para a localidade de Ribeirão Preto) pois há um maior acréscimo na temperatura nesses meses, equilibrando as limitações.

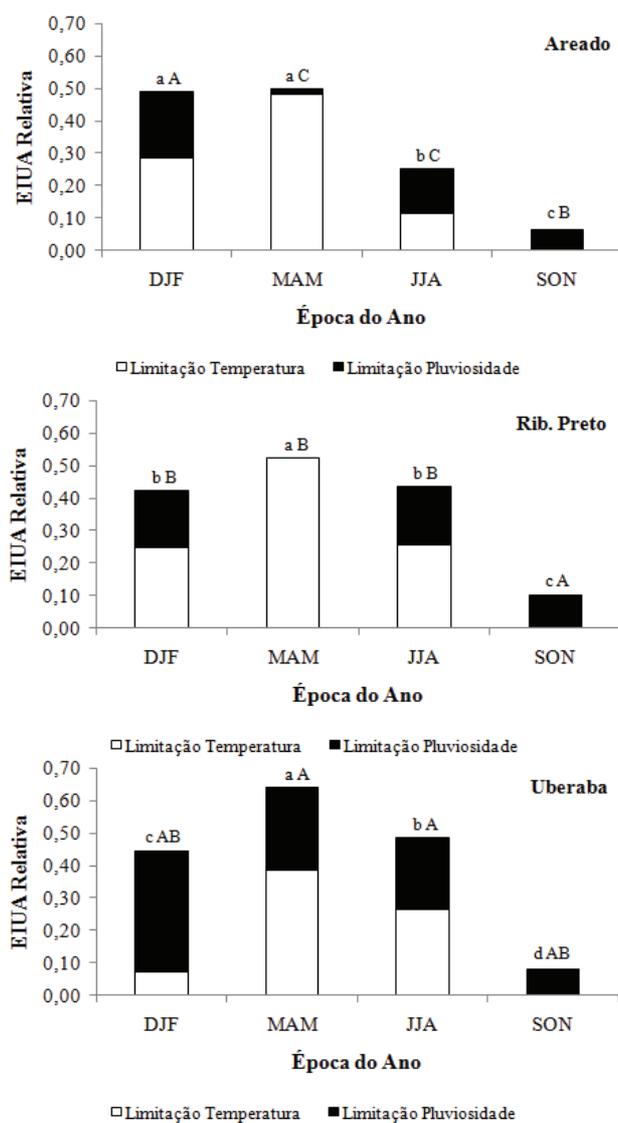


Figura 24 Média da EIUA em diferentes épocas do ano para o cenário 2-1 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

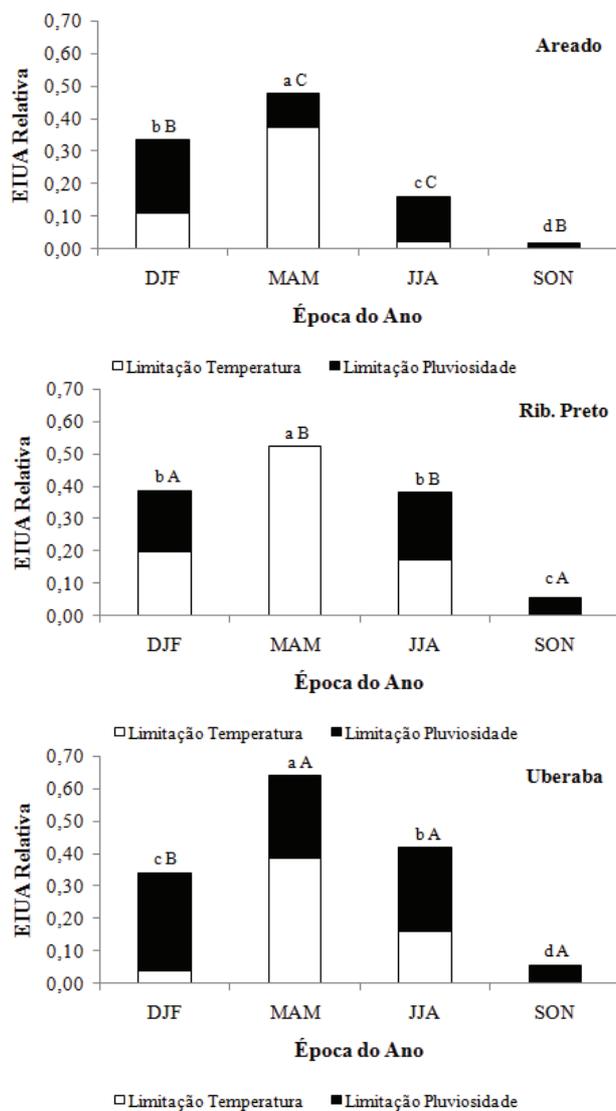


Figura 25 Média da EIU em diferentes épocas do ano para o cenário 2-2 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

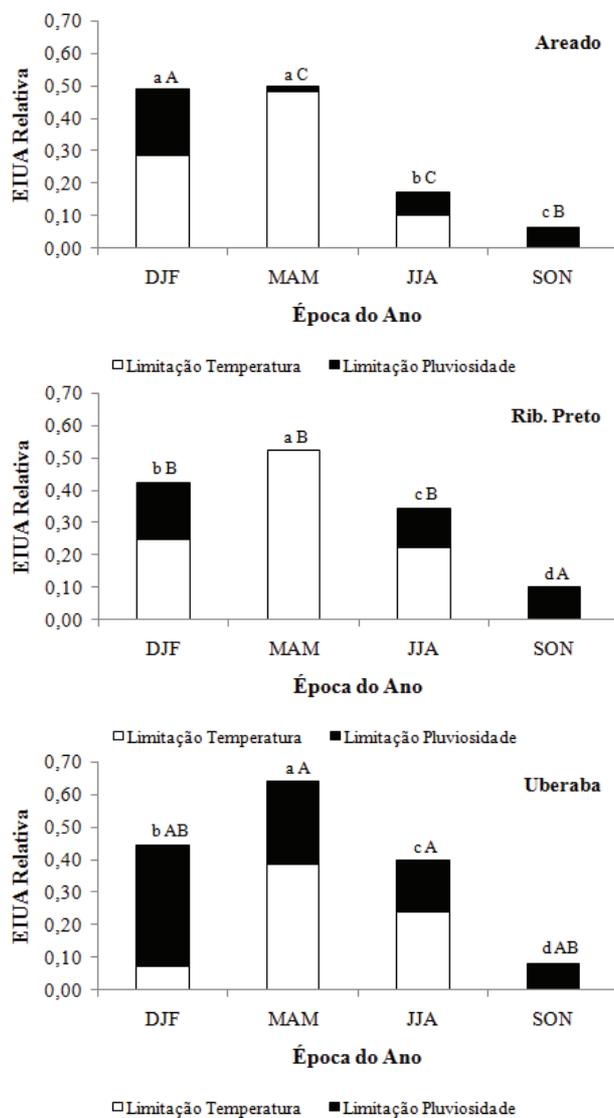


Figura 26 Média da EIU em diferentes épocas do ano para o cenário 3-1 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

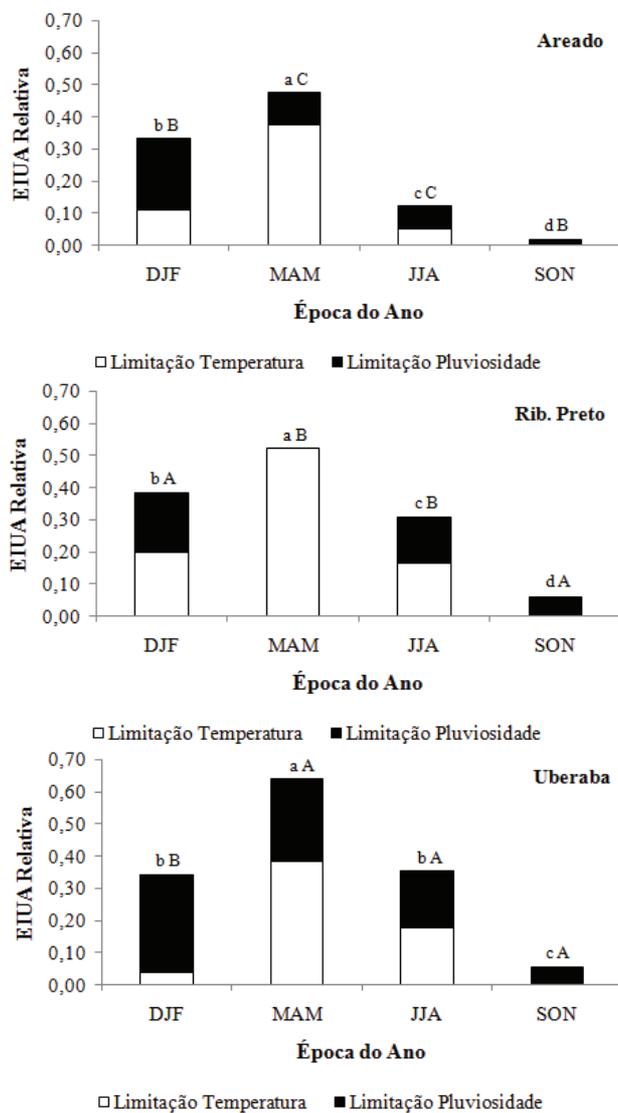


Figura 27 Média da EIUA em diferentes épocas do ano para o cenário 3-2 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

Para a fotossíntese, os padrões são mantidos na maioria dos casos, com poucas exceções.

Na figura 29, para a localidade de Areado, nota-se a quase totalidade da restrição da fotossíntese por conta da água disponível no solo. Isso se deve à grande restrição hídrica proposta no cenário, mas não só a isso. Historicamente, Areado tem os menores índices de água no solo das três localidades estudadas, e sendo os cenários baseados nos dados históricos, houve um acúmulo de fatores negativos para a quantidade de água no solo para essa área, ou seja, houve uma grande redução em uma base que já era menor que as demais. Já para Uberaba, pode-se notar uma diminuição de A no trimestre DJF. Isso se deve à menor quantidade de água repostada no solo no trimestre anterior e pode ser percebida pela quase totalidade da restrição por água no solo.

Para os cenários, predomina a limitação por água disponível no solo em três das quatro estações, e, por temperatura, no trimestre MAM.

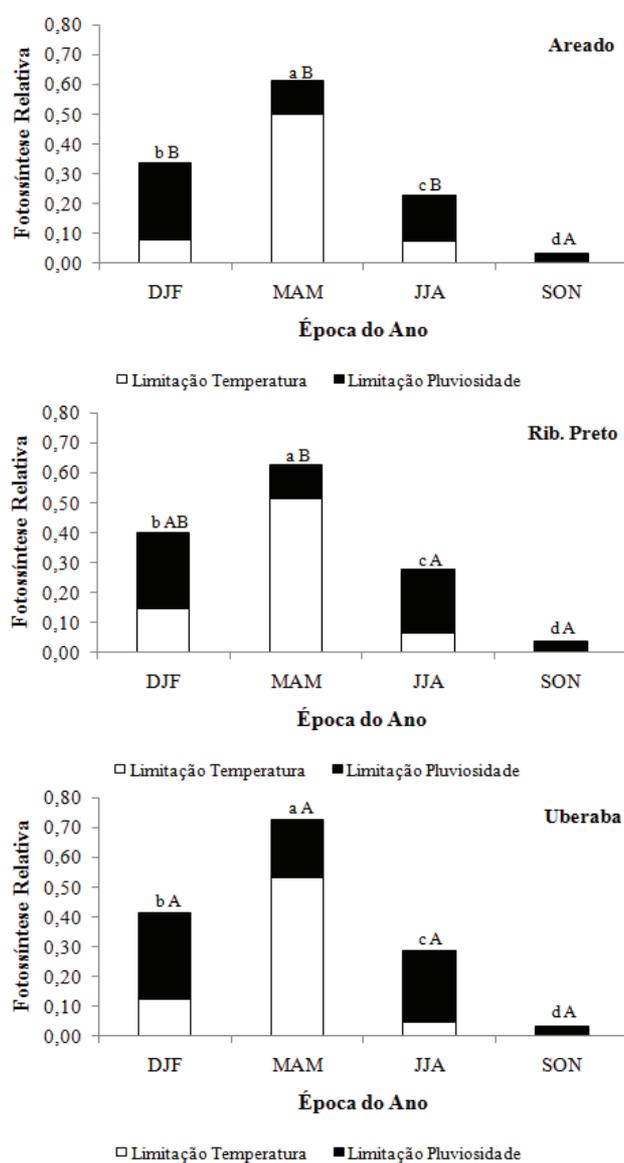


Figura 28 Média da A em diferentes épocas do ano para o cenário 1-1 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

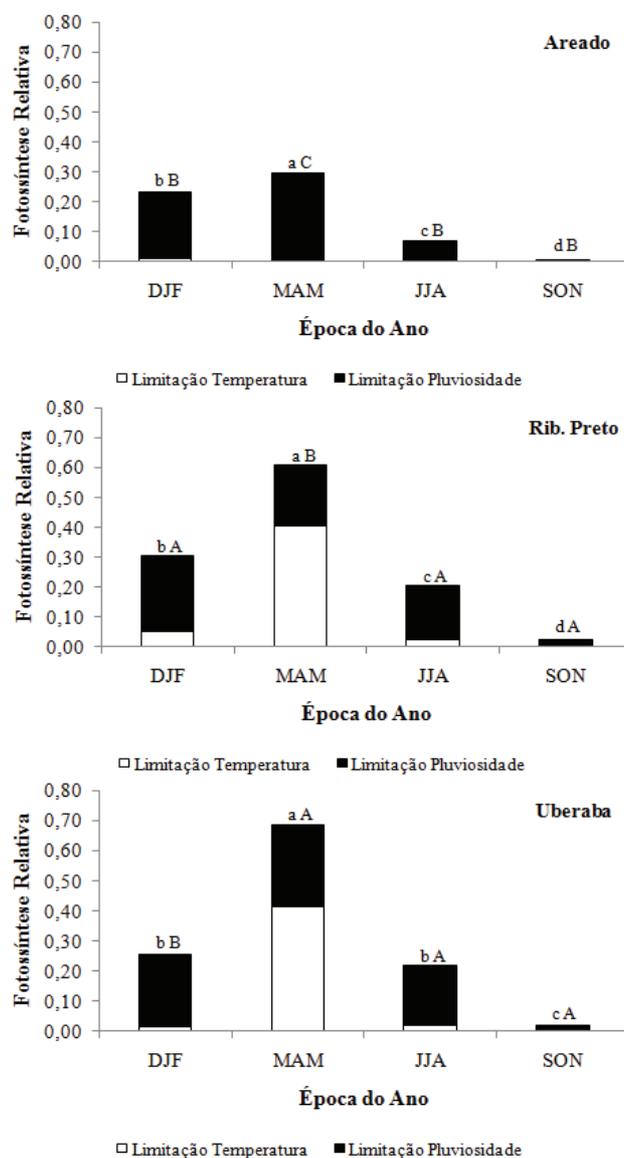


Figura 29 Média da A em diferentes épocas do ano para o cenário 1-2 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

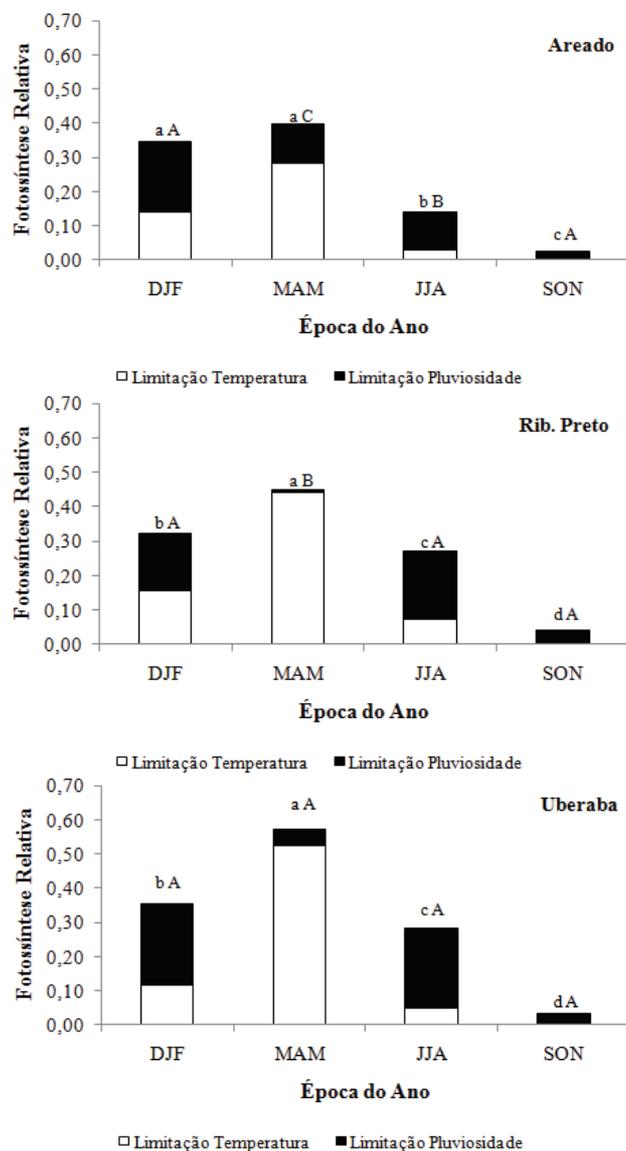


Figura 30 Média da A em diferentes épocas do ano para o cenário 2-1 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

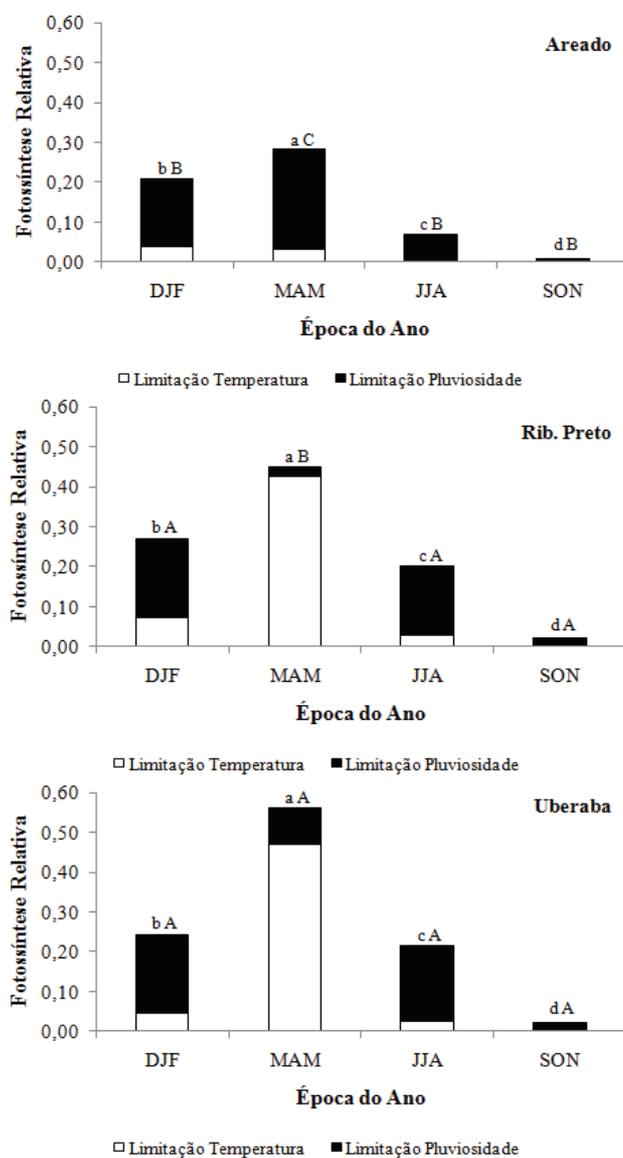


Figura 31 Média da A em diferentes épocas do ano para o cenário 2-2 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

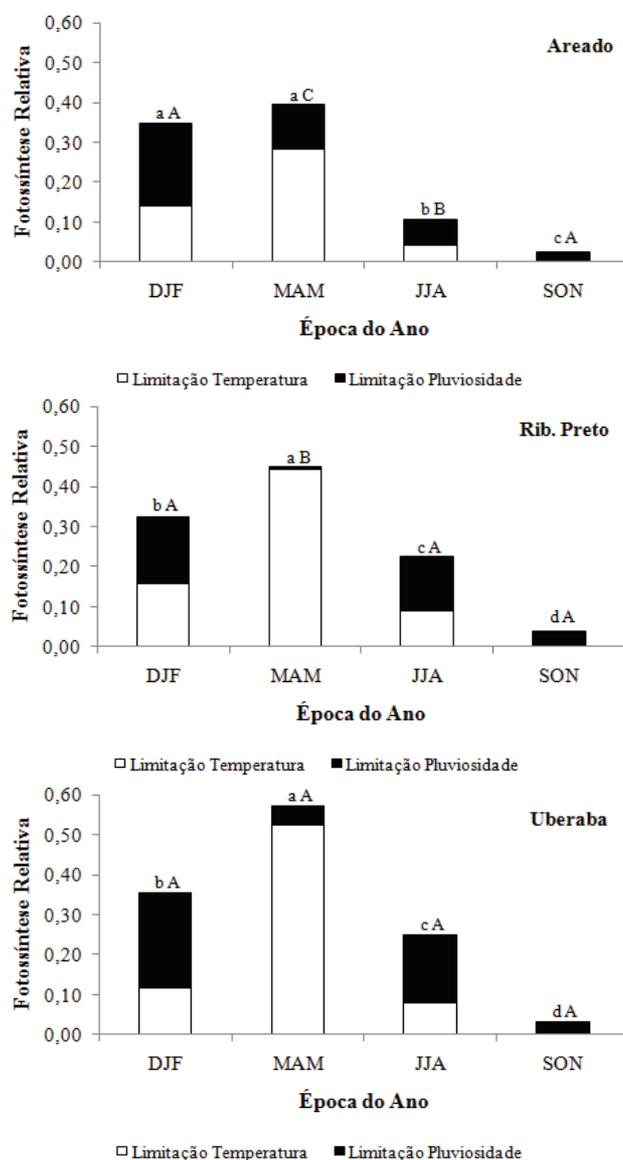


Figura 32 Média da A em diferentes épocas do ano para o cenário 3-1 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

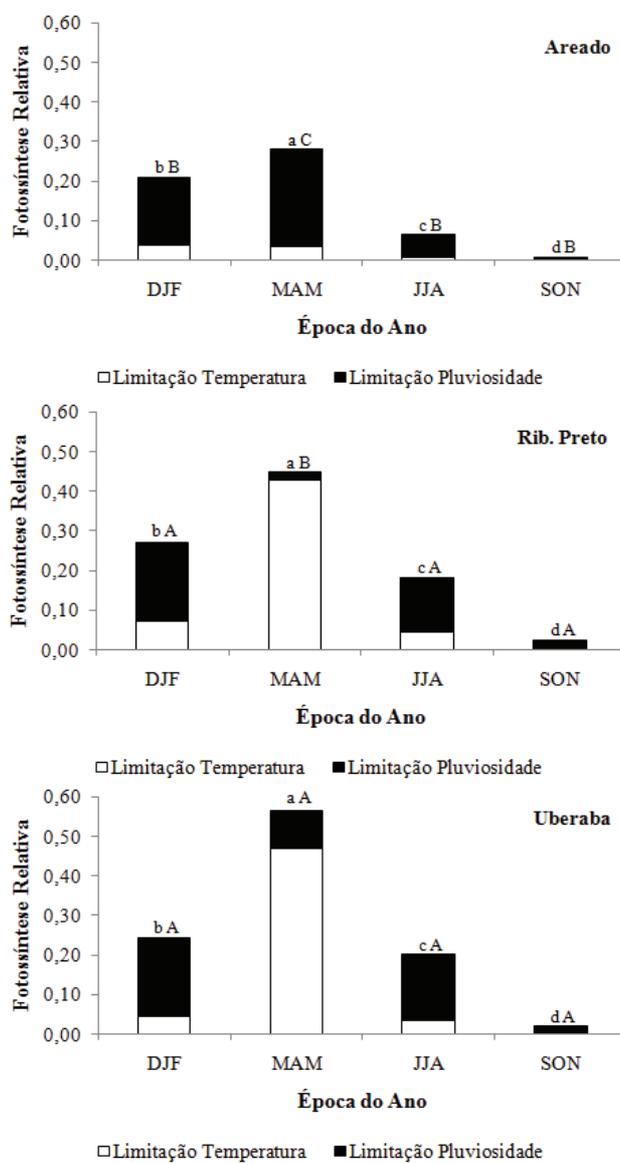


Figura 33 Média da A em diferentes épocas do ano para o cenário 3-2 de clima. As letras minúsculas acima das barras indicam comparações entre as diferentes épocas do ano dentro de cada localidade; as letras maiúsculas representam comparações entre as diferentes localidades dentro de cada época do ano. Letras iguais representam médias iguais ao nível de 5% de significância

A partir da comparação das áreas de estudo, pode-se perceber que, na maioria dos casos, Uberaba apresenta uma maior taxa fotossintética que Areado, e Ribeirão Preto está em uma posição intermediária entre os dois, por vezes se igualando, estatisticamente, a algum deles. Isso pode acontecer pelo fato de que a região de Uberaba apresenta média histórica (2002-2011) de temperatura maior que as demais, com uma diferença de 2,5°C para Areado e de 1,7°C para Ribeirão Preto. Já para água no solo, Uberaba se aproxima de Ribeirão Preto, com uma média anual de 0,44% de água no solo, e Ribeirão Preto com 0,47%. Já Areado tem uma média mais baixa, da ordem de 0,34%, o que explica menores valores de A.

Com base nos resultados obtidos para as simulações, considerando-se os cenários de mudanças climáticas, observa-se que existe uma diversidade de respostas obtidas pelos modelos. A manutenção do padrão de comportamento ocorre, basicamente, pela generalidade do clima predominante no país com a estação mais fria, seca e a estação mais quente, chuvosa. Porém, um aumento pontual de temperatura ou um atraso nas chuvas mostrou diferentes comportamentos dos modelos. Isso mostra a capacidade de sensibilidade do modelo frente a alterações das condições ambientais. Além disso, o comportamento diferenciado para cada área mostra essa sensibilidade ao fator espacial. Contudo, o fato mais importante a ser destacado é que, com alterações no clima, há mudanças nos padrões de resposta das plantas, que podem ser percebidas por modelos simples que, por sua vez, têm grande potencial para serem incorporados em estruturas de simulação mais complexas, a fim de melhorar as previsões de safra diante de variações do clima, bem como as previsões de cenários futuros de uso da terra.

Dessa forma, a sensibilidade do modelo se mostra como um ponto positivo e que dá embasamento para a indicação desse modelo para o estudo de cenários futuros de clima. Porém, alguns ajustes ainda são necessários para

aumentar a confiabilidade do mesmo. Por exemplo: uma melhor validação do modelo com dados de experimentação em campo nas regiões de interesse; a verificação do comportamento em regiões com menor variação sazonal de clima e um estudo mais detalhado da relação entre os parâmetros foliares e de dossel.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Ao final desse trabalho pode-se perceber que as questões levantadas inicialmente foram respondidas em grande parte. O assunto geral é de interesse e a problemática se mostra condizente com a realidade da agricultura mundial.

Inicialmente, pode-se dizer que o desenvolvimento de uma nova metodologia permitiu abordar o problema da modelagem de parâmetros fisiológicos de um ponto de vista próprio e inovador, além de que, tal metodologia pode ser utilizada como ponto de partida para novos pesquisadores.

Além disso, notou-se que os modelos teóricos de EIUA e A mostraram-se responsivos aos parâmetros climáticos estudados, tanto em escala espacial como em escala temporal. Porém, existe a necessidade de levar em consideração outros fatores como, por exemplo: a fenologia da cana-de-açúcar, os períodos de plantio e colheita, a alocação nas partes da planta do carbono assimilado pela fotossíntese, além da produtividade final em peso de matéria verde e também em quantidade de sacarose.

O método de validação mostrou-se adequado, porém, devem-se buscar outras formas de validação para dar maior confiabilidade aos modelos. A avaliação dos parâmetros fisiológicos de plantas de cana-de-açúcar em campo ou casa de vegetação, sob condições controladas, (principalmente de temperatura do ar e água no solo), pode mostrar imperfeições no comportamento previsto pelos modelos. Em adição a isso, o uso do NDVI pode permitir uma melhor compreensão da relação do índice de área foliar e da fenologia da cultura com os parâmetros fisiológicos.

Por fim, a adaptação dos modelos propostos para outras regiões e culturas deve passar por uma avaliação criteriosa, principalmente em espécies com características fisiológicas diferentes das da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, P.; PRASAD, M.N.V. Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability. **Springer**. 2012.

ANGELOCCI, L.R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. 2002.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*. v 112, n 2-3, p 119-123, 2009.

BOGARDI, J.J.; DUDGEON, D.; LAWFORD, R.; FLINKERBUSCH, E.; MEYN, A.; PAHL-WOST, C.; VIELHAUER, K.; VÖRÖSMARTY, C. Water security for a planet under pressure: interconnected challenges of a changing world call for sustainable solutions. **Current Opinion in Environmental Sustainability**. v 4, p 35-43, 2012.

BOTA, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? **New Phytology**. v 162, p 671-681, 2004.

CARLIN, S.D.; SANTOS, D.M.M dos. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v 44, n 9, p 1106-1113, 2009.

CERRI, C.E.P.; SPAVOREK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Tropical Agriculture and Global Warming: Impacts and Mitigation Options. **Scientia Agricola**. v 64, n 1, p 83-99, 2007.

CHAVES, M.M.; MAROCO, J.P.; PEREIRA, J.S. Understanding plant responses to drought - from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**. v 30, n 3, p 239 - 264, 2003.

CIESLIK, S.; OMASA, K.; PAOLETTI, E. Why and how terrestrial plants exchange gases with air. **Plant Biology**. v 11, n 1, 2009

CONAB.

[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_05\\_27\\_11\\_53\\_13\\_boletim\\_ca\\_na\\_portugues\\_-\\_maio\\_2012\\_1o\\_lev.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_27_11_53_13_boletim_ca_na_portugues_-_maio_2012_1o_lev.pdf). Acessada em 12 de Dezembro de 2012.

CUMMING, G.; FIDLER, F.; VAUX, D.L. Error bars in experimental biology. **The Journal of Cell Biology**. v 177, n 1, 2007.

DA MATTA, F. M.; LOOS, R. A.; RODRIGUES, R.; BARROS, R. A. Actual and potential photosynthetic rates of tropical crop species. **Rev. Bras. Fisiol. Veg.** v 13, n 1, p 24-32, 2001.

DARDENGO, M.C.J.D.; EFFGEN, T.A.M.; TATAGIBA, S.D.; REIS, E.F.; PASSOS, R.R. Avaliação da capacidade de campo em dois solos da região sul do estado do Espírito Santo por diferentes métodos de determinação. **Anais do Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, 8.; Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação, 5.** p 1736-1739, 2005.

DE BOECK, H.J.; DRESSEN, F.E.; JANSSENS, I.A.; NIJS, I. Whole-system responses of experimental plant communities to climate extremes imposed in different seasons. **New Phytologist.** v 189, p 806–817, 2011.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. **FAO: Irrigation and Drainage Paper, 24.** 179 p, 1975.

DWYER, S. A.; GHANNOUM, O.; NICOTRA, A.; VON CAEMMERER, S. High temperature acclimation of C<sub>4</sub> photosynthesis is linked to changes in photosynthetic biochemistry. **Plant, Cell and Environment.** v 30, p 53–66, 2007.

EMBRAPA. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. **Dados eletrônicos.** Rio de Janeiro : Embrapa Solos. 67 p, 2011.

ENDRES, L.; SILVA, J.V.; FERREIRA, V.M.; BARBOSA, G.V. de S. Photosynthesis and Water Relations in Brazilian Sugarcane. **The Open Agriculture Journal.** v 4, p 31-37, 2010.

FAO. <http://faostat.fao.org/default.aspx> (2009). Acessado em 28 de Novembro de 2012.

FAO. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (2011). Acessado em 12 de Dezembro de 2012.

FARRAR, J. F. The respiratory source of CO<sub>2</sub>. **Plant, Cell & Environment.** v 8, n 6, p 427-438, 2006.

FLEXAS, J.; GALLÉ, A.; GALMÉS, J.; RIBAS-CARBO, M.; MEDRANO, H. The Response of Photosynthesis to Soil Water Stress. **Plant Responses to Drought Stress.** 2012.

GILBERT, M.E.; ZWIENIECKI, M.A, HOLBROOK, N.M. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought. **Journal of Experimental Botany.** v 62, n 8, p 2875–2887, 2011

GODFRAY, H.C.J.; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J.F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S.M.; TOULMIN, C. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. **Science**. v 327, p 812-818, 2010.

GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and Technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. **Scientia Agricola**. v 66, n 5, p 593-605, 2009.

GRAÇA, J. P.; RODRIGUES, F. A.; FARIAS, J. R. B. OLIVEIRAS, M. C. N.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; ZINGARETTI, S. M. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. v 22, n 3, p 189-197, 2010.

HAVAUX, M. 1992. Stress tolerance of photosystem II in vivo: Antagonistic effects of water, heat and photoinhibition stresses. *Plant Physiology*. v 100, p 424–432. 1992.

HAYLOCK M.R.; PETERSON, T.C.; ALVES, L.M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, Y.M.T.; BAEZ, J.; BARROS, V.R.; BERLATO, M.A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V.J.; GRIMM, A.M.; KAROLY, D.; MARENGO, J.A.; MARINO, M.B.; MONCUNILL, D.F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J.L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L.A. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**. v 19, p 1490, 2006.

HE, J.X.; WANG, J.; LIANG, H.G. Effects of water stress on photochemical function and protein metabolism of photosystem II in wheat leaves. *Physiol. Plant*. v 93, p 771-777, 1995.

HEGERL, G.C.; HANLON, H.; BEIERKUHNLIN, C. Elusive extremes. **Nature Geoscience**. v 4, p 142–143, 2011.

HELAOUËT, P.; BEAUGRANG, G. Physiology, Ecological Niches and Species Distribution. **Ecosystems**. v 12, p 1235–1245, 2009.

HO, Q.T.; VERBOVEN, P.; YIN, X.; STRUIK, P.C.; NICOLAÏ, B.M. A microscale model for combined CO<sub>2</sub> diffusion and photosynthesis in leaves. **PLoS ONE**. v 7, 2012.

IIASA (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS). **Annual Report**. 34p, 2010.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Climate Changes 2007: Synthesis Report**. 2007

JARVIS, A.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; CAMPO, B.V.H.; NAVARRO-RACINES, C. Is Cassava the Answer to African Climate Change Adaptation? **Tropical Plant Biology**. 2012.

KALDENHOFF, R. Mechanisms underlying CO<sub>2</sub> diffusion in leaves. **Current Opinion in Plant Biology**. v 15, n 3, p 276–281, 2012.

KATUL, G.G.; OREN, R.; MANZONI, S.; HIGGINS, C.; PARLANGE, M.B. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. **Reviews of Geophysics**. v 50, n 3, 2012.

KEARNEY, M.; PORTER, W. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species ranges. **Ecology Letters**. v 12, 2009

KERR, R.A. How hot will the greenhouse world be? **Science**. v 309, p 100, 2005.

KLESHCHENKO, A.D.; GONCHAROVA, T.A.; NAIDINA, T.A. Using the satellite data in dynamic models of crop yield forecasting. **Russian Meteorology and Hydrology**. v 37,n 4, p 279-285, 2012.

KOONJAH, S.S.; WALKER, S.; SINGELS, A.; VAN ANTWERPEN, R. NAYAMUTH, A.R. A quantitative study of water stress effect on sugarcane photosynthesis. **Proc S Afr Sug Technol Ass**. v 80, p 148, 2006.

LAWLOR, D.W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of Botany**. v 103, p 561–579, 2009.

LEA, P.J.; LEEGOOD, R.C. **Plant Biochemistry and Molecular Biology**. 1999.

LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**. v 90, p 119–139, 1998.

LOVELLI, S.; PERNIOLA, M.; SCALCIONE, E.; TROCCOLI, A.; ZISKA, L. Future climate change in the Mediterranean area: implications for water use and weed management. **Italian Journal of Agronomy**. v 7, p 44-49, 2012.

MACEDO. I.C.; SEABRA, J.E.A.; SILVA, J.E.A.R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**. v 32, n 7, p 582-595, 2008.

MALHI, Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. **Journal of Ecology**. v 100, p 65–75, 2012.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v 8, p 5-28, 2007.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; NASSIF, D.S.P.; VIANA, M.S.; SOARES, F.A.; CABRAS, L.L.; GUIATTO, D. Cenários futuros para cana-de-açúcar no estado de São Paulo baseados em projeções regionalizadas de mudanças climáticas. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. 2009.

MARUTANI, Y.; YAMAUCHI, Y.; KIMURA, Y.; MIZUTANI, M.; SUGIMOTO, Y. Damage to photosystem II due to heat stress without light-driven electron flow: involvement of enhanced introduction of reducing power into thylakoid membranes. **Planta**. v 236, n 2, p 753-761, 2012.

MEDYIGY, D.; WOFYSY, S.C.; MUNGER, J.W.; MOORCROFT, P.R. Responses of terrestrial ecosystems and carbon budgets to current and future environmental variability. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**. v 107, n 18, p 8275-8280, 2010.

MCNAUGHTON, K.G.; JARVIS, P.G. Effects of spatial scale on stomatal control of transpiration. **Agricultural and Forest Meteorology**. v 54, n 2-4, p 279-302, 1991.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: General Synthesis. **Island Press**. 765p, 2005.

MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**. v 11, n 1, p 15-19, 2006.

NOUVELLON, Y.; MORAN, M.S.; SEEN, D.L.; BRYANT, R.; RAMBAL, S.; NI, W.; BÉGUÉ, A.; CHEHBOUNI, A.; EMMERICH, W.E.; HEILMAN, P.; QI, J. Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets. **Remote Sensing of Environment**. v 78, p 131 – 149, 2001.

PARRY, M.A.J.; ANDROLOJC, P.J.; KHAN, S.; LEA, P.J.; KEYS, A.J. Rubisco activity: Effects of drought stress. **Annals of Botany**. v 89, p 833–839, 2002.

PINHEIRO, C.; CHAVES, M.M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**. v 62, n 3, p 869–882, 2011

PRASAD, P.V.V., BOOTE, K.J.; VU, J.C.V; ALLEN JR, L.H. The carbohydrate metabolism enzymes sucrose-P synthase and ADG-pyrophosphorylase in phaseolus bean leaves are up-regulated at elevated growth carbon dioxide and temperature. **Plant Science**. v 166, p 1565–1573, 2004.

PEREIRA, L.F.M; SILVA, A.H.A.; GONÇALVES, E.R.; VERISSIMO, V.; CAVALCANTE, P.G.S.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W. de G.; CRUZ, S.J.S.; SILVA JÚNIOR, I.M.; ENDRES, L. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em variedades

de cana-de-açúcar submetidas a dois regimes hídricos. **Anais da IX Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFRPE**. 2009

RAGHAYENDRA, A.S.; SAGE, R.F. C<sub>4</sub> Photosynthesis and Related CO<sub>2</sub> Concentrating Mechanisms. **Series: Advances in Photosynthesis and Respiration**. v 32. 2010.

RIPLEY, B.; FROLE, K.; GILBERT, M. Differences in drought sensitivities and photosynthetic limitations between co-occurring C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> (NADP-ME) Panicoid grasses. **Annals of Botany**. v 105, p 493–503, 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; D. W. DEERING. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA**. v 351, p 3010-3017, 1974.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**. v 2, n 4, p 1057-1076, 2010.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de latossolos e neossolos quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v 27, n 2, p 389-393, 2003.

SAGE, R.F.; COLEMAN, J.R. Effects of low atmospheric CO<sub>2</sub> on plants: more than a thing of the past. **Trends in Plant Science**. v 6, n 1, 2001.

SAGE, R.F.; KUBIEN, D.S. The temperature response of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> photosynthesis. **Plant, Cell and Environment**. v 30, p 1086–1106, 2007.

SALVUCCI, M.E.; CRAFTS-BRANDER, S.J. Mechanism for deactivation of Rubisco under heat stress. **Physiol. Plant**. v 122, p 513–519, 2004.

SEARLE, S.Y.; THOMAS, S; GRIFFIN, K.L.; HORTON, T.; KORNFELD, A; YAKIR, D.; HURRY, V.; TURNBULL, M.H. Leaf respiration and alternative oxidase in field-grown alpine grasses respond to natural changes in temperature and light. **New Phytologist**. v189, p 1027–1039, 2011.

SILVA, M.A.; SILVA, J.A.G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**. v 65, n 6, p 620-627, 2008.

SMITH, M.D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research. **Journal of Ecology**. v 99, p 656–663, 2011.

SUGARCANE CROPS. <http://www.sugarcane crops.com/p/climate>. Acessado em 12 de Dezembro de 2012.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**. New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955.

THORNTON, P. Recalibrating Food Production in the Developing World: Global Warming Will Change More Than Just the Climate. **CCAFS Policy Brief no. 6**. 2012.

TSCHARNTKE, T.; CLOUGH, Y.; WANGER, T.C.; JACKSON, L.; MOTZKE, I.; PERFECTO, I.; VANDERMEER, J.; WHITBREAD, A. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. **Biological Conservation**. v 151, n 1, p 53-59, 2012

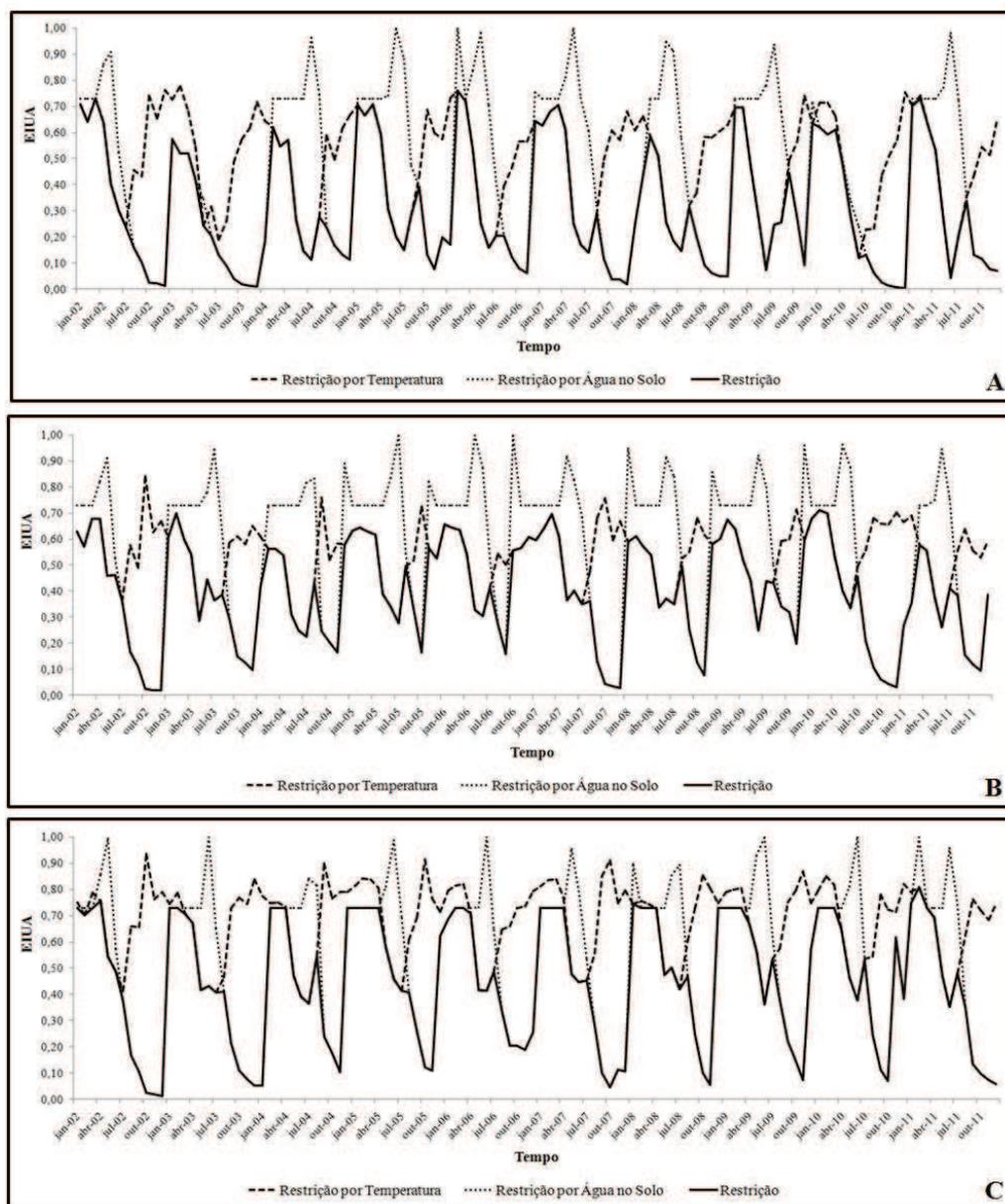
VU, J.C.V.; ALLEN JR, L.H. Growth at elevated CO<sub>2</sub> delays the adverse effects of drought stress on leaf photosynthesis of the C<sub>4</sub> sugarcane. **Journal of Plant Physiology**. v 166, n 2, p 107-116, 2009.

WALDHEIM, P.V.; CARVALHO, V.S.B.; CORREA, E.; FRANÇA, J.R. de A. Sugar Cane, Orange and Herbaceous Cotton Climatic Zoning for the Northeast Region of Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v 29-2, p 30-43, 2006.

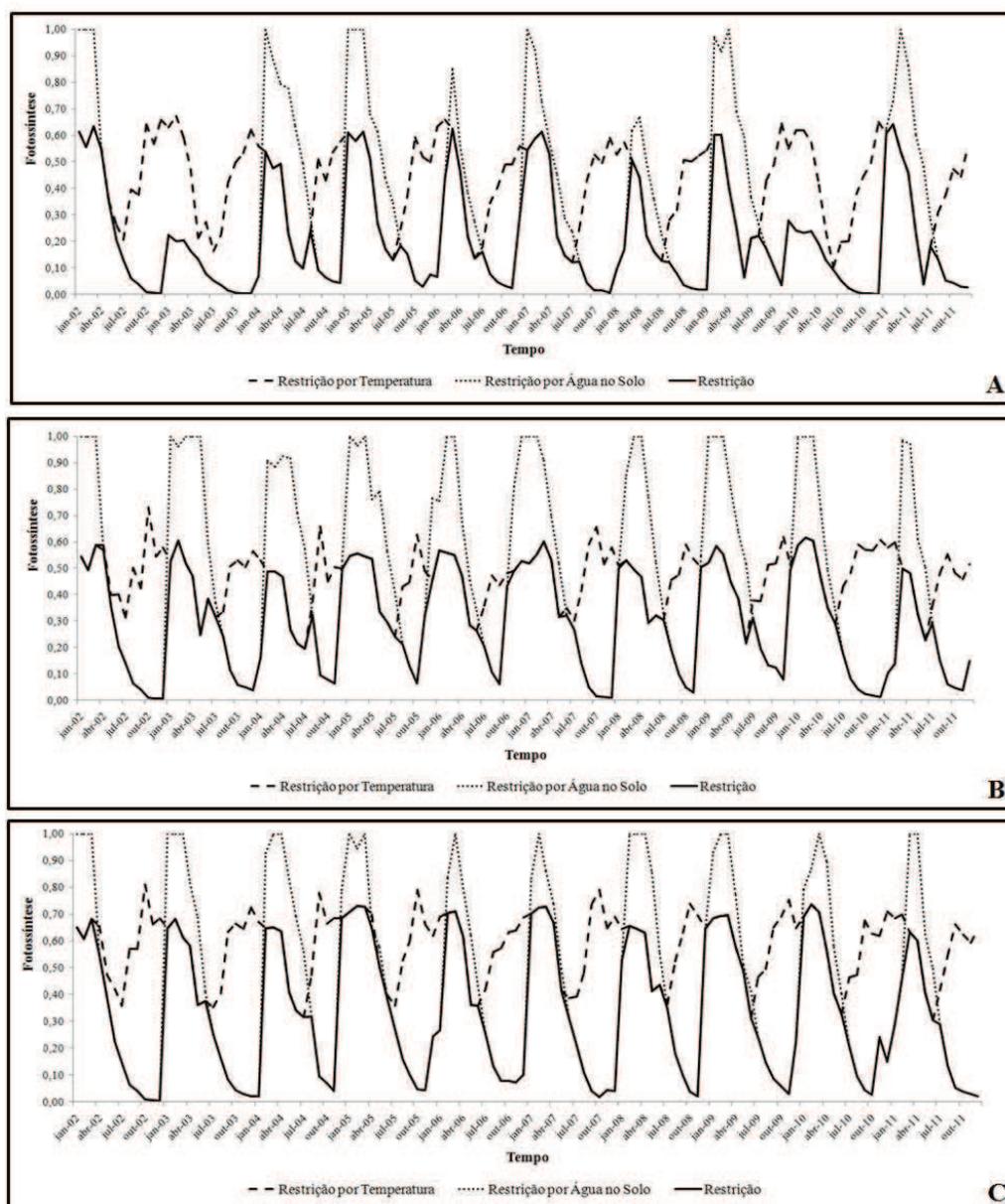
WARAICH E.A.; AHMAD R.; ASHRAF M.Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Aust. Journal Crop Science*. v 5, p 764-777, 2011.

ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 through 2009. **Science**. v 329, n 5994, p 940-943, 2010.

## ANEXO 1

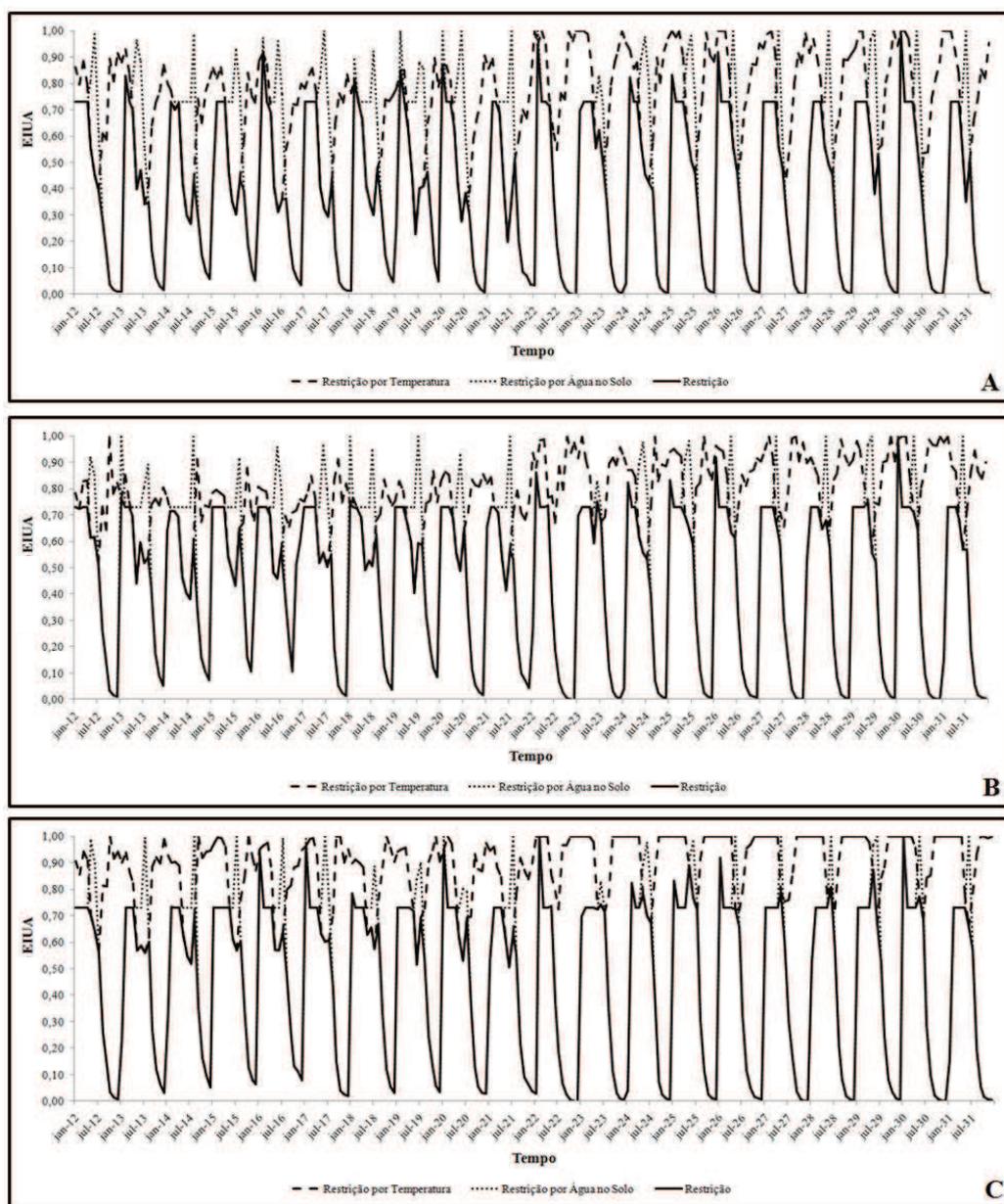


Modelo de EIUUA aplicada à série histórica de clima. A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG

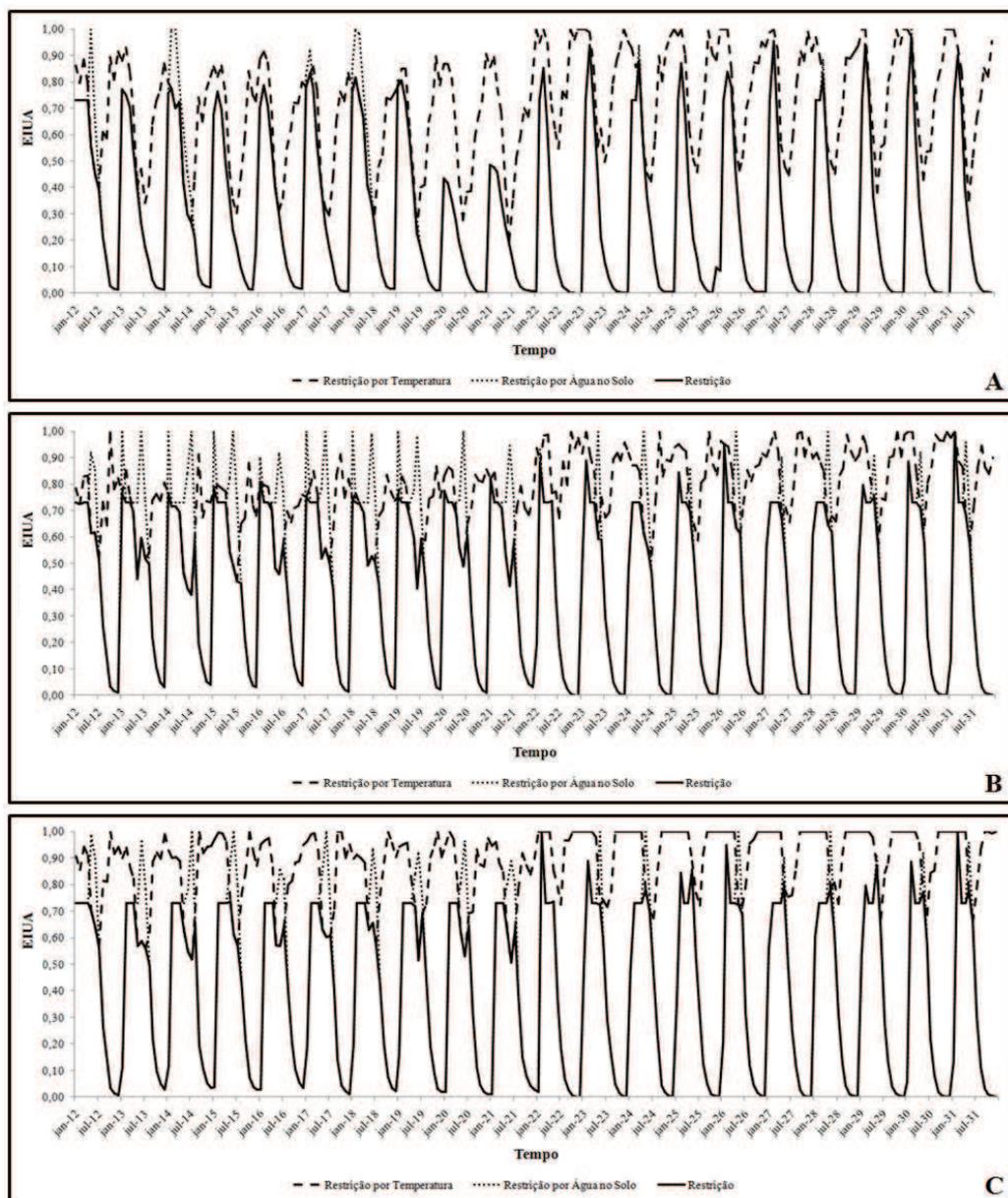


Modelo de Fotossíntese aplicada à série histórica de clima. A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG

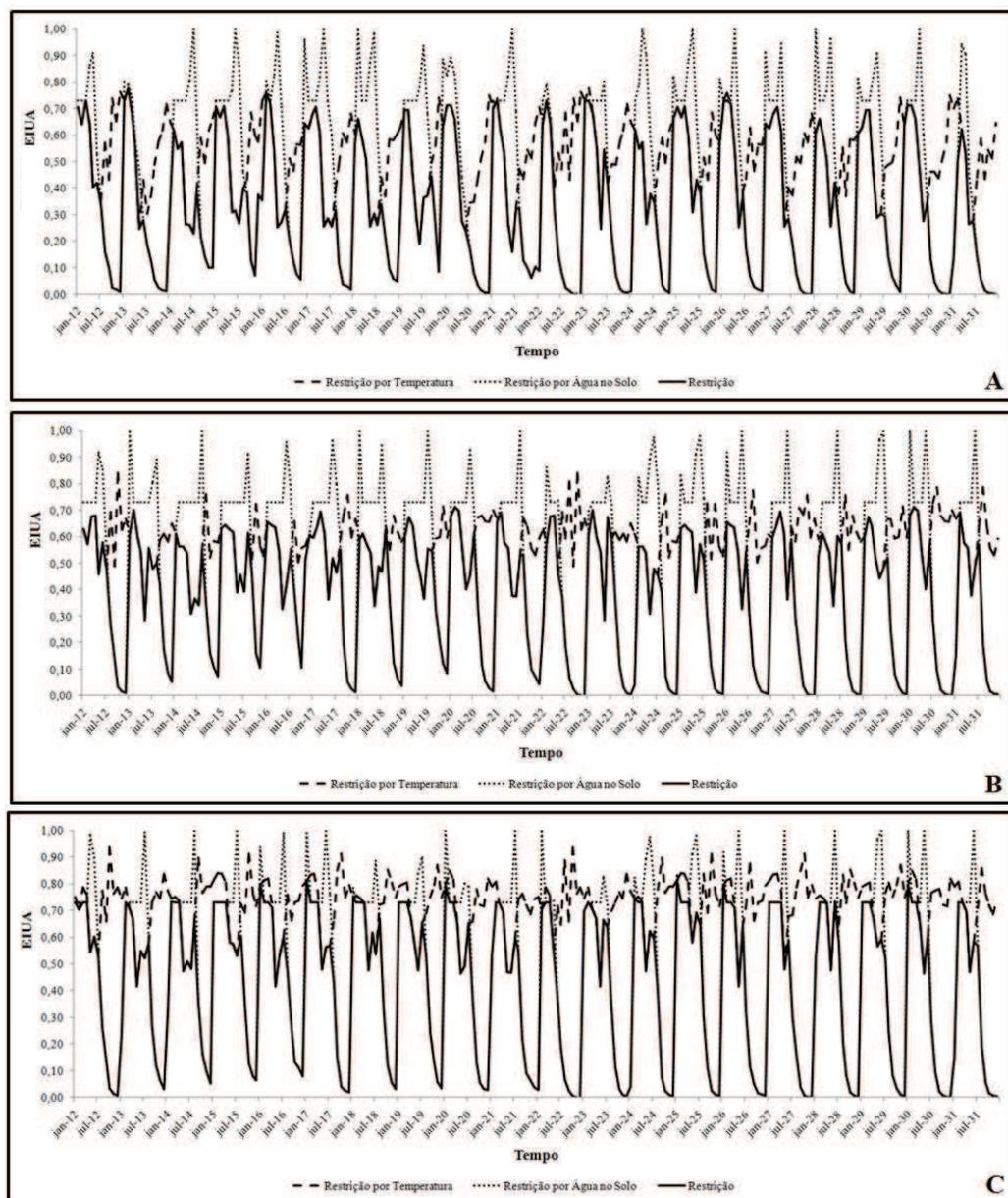
## ANEXO 2



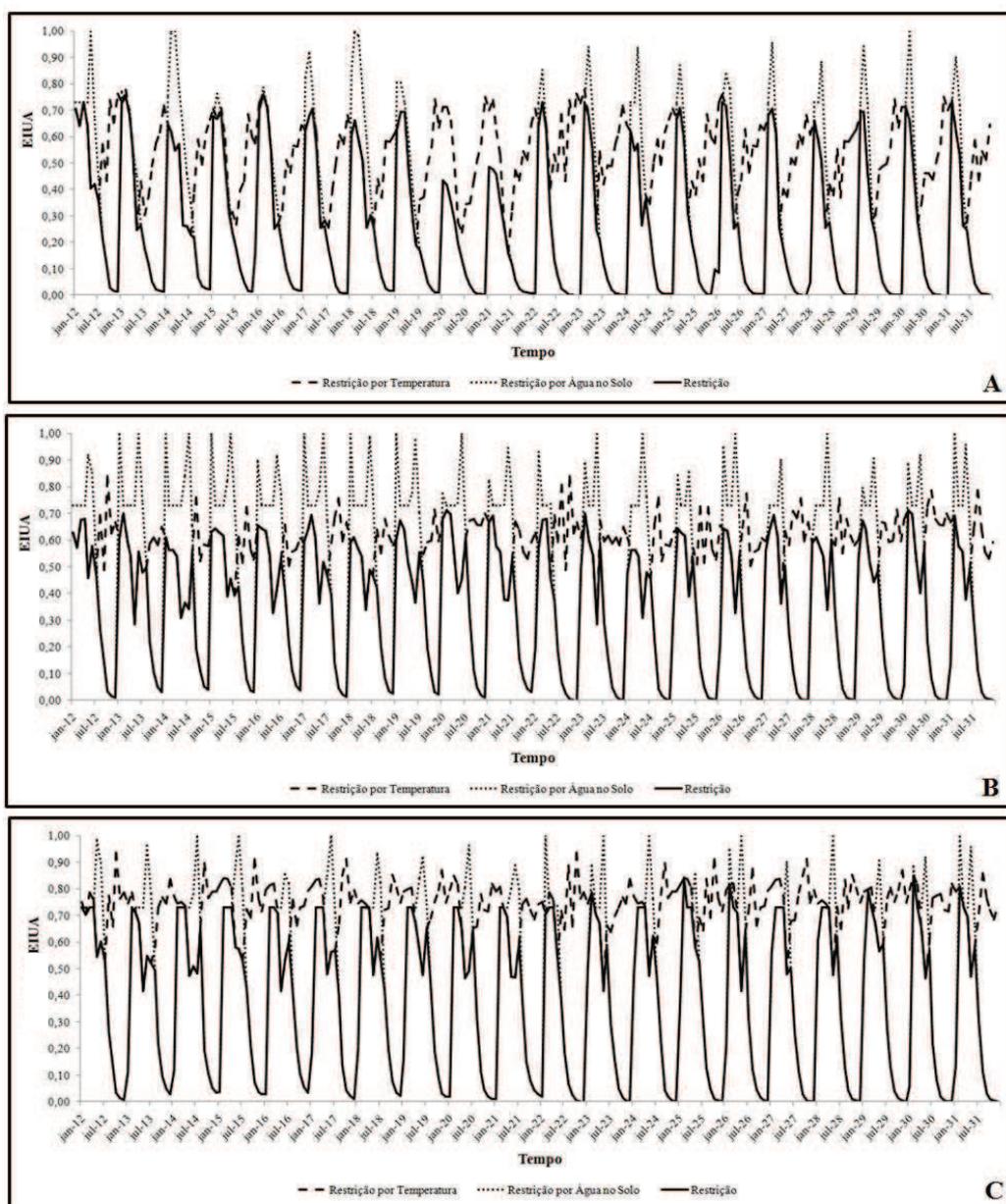
Modelo de EIU aplicada ao cenário 1 - 1 (Temperatura - Pluviosidade). A - Areado/MG. B - Ribeirão Preto/SP. C - Uberaba/MG



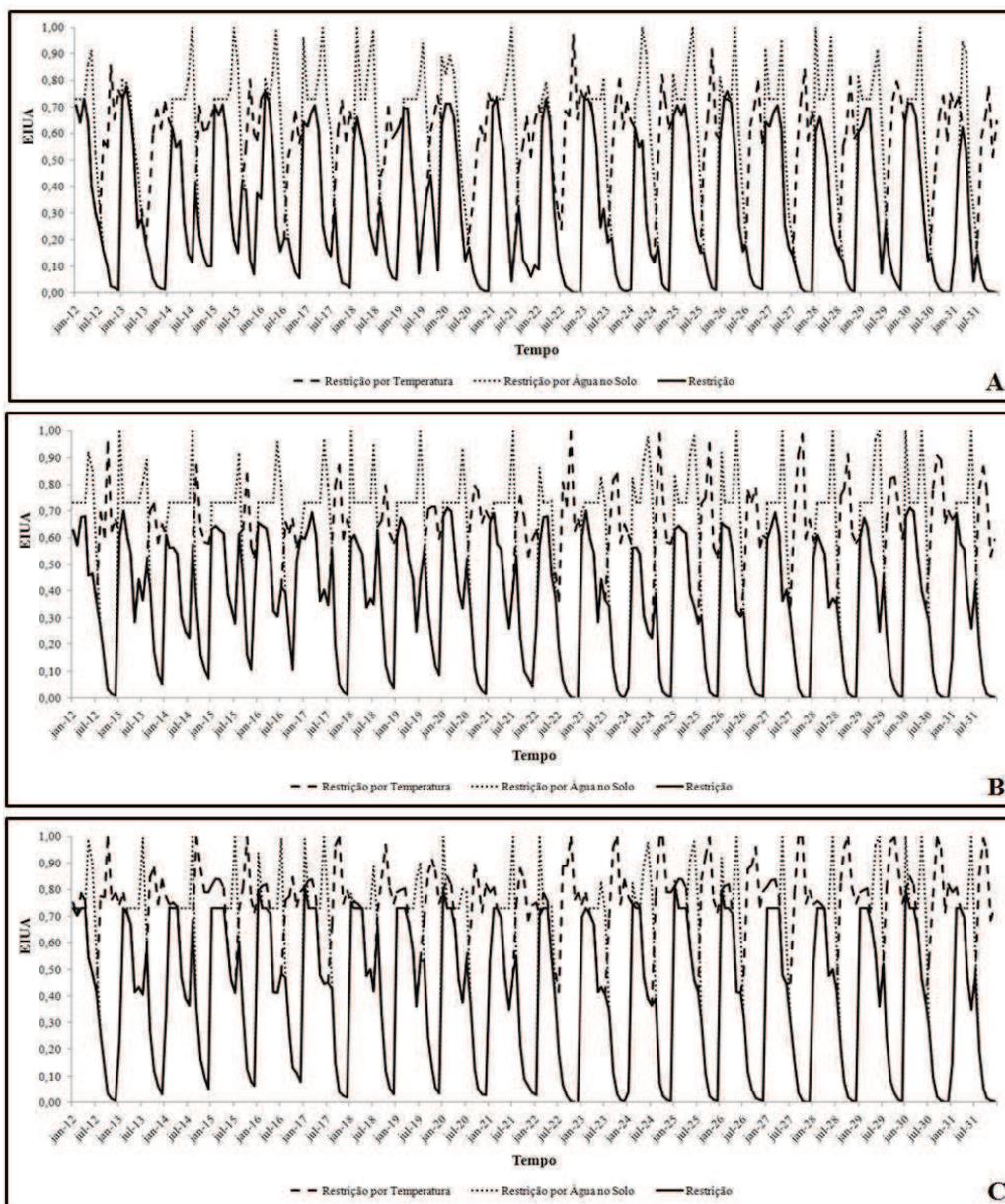
Modelo de EIU aplicada ao cenário 1 – 2 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



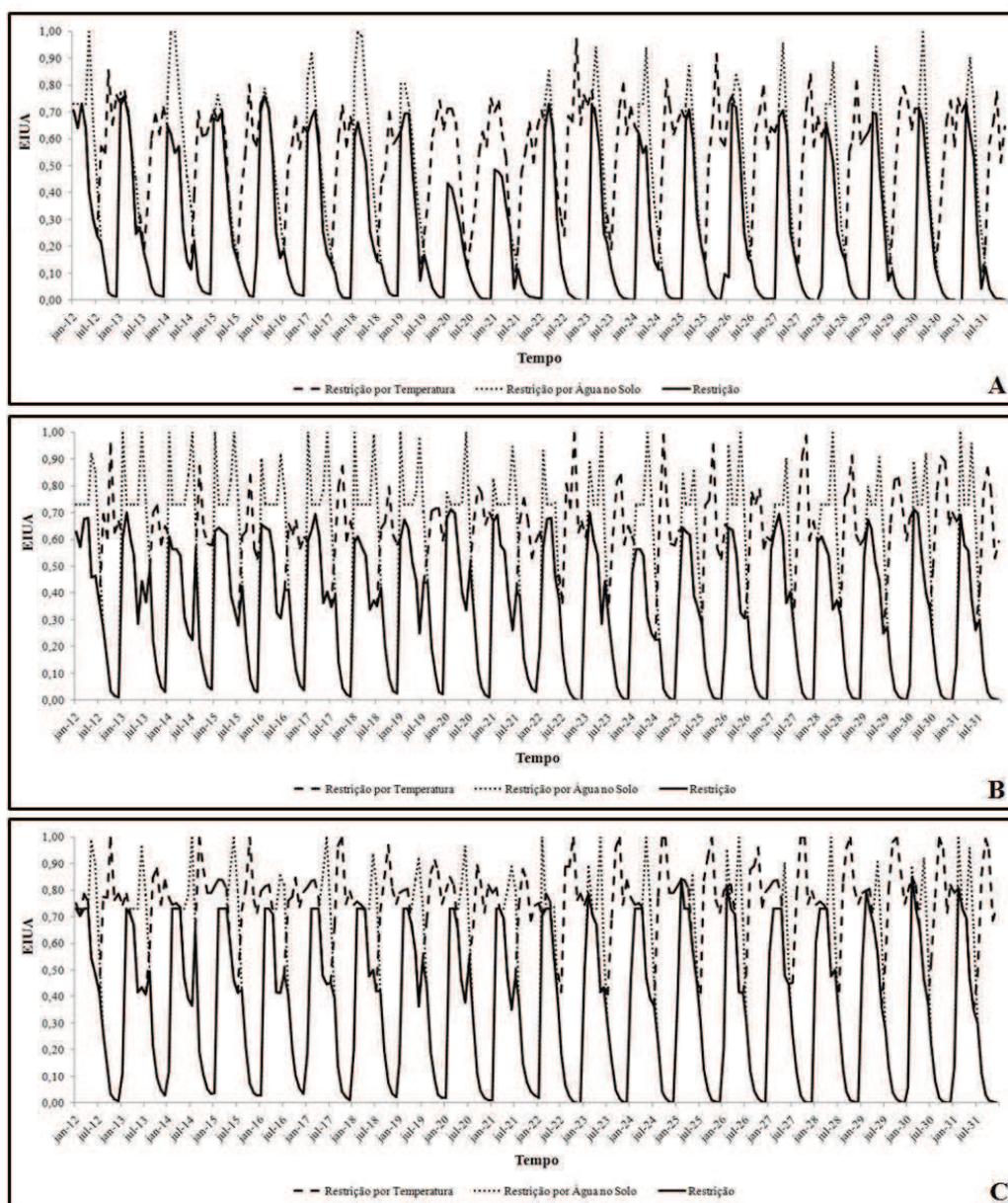
Modelo de EIUVA aplicada ao cenário 2 – 1 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



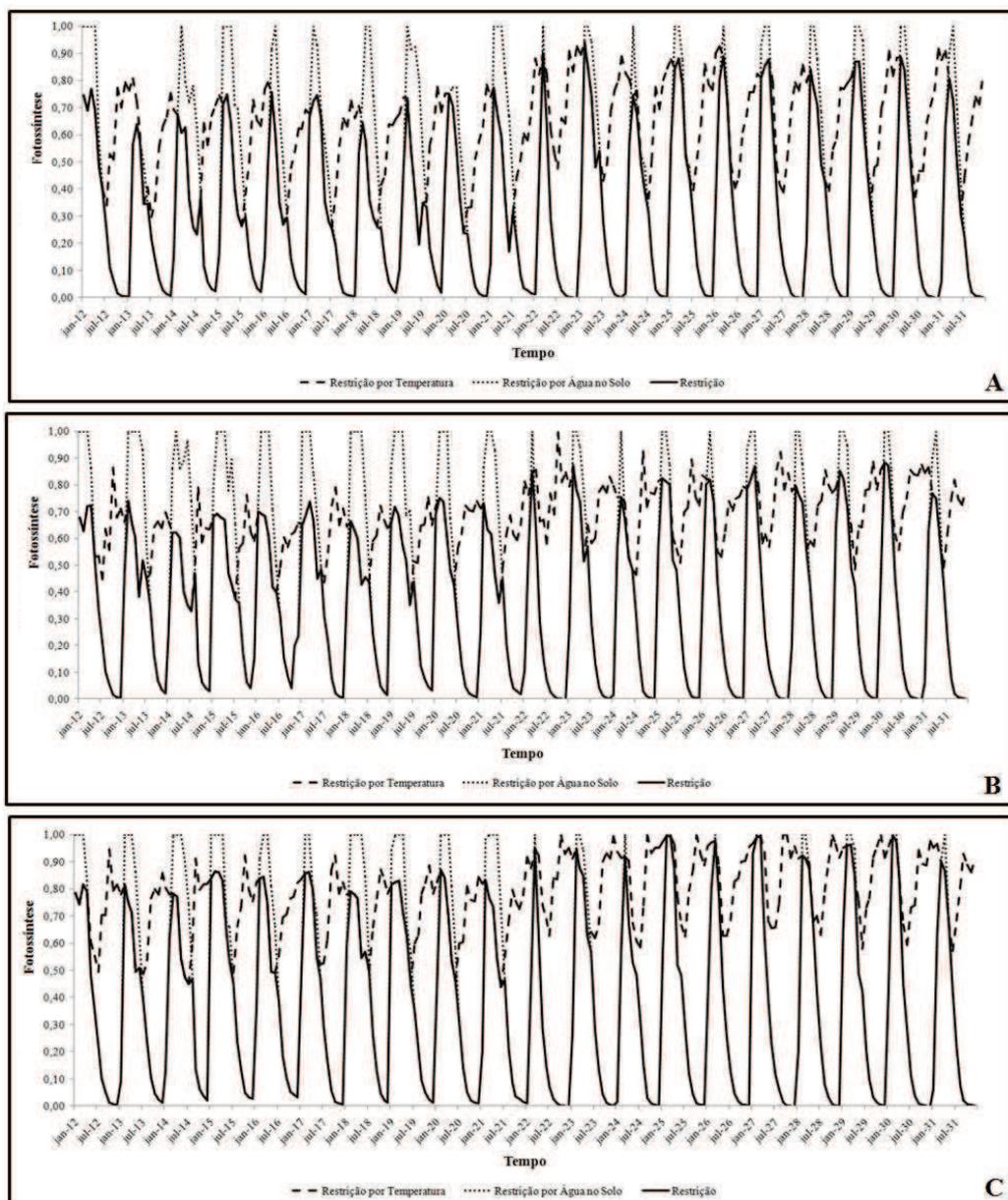
Modelo de EIUA aplicada ao cenário 2 – 2 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



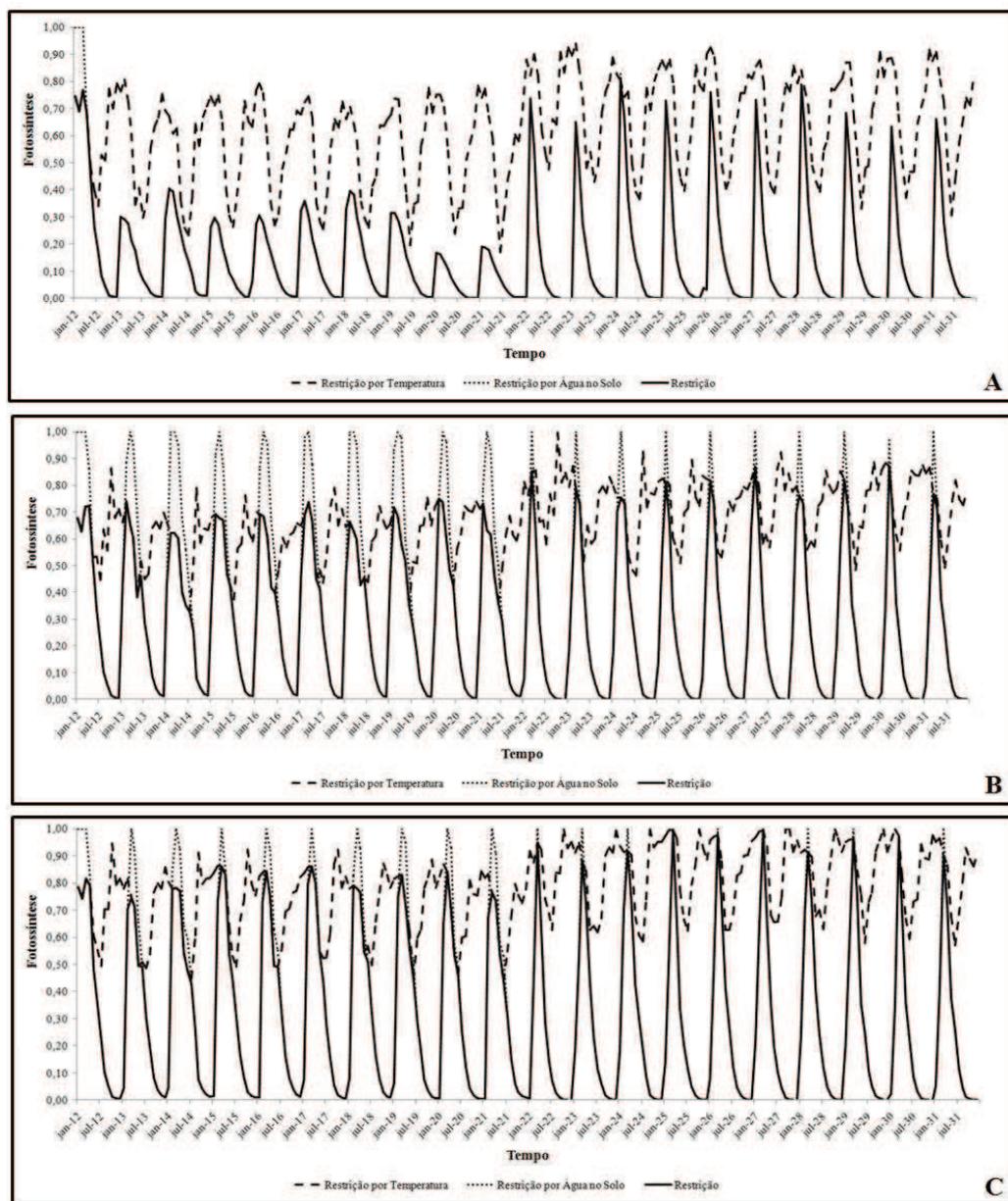
Modelo de EIU aplicada ao cenário 3 – 1 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



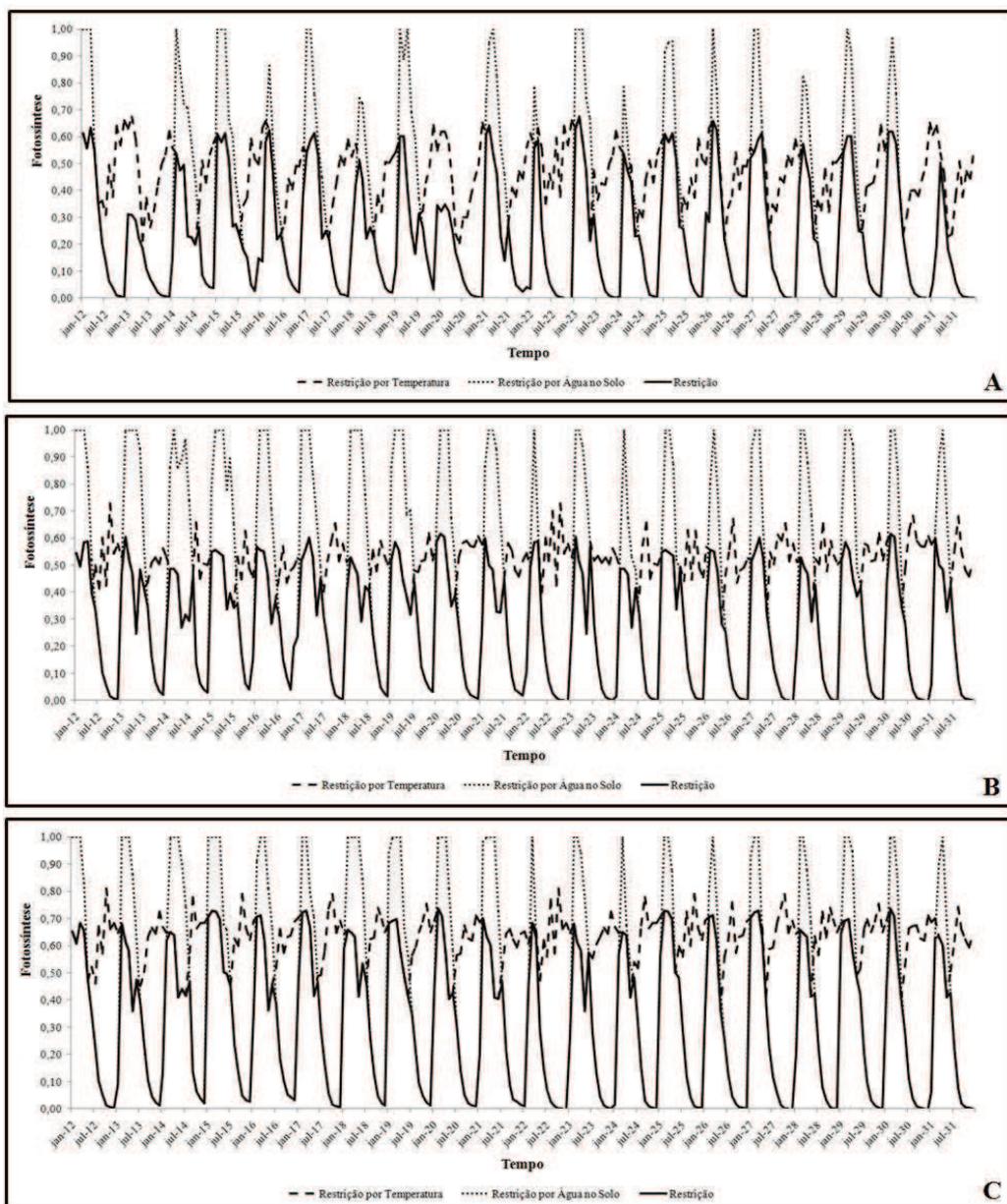
Modelo de EIUVA aplicada ao cenário 3 – 2 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



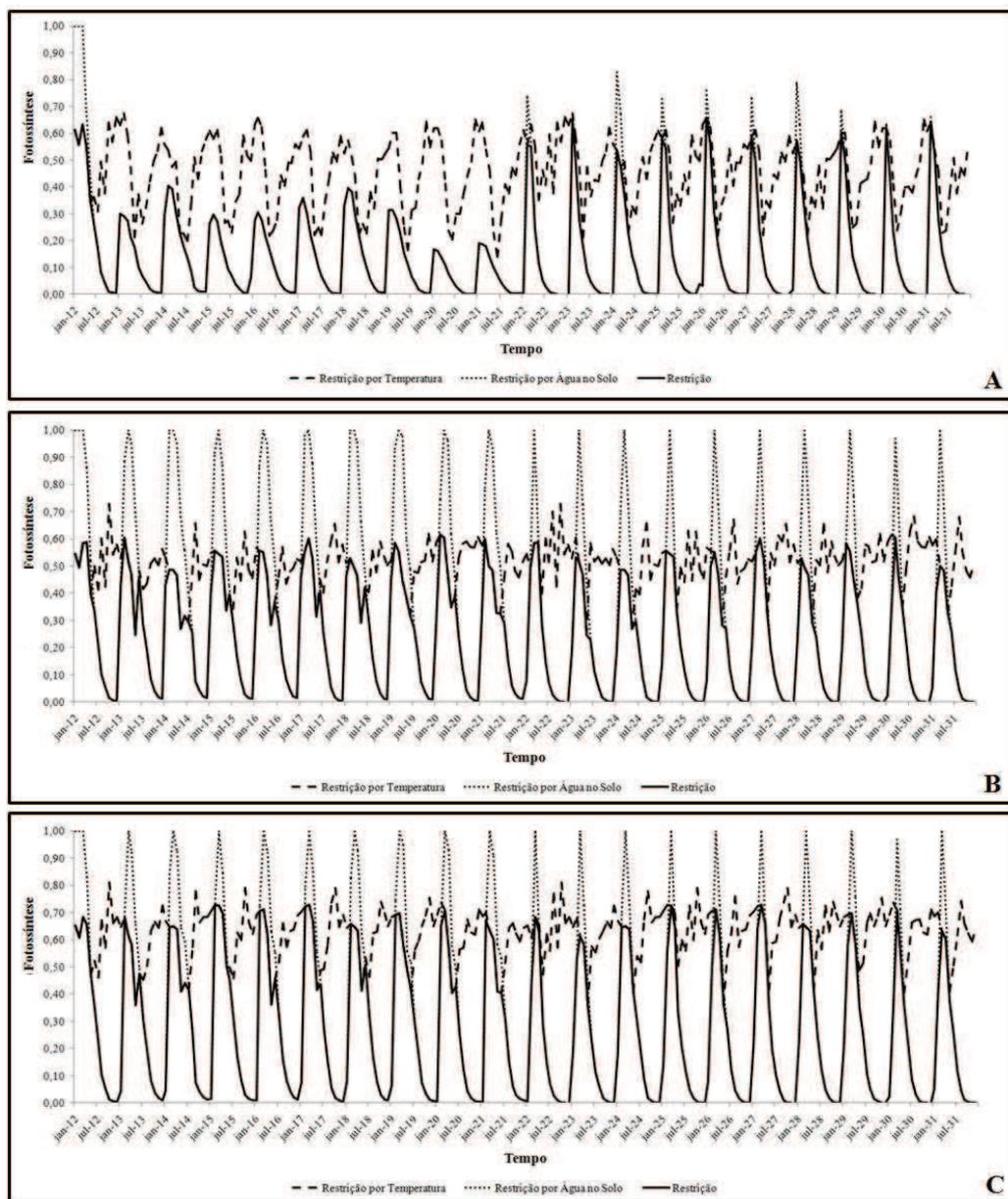
Modelo de Fotossíntese aplicada ao cenário 1 – 1 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



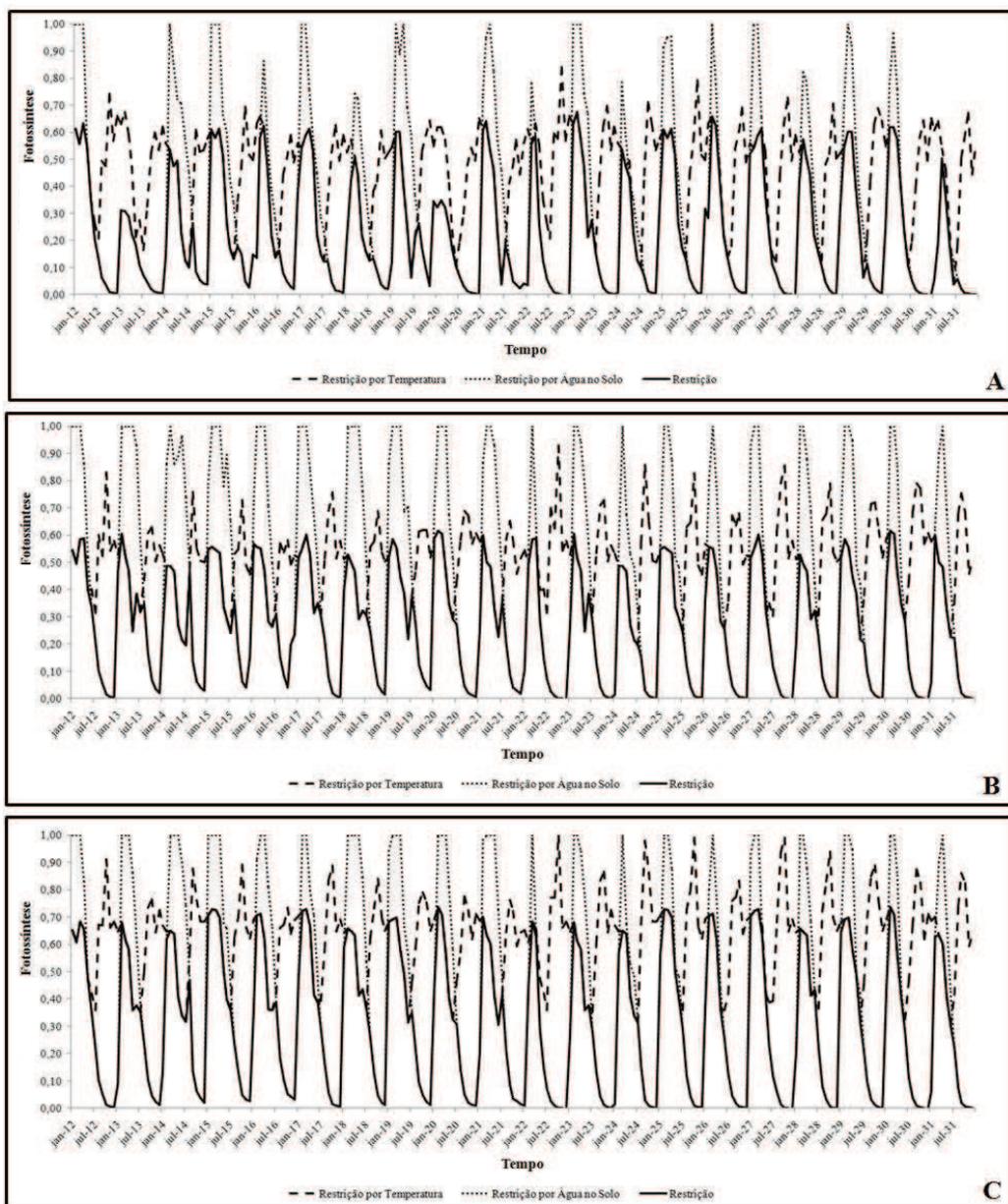
Modelo de Fotossíntese aplicada ao cenário 1 – 2 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



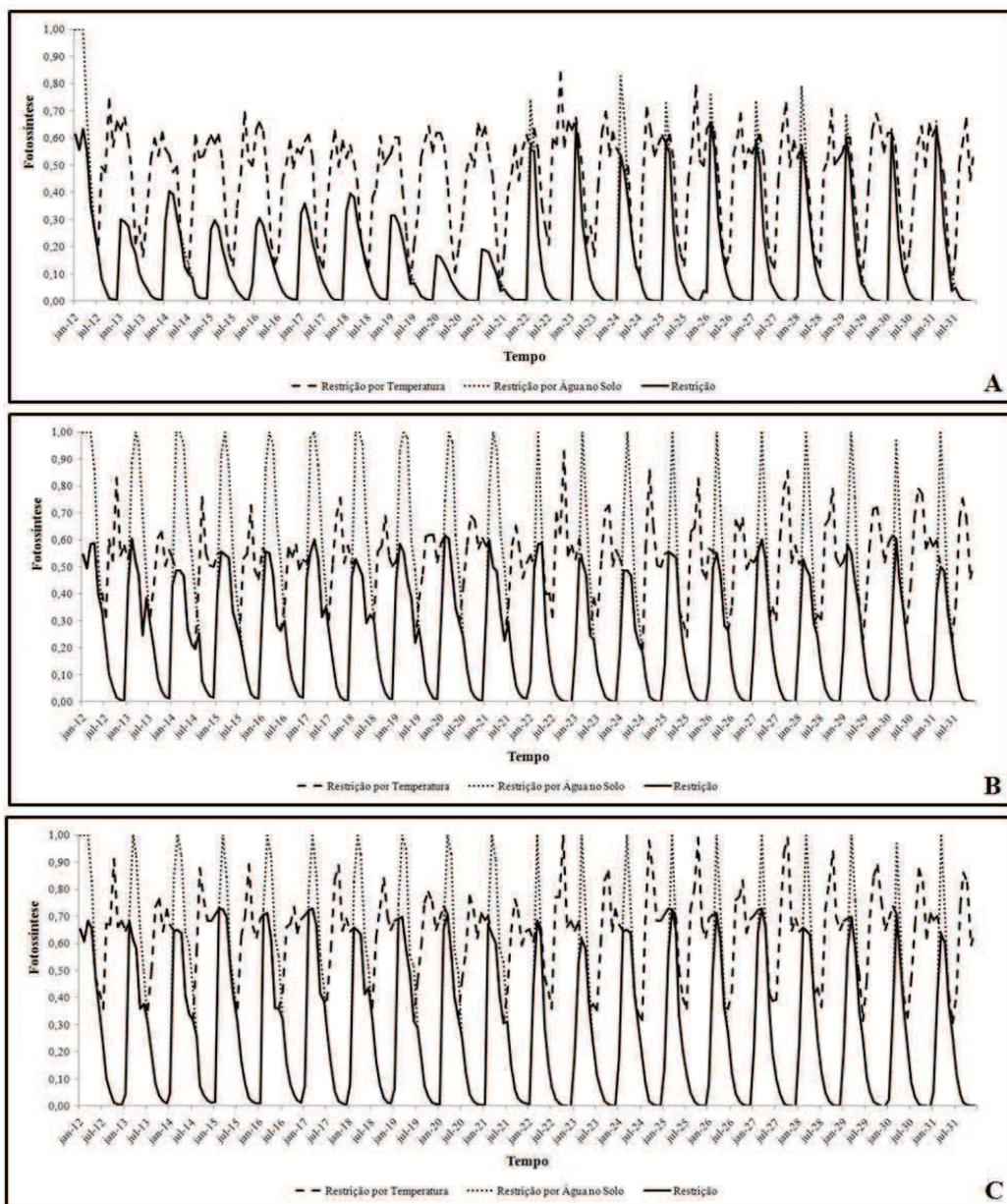
Modelo de Fotossíntese aplicada ao cenário 2 – 1 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



Modelo de Fotosíntese aplicada ao cenário 2 – 2 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



Modelo de Fotossíntese aplicada ao cenário 3 – 1 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG



Modelo de Fotossíntese aplicada ao cenário 3 – 2 (Temperatura – Pluviosidade). A – Areado/MG. B – Ribeirão Preto/SP. C – Uberaba/MG