**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo
baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros**

Helena Maria Soares Pinto

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2015**

Helena Maria Soares Pinto
Engenheira Ambiental

**Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em
simulações multimodelos e cenários climáticos futuros**

Orientador:
Prof. Dr. **FABIO RICARDO MARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Pinto, Helena Maria Soares

Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros / Helena Maria Soares Pinto. - - Piracicaba, 2015.

126 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Mudanças climáticas 2. Simulação 3. APSIM-Sugar 4. DSSAT/CANEGRO I. Título

CDD 633.61
P659p

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

Ao meu amado Rodrigo.
Aos meus queridos pais Anselmo e Ester,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por permitir que eu tivesse saúde e as estruturas necessárias para que eu chegasse até aqui.

Ao meu esposo Rodrigo, agradeço pelo amor e carinho em todos os momentos durante o mestrado; pela compreensão e paciência; por me incentivar e apoiar na continuidade dos meus estudos.

Aos meus pais Anselmo e Ester, agradeço pelo exemplo de vida, de família, de superação; o amor dedicado a todo instante; o apoio e incentivo sempre bem presente nas horas de desespero e angústia.

Ao orientador. Fábio Ricardo Marin pela orientação, paciência, amizade, ensinamentos que foram fundamentais para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos amigos do laboratório, especialmente ao Leandro, Daniel e Murilo que de muitas maneiras contribuíram para a realização deste trabalho sempre com ensinamentos e companheirismo presentes.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Departamento de Engenharia de Biosistemas e ao PPG em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade de realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento através do processo número 2013/16465-2.

A todos que de alguma forma auxiliaram neste projeto.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Cana-de-açúcar: Origem e Histórico brasileiro	17
3.2 Fenologia	20
3.2.1 Germinação e emergência	22
3.2.2 Perfilhamento.....	23
3.2.3 Crescimento	24
3.2.4 Florescimento	25
3.2.5 Maturação	26
3.3 A cana-de-açúcar e os elementos climáticos	27
3.3.1 Radiação Solar.....	27
3.3.2 Temperatura.....	28
3.4 Mudanças Climáticas.....	30
3.4.1 Impactos das mudanças climáticas na cultura cana-de-açúcar	31
3.5 Mudanças no sistema de produção canavieiro	33
3.6 Modelos de simulação baseados em processos para a cultura da cana-de-açúcar.....	36
3.6.1 Conceitos e definições	36
3.6.2 Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia - DSSAT	39
3.6.2.1 DSSAT/CANEGRO	40
3.6.3 Simulador de Sistemas Produtivos Agrícolas – APSIM	41
3.6.3.1 APSIM-Sugar	45
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	51
4.1 Calibração dos MCP's.....	51
4.2 Delimitação das Zonas Homogêneas no Estado de São Paulo.....	54
4.3 Consistência e formatação das séries climáticas e geração da linha de base.	56
4.4 Geração dos cenários climáticos futuros	59
4.5 Configurações dos MCP's	61

4.6 Caracterização dos solos predominantes	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1 Análise dos cenários climáticos futuros.....	63
5.2 Cenários agrícolas futuros com base nas simulações nos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO	66
5.3 Risco de produção para os cenários agrícolas futuros com base nas simulações nos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO	70
5.4 Incertezas e Limitações.....	74
6 CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS.....	77
ANEXOS	89

RESUMO

Projeções de risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseadas em simulações multimodelos e cenários climáticos futuros

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma cultura de relevância socioeconômica para o Brasil por proporcionar divisas na balança comercial do país e figurar como pilar estratégico para a matriz energética brasileira. O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana e de seus derivados. Apesar da intensa discussão em torno das mudanças climáticas globais na última década, sabe-se que as projeções acerca do clima futuro e seu impacto na agricultura contêm uma série de incertezas oriundas dos diferentes componentes do sistema de análise (clima, culturas, práticas de manejo). Nesse sentido, vem sendo cientificamente aceito o uso de um conjunto de cenários climáticos possíveis, ao invés de apenas uma simulação gerada por um único modelo. Na agricultura, uma das ferramentas cientificamente aceitas para a análise de impactos das mudanças climáticas é pelo uso de modelos de crescimento de plantas, baseados em processos fisiológicos e físicos que ocorrem nas culturas. Este trabalho teve como objetivo simular o cenário atual e quatro cenários futuros de mudança climática para a cultura de cana-de-açúcar em 38 municípios do Estado de São Paulo, em três períodos de corte, utilizando os modelos de simulação APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO. Os cenários futuros, em média, representaram um aumento de 3% de precipitação total anual (45 mm), 9% na temperatura média máxima (3°C) e 15% na temperatura média mínima (3°C) nos locais de estudo em relação ao cenário atual. Através das simulações produzidas pelos dois modelos, foi possível identificar que a massa fresca de colmos respondeu positivamente aos cenários climáticos futuros em relação ao cenário atual, chegando a 16% no modelo APSIM-Sugar e 4% no modelo DSSAT/CANEGRO, o que corresponde à redução dos riscos de produção de cana-de-açúcar. Com base nesses dados, de modo geral, nenhum dos cenários climáticos futuros implicaria em perda de produtividade em relação ao padrão atual.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Simulação; APSIM-Sugar; DSSAT/CANEGRO

ABSTRACT

Assessing the risks for sugarcane production in the State of São Paulo based on multimodel simulations and future climate scenarios

The sugarcane crop (*Saccharum officinarum*) has socio-economic relevance for Brazil for supporting the country trade account and for its role in Brazilian energy matrix. The State of São Paulo is the largest producer of sugarcane and derivatives. Despite the intense discussion of global climate change over the past decade, it is well known that future climate projections and its impact on agriculture have a number of uncertainties arising from the different components of the system (climate, crop physiology and management). It has been scientifically accepted the use of an ensemble of possible climate scenarios and crop models, rather than just one simulation generated by a single model. In agriculture, it is now scientifically accepted one of the tools for analyzing the impact of climate change on agriculture is the use of process based crop models. This study simulated the current and four future scenarios of climate change for sugarcane in 38 municipalities of São Paulo, in three harvest seasons, using APSIM-Sugar and DSSAT/CANEGRO. Future climate scenarios, on average, represented an increase of 3% of total annual precipitation (45 mm), 9% in average maximum temperature (3°C) and 15% in average minimum temperature (3 °C) for the sites in comparison with the current scenario. Models simulated the fresh stalk mass increasing in the future around 16% in APSIM-Sugar model and 4% in DSSAT/CANEGRO model, as well as the reduction of climate risks for sugarcane production. Based on these data, none of the future climate scenarios would imply in yield loss compared to the current climate.

Keywords: Climatic change; Simulation; APSIM-Sugar; DSSAT/CANEGRO

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma cultura de relevância socioeconômica para o Brasil, por gerar empregos diretos e indiretos de boa qualidade (OLIVEIRA, 2011), proporcionar divisas na balança comercial do país (FERREIRA et al., 2009) e figurar como pilar estratégico para a matriz energética brasileira (PEREIRA et al., 2012). De acordo com os levantamentos da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2015), na safra 2014/2015 o Brasil produziu 635 milhões toneladas de cana-de-açúcar em nove milhões de hectares, resultando em produtividade de 70,5 kg/ha, colocando o Brasil em local de destaque no cenário mundial de produção de cana-de-açúcar.

Apesar da intensa discussão em torno das mudanças climáticas globais na última década, sabe-se que as projeções acerca do clima futuro e seu impacto na agricultura contêm uma série de incertezas oriundas dos diferentes componentes do sistema de análise (e.g. clima, culturas, práticas de manejo). Nesse sentido, vem sendo cientificamente aceito o uso de um conjunto de cenários climáticos possíveis, ao invés de apenas uma simulação gerada por um único modelo climático. Um aspecto inovador neste contexto é a proposta utilizada, por exemplo, pelo Projeto “*The agricultural model intercomparison and improvement Project – AgMIP*” (ROSENZWEIG, 2011) para geração de cenários climáticos futuros através de agrupamentos (do inglês, *ensembles*) de modelos climáticos.

Na agricultura, uma das ferramentas cientificamente aceitas para a análise de impactos das mudanças climáticas na agricultura é pelo uso de modelos de crescimento de plantas (MCP), baseados em processos fisiológicos e físicos (do inglês, *process based crop model*), que são ferramentas consagradas na literatura científica para testes de hipóteses acadêmicas e avaliação do impacto de mudanças climáticas na agricultura (ROSENZWEIG et al., 2011). No entanto, apesar de robusto, o uso desse tipo de modelo carrega consigo uma série de incertezas.

Além do uso de dois modelos em paralelo (ASSENG et al., 2013), representam também inovações o correto tratamento dos dados de entrada quanto ao manejo da cultura, ao solo e ao clima, assegurando que os modelos reflitam da melhor forma possível as características regionais e a representatividade espaço-temporal das simulações. Nesta dissertação, uma preocupação foi posicionar o tratamento dos modelos, dados e entrada e métodos de análises das simulações no estado da arte da ciência da modelagem, da cana-de-açúcar e dos cenários climáticos futuros, com vistas à quantificação dos riscos climáticos na cultura da cana-de-açúcar.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o risco climático para a cultura de cana-de-açúcar, nas condições atuais e de mudanças climáticas, para a região produtora de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

2.2 Específicos

- a) Gerar e caracterizar os cenários climáticos futuros para o Estado de São Paulo;
- b) Simular o crescimento e produção da cana-de-açúcar em dois MCP's;
- c) Quantificar o risco de produção de cana-de-açúcar na condição atual e em cenários de mudanças do clima através dos MCP's.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cana-de-açúcar: Origem e Histórico brasileiro

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é originária do sudeste Asiático, especificamente da região da Nova Guiné e Indonésia (MOZAMBANI et al., 2006; JAMES, 2004) sendo pertencente à família *Poaceae* (CRONQUIST, 1981). O açúcar, produto da cana-de-açúcar, teve origem de sua produção na China, onde há registros de mais de 8.000 anos, atingindo posteriormente a Europa, a África e as Américas, incluindo o Brasil (JAMES, 2004).

A cana-de-açúcar encontrou ambiente favorável no Brasil, que durante o Brasil Império dependeu basicamente do cultivo da cana e da exportação do açúcar. Calcula-se que naquele período da história, a exportação do açúcar rendeu ao Brasil cinco vezes mais que as divisas proporcionadas por todos os outros produtos agrícolas destinados ao mercado externo (UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA - UDOP, 2012).

Cristóvão Colombo introduziu o plantio da cana na América, em sua segunda viagem ao continente, em 1493, onde hoje se localiza a República Dominicana. Quando os espanhóis descobriram o ouro e a prata das civilizações Asteca e Inca, no início do século XVI, o cultivo da cana e a produção de açúcar foram relegados a segundo plano. Segundo UDOP (2012), oficialmente, foi Martim Affonso de Souza que em 1532 trouxe a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Lá, ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar. Contudo, foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar multiplicaram-se.

No século XIX, com o aumento da produção de açúcar no mercado mundial, a viabilidade econômica e a importância da atividade no país foram comprometidas. Nesse período, São Paulo e Rio de Janeiro tornaram-se os principais polos produtores das Regiões Sul e Sudeste, concentrando os maiores produtores do país (MARIN et al., 2009).

Em 1933, foi criado o Instituto do Açúcar e Alcool (IAA), com intuito de regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura. Com a crise do petróleo, em 1973, teve início o Proálcool (Programa Nacional do Alcool), com objetivo de inserir o álcool na matriz energética brasileira, quando ocorreu o início da produção de veículos movidos a etanol, com pico de produção em 1985, quando a maior parte dos veículos fabricados no país eram movidos com este biocombustível. Posteriormente, com a redução dos preços pagos aos

produtores, ocorreu a falta do combustível no mercado, comprometendo a credibilidade do setor (MARIN, 2014).

Durante a última década a produção de biocombustíveis ganhou importância em decorrência de fatores econômicos, sociais e ambientais. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2015), no período de 2007 a 2015, a área de cana-de-açúcar no Brasil cresceu 76% em Goiás, 79% em Mato Grosso do Sul, 84% no Tocantins e 28% no Paraná. Em São Paulo, houve avanço de 33 % no mesmo período, com 48% de área plantada que responde por 46,2% da produção nacional de cana-de-açúcar.

De acordo com a CONAB (2015), a área cultivada com cana-de-açúcar que foi colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2014/2015 foi de 9.0004,5 mil hectares distribuídas em todos Estados produtores. São Paulo permanece como o maior produtor, com 52% (4.685,7 mil hectares) da área plantada seguido por Goiás com 9,5% (854,2 mil hectares), Minas Gerais com 8,9% (805,5 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 7,4% (668,3 mil hectares), Paraná com 7,1% (635 mil hectares), Alagoas com 4,3% (385,3 mil hectares) e Pernambuco com 2,9% (260,1 mil hectares). Estes sete Estados são responsáveis por 92,1% da produção nacional. Segundo a CONAB (2015), o Brasil teve um acréscimo na área de cerca de 193,1 mil hectares na temporada 2014/2015, equivalendo a 2,2% em relação à safra anterior. O Estado de São Paulo foi o que mais sofreu acréscimo, chegando a 133,7 mil hectares.

De acordo com a CONAB (2015), a área de cana-de-açúcar no Brasil sofreu aumento de em torno de 2,2% na safra 2014/2015. Do total de colmos industrializados, 43% foram destinados à produção de açúcar, com produção aproximada de 273,8 milhões de toneladas e, 57% da produção foram destinados à fabricação de etanol. A importância da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, mesmo à face da crise que se instala no setor atualmente é demonstrada através de comercialização de mais de 2,9 milhões de veículos novos licenciados no ano de 2014, sendo que praticamente 90% deles são movidos a etanol ou bicombustíveis (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA, 2014).

O etanol tem sido reconhecido como combustível renovável com grande potencial para o setor sucroalcooleiro do Brasil, atraindo investimentos internos e externos para o país (GOLDEMBERG, 2007), sendo que em 2010 os principais destinos das exportações brasileiras de etanol foram a Coreia do Sul (19,9%), Estados Unidos (13,9%) e Japão (13,8%), e com relação ao açúcar, os principais destinos foram a Rússia, Índia e Irã (12,5%, 8,3% e 5,7% respectivamente) (MARIN, 2014).

Na década passada, o Brasil destacou-se pelo grande potencial para o cultivo de culturas voltadas à energia, chegando a 596 usinas sucroalcooleiras operando em 2010 (Figura 1). Nos últimos três anos, contudo, a propagação da crise econômica de 2008 em conjunto com uma política governamental danosa ao setor canavieiro, levou algumas unidades a entrarem em processo de recuperação judicial (FOLHA DE SÃO PAULO, 2014, apud MARIN, 2014) ou mesmo o fechamento definitivo.

Figura 1 – Distribuição espacial das usinas sucroalcooleiras e de biodiesel no Brasil em 2010 (MARIN, 2014)

Ainda que as condições comerciais para a expansão do negocio canavieiro não sejam atualmente favoráveis, tem-se no Brasil um grande potencial para a cultura da cana-de-açúcar, assegurando-se todas as condições ambientais e sociais para a implantação de novas áreas (MARIN, 2014). Manzatto et al. (2009) indicaram as melhores áreas para expansão da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, conciliando as áreas com melhor potencial produtivo com critérios ambientais e de regulação da mudança do uso do solo. Neste estudo, foram identificados em torno de 66 milhões de hectares aptos à expansão da cana-de-açúcar no

Brasil (Figura 2), com bom potencial de clima e solo, declividade menor ou igual a 12%, em áreas cultivadas com pastagens, excluindo-se os biomas Amazônico e Pantanal e da bacia do Alto Paraguai.

Figura 2 – Áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar no Brasil segundo o Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et al., 2009)

3.2 Fenologia

Com base no padrão de acúmulo de matéria seca ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, Machado (1981) estabeleceu que o ciclo da cultura pode ser dividido em 3 fases distintas: 1) inicial em que o crescimento é lento; 2) de rápido crescimento em que até 80% de toda matéria seca é acumulada e; 3) final em que o crescimento é novamente lento. De acordo com Doorembos e Kassam (1979) e Gasho e Shih (1983) o ciclo da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro fases características: brotação e emergência, estabelecimento e

perfilhamento, crescimento intenso e maturação (Figura 3). Nota-se, assim, a correspondência entre as duas abordagens, já que a segunda consiste apenas na subdivisão da fase de rápido crescimento em duas etapas. No entanto, tais fases não são simples de serem identificadas no campo, e a duração de cada fase é variável em função da época de plantio ou corte, temperatura do ar e disponibilidade de água no solo. Assim, apesar de prático, a associação de fases fenológicas da cana-de-açúcar a períodos fixos de tempo devem ser evitadas, pois além da dependência com o regime térmico da localidade, a fenologia da cana também responde à disponibilidade de água e nutrientes e à característica genética das variedades (Figura 3).

Figura 3 - Fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar e respectivas unidades térmicas para o desenvolvimento de cada fase. (GASHO; SHIH 1983, apud MARIN, 2014)

Uma abordagem disponível para a descrição do ciclo fenológico da cana-de-açúcar foi proposta por Bezuidenhout et al. (2003), com a divisão do ciclo em 5 fases: fase de pré-germinação, fase de pré-emergência, fase de emergência dos perfilhos primários, fase de emergência dos perfilhos secundários e fase de senescência de perfilhos.

3.2.1 Germinação e emergência

Ao longo de vários séculos acreditava-se que a cana-de-açúcar não produzia sementes, reproduzia-se apenas vegetativamente. Ao longo da história, uma série de circunstâncias contribuiu para que esse equívoco se mantivesse, destacando-se o fato de que algumas variedades cultivadas no continente americano ao longo de 2,5 séculos permaneceram macho-estéreis e, portanto, sem produzirem sementes (VAN DILLEWIJN, 1952).

Na prática, a cana é geralmente propagada vegetativamente utilizando-se frações dos colmos adultos, contendo pelo menos uma gema. Neste caso, a germinação consiste no desenvolvimento de órgãos já presentes de modo embrionário na gema, como os primórdios radiculares que originam um conjunto de raízes que oferecem sustentação física e suplementam a plântula com água e nutrientes até que esta possa adequadamente suprir-se por suas próprias raízes (Figura 4).

Figura 4 - Representação da sequência de brotação e emissão dos primórdios radiculares presentes no colmo utilizado para o plantio da cultura da cana-de-açúcar. Adaptado de van Dillewijn (1952)

Sob condições normais, a dominância apical impede que as gemas laterais de um colmo vivo germinem, dando origem a novas brotações. É também bem sabido que a ação hormonal responde pela ocorrência da dominância apical de modo que quando a gema apical é afetada como resultado de uma injúria (geada, broca ou florescimento) e esse mecanismo de dominância é quebrado, esse bloqueio deixa de existir, havendo estímulo para a brotação lateral do colmo (MARIN, 2014).

A temperatura do ar controla a germinação ao regular as reações bioquímicas que ocorrem na semente ou na gema. De maneira geral, ambientes mais quentes encurtam o período entre a germinação e a emergência da cultura, o que pode resultar em maior produtividade já que ao ciclo produtivo da cultura torna-se mais longo com maior potencial de acúmulo de biomassa. Além do regime térmico, esta fase também depende da umidade do solo e do ar, aeração e temperatura do solo, e da sanidade e das reservas energéticas dos toletes utilizados no processo de propagação vegetativa (PARANHOS, 1987).

A emergência é o evento seguinte à germinação, ocorrendo quando as folhas atingem a superfície do solo e se tornam visíveis. Marin et al. (2011a, 2012) observaram que as variedades brasileiras RB72-454, RB86-7515 e SP83-2847 têm menor exigência térmica que as variedades sul-africanas, havendo emergência do colmo em torno de 450°C.d. As variedades brasileiras de cana-de-açúcar normalmente emergem após cerca de 400°C.d (MARIN et al., 2012), o que pode representar cerca de 20 dias após o plantio, nas épocas mais quentes do ano do centro-sul brasileiro.

3.2.2 Perfilhamento

A fase de estabelecimento da cultura envolve a formação das raízes e a emissão de folhas, assegurando a sobrevivência das plantas a partir da produção das suas próprias reservas. Nesta fase, um evento de importância é o perfilhamento, que constitui um processo de formação de novos brotos originários da parte subterrânea da mesma planta (SUGUITANI, 2006). Segundo van Dillewijn (1952) a temperatura do ar é uma variável determinante do processo fisiológico do perfilhamento, sendo este favorecido na faixa dos 30°C, destacando a importância da época de plantio como fator determinante para a formação de população adequada de plantas.

A interceptação de radiação solar é fator determinante para as fases do perfilhamento da cultura, o que torna evidente a importância do espaçamento e plantio na entrelinha na capacidade de perfilhamento da cultura. Com espaçamento menor, a quantidade de colmos

industrializáveis, em geral, é maior (GALVANI et al., 1997), porém há uma limitação técnica imposta pela indústria de máquinas de colheita que aparentemente não condizem com os espaçamentos mais adequados para a cultura (MARIN, 2014).

A duração e a intensidade da radiação solar são de fundamental importância neste processo. É bem sabido que a auxina é produzida no meristema apical da planta, deslocando-se por toda cana-de-açúcar e atuando na regulação do crescimento e inibindo o desenvolvimento das gemas laterais, o que está intimamente relacionada com a inibição da formação de novos perfilhos. Com o aumento da intensidade radiativa na base do colmo, o fluxo deste hormônio é reduzido nesta região e há redução na dominância apical e incremento da atividade de perfilhamento. O contrário ocorre quando a intensidade radiativa na base diminui, sinalizando à planta que a área está suficientemente ocupada pela cultura e o perfilhamento pode ser reduzido. Este aspecto foi observado experimentalmente por Zhou et al. (2003), dando suporte ao trabalho de Beizuidenhout et al. (2003).

No final da fase de perfilhamento, os colmos mais desenvolvidos que continuaram crescendo em altura e aumentando em diâmetro, têm seu desenvolvimento acelerado, pois já não competem com os perfilhos mais jovens, que tendem a ser eliminados na competição por radiação solar (INMAN-BAMBER, 1994). Na fase de estabelecimento, o desenvolvimento inicial vigoroso e o perfilhamento intenso são importantes também sob o ponto de vista do manejo da cultura, pois de acordo com Marin (2014) o fechamento precoce do dossel é indicativo da formação de uma população de plantas adequada, garantindo alta eficiência na absorção da energia solar e o controle das plantas daninhas, que não dispõem, nesta condição, de níveis mínimos de radiação para sua manutenção.

3.2.3 Crescimento

De modo geral, crescimento é entendido em termos de alongamento, mas em seu sentido mais amplo ele também inclui aumento de massa e tamanho da planta. Durante a fase de crescimento, três processos concorrem para a formação de novas estruturas vegetais: divisão celular, diferenciação celular e alongamento celular. A divisão celular resulta na formação contínua de novas células e ocorre predominantemente no meristema localizado na região apical da planta. As células recentemente formadas gradualmente se diferenciam, para formar vários tipos de células e o alongamento toma lugar num estágio subsequente. No caso da cana-de-açúcar, a taxa de crescimento não ocorre de modo uniforme, dando-se de modo

mais lento no início do ciclo e crescendo gradualmente até um máximo, que por sua vez é seguido por uma queda gradual (VAN DILLEWIJN, 1952).

Os processos de aumento de massa e altura da planta não ocorrem necessariamente em paralelo. Durante uma seca moderada, por exemplo, o alongamento de uma planta de cana-de-açúcar pode cessar enquanto a assimilação pode continuar, resultando em ganho de massa seca (VAN DILLEWIJN, 1952).

Allison et al. (2007), ao contrário do senso comum, observaram que a cana-de-açúcar cresce mais lentamente em comparação com outras espécies C4, tanto nas fases iniciais, como também no final do ciclo. A taxa de produção de folhas, segundo os autores, aumenta menos com a temperatura do que em outras espécies tropicais similares.

O lento crescimento no final do ciclo, por sua vez é associado com a redução na taxa de alongamento do colmo e aumento na biomassa não estrutural, o que afeta a taxa de respiração da planta. A taxa de crescimento reduzida durante a última parte do período de crescimento de cana-de-açúcar está bem associada com uma diminuição no conteúdo específico de nitrogênio foliar, que se reduz com a idade das plantas, ainda que sejam aplicadas doses substancialmente maiores de N em relação à necessidade da planta. (STEVENSON et al., 1992; ALLISON; PAMMENTER, 2002).

3.2.4 Florescimento

Quando o objetivo é a produção de grande massa de colmos rica em sacarose, normalmente inclui-se o florescimento dentro do período vegetativo, pois ele não é considerado como uma fase fenológica na prática, e tampouco desejável sob o ponto de vista econômico (MARIN, 2014). Ao contrário das culturas onde o produto colhido é o fruto do processo reprodutivo da cultura da cana-de-açúcar o florescimento é um evento fisiológico normalmente indesejado em áreas comerciais uma vez que implica em mobilização da energia armazenada na produção da inflorescência, dando origem ao processo conhecido como “isoporização do colmo”.

Stevenson (1965) descreveu os fatores que causam o estímulo para que o meristema apical se modifique, deixando de produzir folhas e colmos e passando a formar a inflorescência. Segundo ele, o florescimento da cana-de-açúcar normalmente ocorre quando as taxas de crescimento começam a diminuir devido à redução no fotoperíodo, em associação com níveis adequados de temperatura e umidade do solo. Assim, segundo Stevenson (1965) pode-se inferir que florescimento normalmente ocorre após o solstício de verão, com

fotoperíodo entre 12h e 12,5 h e temperatura noturna acima de 18°C, enquanto Bull e Glasziou (1975) estabeleceram a necessidade de, pelo menos, 10 dias nestas condições para desencadear o florescimento.

Pereira et al. (1983) afirmam que a grande variabilidade do índice de florescimento, nas condições paulistas é uma evidência de que o fotoperíodo não é o único controlador do fenômeno, tendo importância também a temperatura. Esta ganha maior importância, na influência que exerce sobre o florescimento, à medida que se afasta do equador. Alguns pesquisadores relatam que as temperaturas noturnas têm maior importância no florescimento, normalmente aquelas abaixo de 18°C por períodos maiores do que dez dias. No Centro-Sul do Brasil observou-se efeito acumulativo de temperaturas noturnas no florescimento, abaixo de 18°C, de tal forma que 5 noites nessa temperatura não afetaram o florescimento, 10 noites prejudicaram a florescência e mais que dez noites inibiram totalmente o processo.

3.2.5 Maturação

Os colmos que sobreviveram à competição da fase de perfilhamento passam a acumular sacarose que provém da fotossíntese de forma mais intensa, dando início à fase de maturação. Segundo Marin (2014), diferentemente das culturas que têm ciclo reprodutivo completo para a produção econômica, na cana-de-açúcar esta fase não é bem definida fisiologicamente e tem início nos meses finais do ciclo da cultura, normalmente quando algum fator ambiental de estresse moderado – deficiência hídrica ou frio – restringe a alongamentos e a multiplicação celular sem, contudo afetar a capacidade fotossintética da planta. Agentes “amadurecedores” exógenos também são utilizados para iniciar o processo de maturação quando as condições ambientais não desencadeiam o início da fase de maturação e seu princípio está associado à redução do crescimento vegetativo sem, contudo afetar a produção de fotoassimilados. Assim, na região sudeste do Brasil, o desencadeamento do processo de maturação da cana-de-açúcar ocorre naturalmente no início do mês de maio, atingindo seu clímax no mês de outubro. As condições climáticas então existentes, com gradativa queda de temperatura e a diminuição das precipitações, até seca total no meio do ano, são determinantes neste processo.

Após alcançar o ponto de máximo acúmulo de sacarose, o atraso na colheita do canavial provoca queda no seu rendimento industrial, o que exige um planejamento operacional adequado à colheita de modo a evitar perdas de rendimento. Isso porque a planta

continua respirando e a parte não estrutural do colmo demanda grande quantidade de energia para sua manutenção.

Clements (1962) descreveu o amadurecimento de cana como sendo a senescência fisiológica da planta, que ocorre entre as fases de crescimento e morte. Também definiu-se que, geralmente, o amadurecimento é representado pelo processo de acúmulo de sacarose nos colmos da cana (LEGENDRE, 1975), que ocorre a partir dos entrenós basais até o ápice, até que se chegue a um valor relativamente homogêneo em toda a planta. (ALEXANDER, 1973).

Cardozo e Sentelhas (2013) revisaram o processo de maturação da cana, destacando que os colmos da cana são como reservatórios em que, sob condições favoráveis, grande quantidade de sacarose pode ser acumulada. Eles demonstraram a forte correlação entre os elementos climáticos e a maturação da cultura, propondo um método para prognóstico da concentração de sacarose em função das condições ambientais.

O teor de água no colmo durante a fase de maturação varia em função das condições ambientais e da condição da planta. A umidade do colmo influi sobre o rendimento comercial da cultura, uma vez que a formação da produção da cana dá-se em base úmida.

3.3 A cana-de-açúcar e os elementos climáticos

A cana-de-açúcar tem seu crescimento e desenvolvimento diretamente afetado pelas condições climáticas. Portanto, é preciso avaliar as condições de clima ideais e a disponibilidade hídrica que atendam as necessidades da cultura e propiciem um bom desenvolvimento da planta. Desta maneira, a cana-de-açúcar se desenvolverá bem quando ocorrer período quente e úmido, com alta radiação solar durante a fase de crescimento, seguido por um período seco, ensolarado e mais frio durante as fases de maturação e colheita (MARIN et al., 2009).

3.3.1 Radiação Solar

O Sol exerce papel fundamental para o desenvolvimento das plantas, pois é a principal fonte de energia radiante para a vida no planeta. Segundo Pereira et al. (2002), a radiação solar é o principal elemento meteorológico, pois desencadeia todo processo meteorológico, afetando todos os outros elementos como temperatura, pressão, vento, chuva e umidade. Assim como a maioria das poáceas, a cana-de-açúcar é uma planta C4 com alta eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera e taxa fotossintética elevada, além de taxa de

crescimento e eficiência no uso da água duas a três vezes maiores do que as observadas em plantas de metabolismo C3 (CASAGRANDE, 1996; SEGATO et al., 2006).

Segundo Marin et al. (2009), um dos principais fatores que explicam a absorção de radiação solar por uma cultura é a distribuição de folhas na planta e o ângulo de inserção das folhas, relação que pode ser representada através do coeficiente de extinção de radiação solar, em função da arquitetura do dossel e do ângulo zenital do Sol. Neste caso, folhas com ângulo mais ereto permitem o adensamento de plantas por unidade de área, podendo maximizar os rendimentos da cultura em condições de campo.

A cana-de-açúcar desenvolve-se adequadamente em locais que recebem radiação solar na faixa de 18 a 36 MJ m⁻² dia⁻¹. O perfilhamento é afetado pela intensidade e duração do brilho solar. Alta intensidade de luz e longa duração do dia promovem o perfilhamento enquanto dias curtos e nublados reduzem a emissão de perfilhos. O crescimento do colmo aumenta quando ocorre fotoperíodo entre 10 e 14 horas. O índice de área foliar aumenta rapidamente entre o terceiro e o quinto mês, devido à fase de pico do perfilhamento (MONTEIRO, 2012). Em condições de elevadas taxas de radiação solar, Rodrigues (1995) observou que as folhas da cana são mais longas e verdes e o perfilhamento mais intenso. Em condições de baixa irradiância solar os colmos são mais finos e longos, e as folhas estreitas e amareladas.

3.3.2 Temperatura

A temperatura é um dos fatores climáticos mais importantes para a produção vegetal. Pereira et al. (2002) explicam que a temperatura do ar exerce influência sobre vários aspectos da produtividade vegetal, estando relacionada com o crescimento e desenvolvimento das plantas, devido ao seu efeito na velocidade das reações químicas e dos processos internos de transporte.

A temperatura ideal no solo para que a brotação dos toletes ocorra varia entre 32 e 38°C. Quando a temperatura do solo fica abaixo dos 18°C o crescimento das raízes é desacelerado, tendo como ponto ótimo de crescimento 35°C. A taxa de absorção de água pelas raízes da cana-de-açúcar também é afetada pela temperatura do solo, com temperatura de absorção máxima entre 28 e 30°C, com redução na faixa dos 10 a 15°C (FAUCONNIER; BESSEREAU, 1970).

Para um bom desenvolvimento que garanta alta produção e rendimento de açúcar, a temperatura média durante o dia deve ser entre 22 e 30°C, com prejuízos no período

vegetativo quando atinge de 16 a 18°C (DOORENBOS; KASSAM, 1979). A temperatura mínima que não prejudique o crescimento da planta durante o período vegetativo é em torno de 20°C, de modo que a faixa de 10 a 20°C favorece a maturação (CÂMARA, 1993; MARIN, 2008).

Temperaturas do ar excessivamente elevadas também podem prejudicar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Segundo Fauconnier e Bassereau (1970), a atividade fotossintética da cana-de-açúcar aumenta entre 23 e 32°C, caindo a partir de 32°C. Os autores afirmam que a respiração máxima da espécie é atingida quando submetida a temperaturas de 36 e 38°C, e que acima dos 33°C o ganho de matéria seca tende a diminuir e até se tornar nulo, quando a respiração se iguala à fotossíntese bruta, por volta dos 38°C.

Assumindo a premissa de que a temperatura do ar está intimamente relacionada à taxa de fotossíntese e de respiração das plantas e, conseqüentemente, ao seu desenvolvimento, o uso do conceito de graus-dia (°C dia) torna-se útil para o monitoramento do desenvolvimento de espécies vegetais. Este conceito pressupõe a existência de temperaturas basais (inferior e superior) aquém ou além das quais as plantas não se desenvolvem, sendo que cada espécie vegetal possui suas temperaturas basais, as quais podem variar de acordo com o estágio fenológico da planta (PEREIRA et al., 2002).

Na fase de emergência da cana-de-açúcar, Barbieri et al. (1979) consideraram a temperatura base de 21°C e temperatura ótima para emergência em cerca de 32°C. Segundo Fauconnier e Bassereau (1970), é difícil determinar com exatidão a temperatura-base da cana, embora alguns autores relatem que em temperaturas menores que 16°C não há desenvolvimento vegetativo na cana-de-açúcar.

Estudando o perfilhamento da parte aérea da cana-de-açúcar, Inman-Bamber (1994) determinou uma temperatura base de 16°C para densidade de colmos, e verificou que o pico de perfilhamento ocorreu ao 500°C dia, estabilizando-se após os 1200°C dia para as cultivares NCo376 e N12.

De acordo com os relatos acima, existe uma variabilidade considerável nos valores de temperatura basal para o desenvolvimento fenológico da cana. Segundo Liu et al. (1998), uma possível explicação para essas estimativas inconsistentes da temperatura basal é que em condições de campo, as temperaturas mínimas podem ficar abaixo ou as temperaturas máximas podem ficar acima da temperatura base. Neste caso, os autores desenvolveram uma nova técnica que considera as temperaturas base, sub-ótima, ótima e supra-ótima, obtendo bons resultados na determinação da temperatura base e tempo térmico para o desenvolvimento de diferentes fases fenológicas da cana.

3.4 Mudanças Climáticas

Apesar da grande discussão em torno das mudanças climáticas globais na última década, sabe-se que as projeções acerca do clima futuro e seu impacto na agricultura contém uma série de incertezas oriundas dos diferentes componentes do sistema de análise (e.g. clima, culturas, práticas de manejo). Quanto aos cenários climáticos, é difícil projetar no longo prazo como serão as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e como elas serão influenciadas pela política e o desenvolvimento socioeconômico (ASSENG et al., 2013). Como alternativa, utiliza-se um conjunto de cenários climáticos possíveis ao invés de apenas uma simulação gerada por um único modelo (MOSS et al., 2010).

Em setembro de 2013, o IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – deu início às publicações referentes ao AR5 – 5º Relatório de Avaliação sobre Mudanças Climáticas Globais – tornando público o Relatório do Grupo I que trata sobre os acontecimentos com o clima global, as consequências das mudanças do clima e os cenários futuros; o Relatório do Grupo II que trata de Impactos, Adaptação; e o Relatório do Grupo III que trata de Vulnerabilidade e Mitigação das Mudanças Climáticas.

Para a elaboração do AR5, os cientistas realizaram avanços na modelagem do clima futuro, elaborando novos cenários de alterações climáticas que reproduzem em escala continental os padrões de temperatura de superfície e as tendências observadas ao longo de muitas décadas. É importante ressaltar que a nova abordagem na produção dos cenários foi realizada com o objetivo de reduzir as incertezas e buscando maior e mais eficaz integração entre as pesquisas das diferentes equipes ligadas ao IPCC.

Os pesquisadores de mudança do clima de diferentes disciplinas têm estabelecido uma nova metodologia com nova coordenação para o desenvolvimento de cenários climáticos futuros. O método consiste na elaboração de quatro cenários futuros de forçantes radiativas, os RCPs – Caminhos Representativos de Concentrações. O termo ‘representativos’ refere-se a um de muitos cenários possíveis, e a palavra ‘caminhos’, aos níveis de concentrações de estudo que não apenas um valor pontual de concentração de longo prazo, mas a trajetória ao longo do tempo para alcançar tal resultado (MOSS et al., 2010).

Os cenários de emissão utilizados no AR5 são (1) RCP 8.5, onde o forçamento radiativo é maior do que $8,5 \text{ W m}^{-2}$ e a concentração de CO_2 equivalente maior do que 1.370 ppm.; (2) RCP 6.0, onde o forçamento radiativo será de cerca de 6 W m^{-2} e a concentração de CO_2 equivalente em torno de 650 ppm.; (3) RCP 4.5, onde o forçamento radiativo será

aproximadamente de $4,5 \text{ W m}^{-2}$ e a concentração de CO_2 equivalente girará em torno de 650 ppm; e (4) RCP 2.6, onde o forçamento radiativo ficará em torno de 3 W m^{-2} e a concentração de CO_2 equivalente atingirá um pico de cerca de 490 ppm antes de 2100 e então declinará (MOSS et al., 2010).

As projeções de variabilidade e mudança climática indicam para alterações na umidade do solo e da frequência de eventos extremos de alta temperatura, inundações e secas em muitas localidades (ALEXANDROV; HOOGENBOOM, 2000). Bombardi e Carvalho (2008) sugeriram que para a região Centro-Oeste do Brasil, onde estão as maiores áreas de expansão da cana-de-açúcar, deverá haver um aumento na ocorrência de eventos extremos, tanto de anos mais chuvosos quanto de secas mais intensas. Esse cenário de maior fragilidade climática é especialmente importante para culturas com ciclos mais longos, mais expostas aos riscos climáticos, como é o caso da cana-de-açúcar.

3.4.1 Impactos das mudanças climáticas na cultura cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo C_4 , que têm um mecanismo de concentração de CO_2 nas células do mesofilo mobilizando as moléculas de CO_2 e transportando-as na forma de uma molécula de quatro carbonos para descarboxilação nas células da bainha vascular (ALLEN et al., 1985). O mecanismo de concentração de CO_2 nas células do mesofilo, contudo, permite às plantas C_4 fechar parcialmente os estômatos, reduzindo a condutância estomática e a transpiração quando submetidas a elevadas concentrações de CO_2 (MARIN, 2014).

Segundo Marin e Nassif (2013), acreditava-se, até pouco tempo, que as plantas C_4 não responderiam a incrementos na $[\text{CO}_2]$, baseado nos estudos de Ottman et al. (2001) para sorgo, Leakey et al. (2006) para milho e Maherali et al. (2002) para uma gramínea de ciclo C_4 antiga do Texas, Estados Unidos. No entanto, estudos com cana-de-açúcar realizados por Ziska e Bunce (1997), Vu et al. (2006), Souza et al. (2008) e Vu e Allen Jr. (2009) relataram incrementos de fotossíntese e acúmulo de biomassa expressivos em resposta à elevação na $[\text{CO}_2]$ mesmo em plantas sem estresse hídrico e/ou nutricional, e conduzidas sob diferentes tratamentos experimentais e condições climáticas. Da mesma maneira, Souza et al. (2008) e Vu e Allen Jr. (2009) reportaram incremento de 30% na fotossíntese e de 40% na produção de biomassa em plantas crescendo em câmaras de topo-aberto com $[\text{CO}_2]$ em torno de 720 ppm. Esses autores também reportaram redução na abertura estomática e na transpiração foliar de cerca de 30% nessas condições.

Embora ainda haja grande discussão em torno desses trabalhos na comunidade científica, parece razoável aceitar que $[CO_2]$ tem um papel mais relevante na cultura da cana-de-açúcar do que aquele observado para outras culturas de ciclo C4 já estudadas ao redor do mundo.

As respostas de espécies C4 ao aumento da $[CO_2]$ atmosféricas são variáveis entre as espécies, mas em um levantamento feito por Drake et al. (1997) em 41 artigos abrangendo 28 espécies, encontrou-se diminuição média da condutância estomática de cerca de 20%. Assim, por causa das características anatômicas e fisiológicas, espera-se que as plantas C4 respondam de modo mais pronunciado à elevação na $[CO_2]$, fechando os estômatos em maior grau do que as espécies C3 (TOLBERT; ZELICH, 1983). Alguns autores assumem que as folhas das plantas C4 estejam saturadas de CO_2 e que, portanto, elas responderiam menos ao aumento da $[CO_2]$ atmosférico do que as plantas C3. Ottman et al. (2001) e Leakey et al. (2006) mostraram que o sorgo e o milho, bem adubados e irrigados, não responderam à elevação na $[CO_2]$.

Na revisão feita por Da Matta et al. (2009), envolvendo espécies C3 e C4, a condutância estomática foi consistentemente reduzida conforme a $[CO_2]$ foi elevada (AINSWORTH; LONG, 2005; LEAKEY, 2009; ZISKA; BUNCE, 2006 apud MARIN, 2014). Quando a elevação da $[CO_2]$ ocorre junto com a elevação da temperatura, com ou sem estresse hídrico, as plantas de metabolismo C4 apresentam uma elevação da produtividade, o que foi demonstrado por Morgan et al. (2011) em espécies C4 onde o aumento da $[CO_2]$ eleva a eficiência do uso da água e, por outro lado, causa um aumento na produção de biomassa, e, conseqüentemente, um aumento na superfície de transpiração. Os mesmos autores demonstraram que quando ocorre um aumento da temperatura em conjunto com elevação da $[CO_2]$, a produtividade das plantas C4 apresentou-se mais elevada.

A elevação da $[CO_2]$ em plantas C4 tem como consequência o aumento da taxa de assimilação via aumento da pressão parcial de CO_2 intercelular, melhoria nas relações hídricas, devido à redução da condutividade estomática e consequente redução dos efeitos negativos do estresse hídrico no crescimento das folhas, e o aumento da temperatura foliar, estimulando a divisão e expansão celular, elevando assim o acúmulo de biomassa (GHANNOUM et al., 2000).

Entre os elementos meteorológicos com projeção de mudança nas próximas décadas, a $[CO_2]$ é a que apresenta a menor incerteza em relação à expectativa de elevação. Análises de sensibilidade utilizando os modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar mostraram que o $[CO_2]$ tem papel fundamental para as projeções de cenários futuros de cana-de-açúcar

(MARIN et al., 2014). Os modelos atualmente disponíveis para simulação de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar podem fornecer subsídio muito útil para geração desse tipo de cenário, mas atualmente sabe-se muito mais sobre a cinética da Rubisco, a resposta fotossintética e estomática da cultura à mudança da $[CO_2]$, e sobre os mecanismos de resposta retroalimentadora ao nível foliar na cana-de-açúcar (MARCHIORI, 2010). Estes avanços, contudo, não foram integralmente incorporados aos modelos disponíveis e isso poderia trazer maior confiança às simulações desta natureza.

Por outro lado, a relevância das diferenças espécies-dependentes na aclimação fotossintética à $[CO_2]$ elevada permanece sob discussão na comunidade científica, indicando que a comunidade de fisiologistas de plantas poderia encontrar argumentos para novos estudos na carência dos modeladores de evidências científicas que suportem as melhorias nos modelos (MARIN et al., 2014). Por exemplo, podem-se considerar os dois modelos atualmente mais utilizados no mundo quanto ao modo como as respostas à elevação da $[CO_2]$ foram incorporadas ao modelo. No modelo APSIM-Sugar a elevação na $[CO_2]$ é considerada pela multiplicação dos coeficientes de referência da eficiência da transpiração (TUE) e da eficiência de uso da radiação (RUE) por valores modificadores.

O modelo DSSAT/CANEGRO, por sua vez, computa uma baixa resposta direta da fotossíntese e uma resposta mais pronunciada da transpiração em relação à $[CO_2]$ elevada, principalmente por causa do forte aumento da resistência foliar à difusão de vapor (ALLEN et al., 1985), conduzindo a uma maior produtividade de água e redução do estresse hídrico. O modelo DSSAT/CANEGRO também utiliza um fator de ajuste para evapotranspiração de referência de uma superfície hipotética (representando um gramado) em atmosfera $[CO_2] = 330$ ppm e sob $[CO_2]$ elevada (MARIN et al., 2012).

Quanto à fotossíntese, o modelo DSSAT/CANEGRO calcula o incremento diário de biomassa baseada na abordagem da eficiência de uso da radiação (SINGELS & BEZUIDENHOUT, 2002) e um algoritmo para computar a fertilização decorrente da $[CO_2]$ elevada (SINGELS et al., 2013).

3.5 Mudanças no sistema de produção canavieiro

O impacto das mudanças climáticas em sendo alvo de estudos aplicado à cultura da cana-de-açúcar no Brasil (GOUVÊA et al., 2009; MARIN et al., 2012; MARIN; NASSIF, 2013; SANTOS; SENTELHAS, 2013; SINGELS et al., 2013). Contudo, os protocolos de simulação de produtividade agrícola do projeto “*The Agricultural Model Intercomparison and*

Improvement Project – AgMIP” (ROSENZWEIG et al., 2013a) sugerem que as prováveis mudanças tecnológicas no padrão de manejo das culturas sejam também consideradas nos cenários futuros.

No caso do Brasil, três aspectos de manejo parecem ter maior possibilidade de mudanças nas próximas décadas: manejo de palhada, do nitrogênio e da irrigação. Por exemplo, após um período de intenso crescimento até 2009, o setor canavieiro do Brasil experimenta dificuldades decorrentes de condições climáticas desfavoráveis, queda no padrão de manejo dos canaviais, restrição e acesso ao crédito, aumento de custos e impossibilidade de elevação dos preços do etanol no mercado interno (AGUIAR et al., 2012). Um fator que amenizou os efeitos desta crise sobre o setor foi a implementação, em larga escala, da produção de energia elétrica a partir dos resíduos da cultura, denominado bagaço. Este processo foi motivado principalmente pela crise de abastecimento de energia de 2001, com potencial de expansão nos próximos anos (NAGAOKA et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2011). No Brasil, uma provável fonte futura de biomassa para este setor é a palha da cana-de-açúcar, atualmente deixada sobre o solo dos canaviais após a colheita mecanizada da cultura. Neste contexto, vale a pena mencionar, uma tendência aparentemente pouco promissora sob o ponto de vista econômico no Brasil é a produção comercial de etanol celulósico, também conhecido como etanol de segunda geração.

Tanto nas áreas de expansão canavieira como nas regiões tradicionais, a retirada da palhada para a produção de etanol de segunda geração, ou mesmo para a cogeração de eletricidade, é uma possibilidade que pode ocorrer num curto intervalo de tempo. Essa prática, contudo, já foi demonstrada impactante sob o ponto de vista produtivo, com redução de aproximadamente 25% nos níveis de produtividade em sistemas de produção australianos e sul-africanos (THORNBURN et al., 2002, 2004; VALLIS et al., 1996). No Brasil, o nível desse impacto vem sendo alvo de experimentos de campo, mas estudos baseados em modelos em processos indicam essa mesma tendência (MARIN et al., 2013; COSTA et al., 2014).

Associado ao manejo de palha, estudos realizados na Austrália e África do Sul analisaram também o manejo de nitrogênio na cultura e mostraram forte interação entre o manejo da palhada (e, portanto, do carbono) e a disponibilidade de nitrogênio mineral e de água no perfil de solo. Outro aspecto abordado em estudos similares foi o efeito do manejo da palha e da fertilização nitrogenada nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e contaminação ambiental (THORNBURN et al., 2010). Um quarto componente implícito nas simulações australianas e sul-africanas foi o aprimoramento do manejo da água em áreas com limitação hídrica e/ou com alto custo associado à prática da irrigação (e.g. INMAN-

BAMBER, 2004; SINGELS et al., 1998). O aspecto hídrico é especialmente importante neste momento já que, entre 2003 e 2008 observou-se forte expansão da cultura da cana-de-açúcar para regiões onde os ambientes de produção são menos favoráveis. Segundo Manzatto (2009), grande parte da área para o cultivo futuro da cana-de-açúcar ocorrerá em áreas de pastagens degradadas, principalmente na região Centro-Oeste, onde normalmente é necessária irrigação. Na região Nordeste do Brasil, tanto nos tabuleiros costeiros como no semiárido, as condições edafoclimáticas tornam necessário o uso de irrigação para elevar a produtividade, evitar prejuízos com morte de soqueiras e necessidade de renovação precoce do canavial (FARIAS et al., 2008).

Neste sentido, apesar da dificuldade para obtenção de simulações com modelos robustos considerando diversos aspectos do sistema produtivo (por exemplo, clima, manejo de palha, nitrogênio e água), vale o esforço no sentido de se obter uma análise mais ampla do setor produtivo. O trabalho de Biggs et al. (2013) é um exemplo, pois além de tratar de mudanças climáticas as simulações também abordaram outras instâncias do sistema de produção agrícola canavieiro, como o manejo da palhada (e do carbono no solo), a irrigação e o efeito da adubação nitrogenada no crescimento e na decomposição da matéria orgânica. No Brasil, a carência de conhecimento básico nas áreas de emissão e contaminação de sub-superfície vem sendo supridas por trabalhos recentes (CARMO et al., 2012; VALE et al., 2013), mas o conhecimento especializado em modelagem e tais processos ainda são limitante para a aplicação de uma abordagem como a apresentada por Biggs et al. (2013). No entanto, já é possível associar aspectos referentes à adubação nitrogenada, manejo de palhada, balanço hídrico do solo, irrigação e mudança climática na simulação de cenários, tornando tais projeções próximas da aplicação prática.

Como abordado, os dois MCP's mais robustos atualmente são o APSIM-Sugar (AS) (KEATING et al., 2003) e o DSSAT/CANEGRO (DC) (SINGELS et al., 2008). Marin et al. (2011) e Nassif et al. (2012) avaliaram o modelo DC com foco no efeito das propriedades físicas do solo, clima e irrigação. Algoritmos para nitrogênio e carbono estão disponíveis no modelo DC, mas os testes estão ainda restritos aos sistemas de produção da África do Sul e não foram incorporados à versão atualmente disponível para usuários finais. Os dados de entrada do AS são basicamente os mesmos do DC, mas há diferenças estruturais em relação ao o DC, além de uma extensa aplicação e avaliação do AS em estudos sobre o efeito do nitrogênio e do manejo da palhada no desenvolvimento da cana-de-açúcar (e.g. THORBURN et al., 2005; MUCHOW et al., 1996; COSTA et al., 2014). Por isso, as simulações envolvendo o efeito do nitrogênio serão focadas apenas no modelo AS.

3.6 Modelos de simulação baseados em processos para a cultura da cana-de-açúcar

3.6.1 Conceitos e definições

Os modelos podem contribuir para o conhecimento antecipatório, funcionando como ferramenta auxiliar às práticas humanas, como agricultura e pecuária (THORNLEY; JOHNSON, 2000). Na utilização de modelos de simulação, parte-se do princípio de que é possível descrever os processos biológicos por meio de equações matemáticas. Os sistemas são considerados como módulos, com entradas e saídas de matéria e energia, e são formados por compostos que interagem entre si, se autorregulam e são limitados no espaço e tempo. Embora projetados para representar a dinâmica de funcionamento do sistema solo-planta-atmosfera e interagir concomitantemente com o clima e com as práticas culturais, os modelos não necessariamente descrevem e simulam todos os processos deste sistema (ANDRADE et al., 2009).

Modelos podem ser classificados de várias formas e, didaticamente, são normalmente divididos em modelos empíricos e mecanísticos (THORNLEY; JOHNSON, 2000). Modelos empíricos são fundamentalmente relações matemáticas descritas a partir da observação do sistema, por informações biológicas ou por qualquer conhecimento da estrutura do sistema estudado.

Os modelos mecanísticos (ou baseados em processos) são relativamente mais complexos que os modelos empíricos. Entretanto, seu conteúdo normalmente aplica-se a uma maior gama de fenômenos. Baseiam-se na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura e, por este motivo, oferecem respostas mais consistentes. Wallach et al. (2001) afirmaram que os modelos mecanísticos tornaram-se cada vez mais importantes nos últimos anos como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como ferramentas de auxílio a tomada de decisão sobre o manejo de culturas (DOURADO-NETO et al., 1998).

Modelo empírico procede diretamente para as variáveis de interesse sobre a cultura, conectando as variáveis de entrada e saída em qualquer caminho que apresente um bom ajuste de dados. Os modelos mecanísticos, no entanto, têm um caminho relativamente mais longo, já que seus componentes precisam respeitar a ordem dos processos e suas respectivas propriedades, introduzindo variáveis extras no nível de órgãos, tecidos e agregados bioquímicos onde dados de observações adicionais geralmente são disponíveis. Pela síntese e integração do conjunto de equações que definem o sistema, chega-se então às variáveis de interesse da cultura, como massa de colmos e teor de sacarose, por exemplo.

Modelos mecanísticos contêm parâmetros que podem ser ajustados para diferentes condições de contorno com possibilidade de introdução de incertezas e propagação de erros no uso de modelos. O acúmulo de incertezas nos diferentes parâmetros pode levar a resultados diferentes em relação aos dados medidos em campo. Uma solução para este problema é a calibração do modelo para melhor ajuste entre os dados modelados e os medidos em campo (WALLACH et al., 2001, apud NASSIF, 2011). Desta maneira, uma vez realizada a calibração dos parâmetros para uma cultivar definida em determinado ambiente de produção, o modelo é capaz de simular o crescimento da cultura com a cultivar calibrada, representando no ambiente virtual o que ocorre em campo.

A modelagem de sistemas agrícolas baseada em processos biofísicos apresenta diversas aplicações, sendo algumas delas descritas por Lisson et al. (2005) como: a) previsão do comportamento da cultura, em resposta ao sistema de manejo e influências ambientais; b) uma forma de representar no computador o que ocorre no campo, substituindo o sistema real que exige altos custos para executar certos tipos de pesquisa ou estudos onde os efeitos de longo prazo podem ser difíceis de controlar por algum motivo c) para explorar variabilidade temporal e espacial, tanto em características de solo quanto do clima. Liu e Bull (2001), por exemplo, deram um bom exemplo sobre a descrição do processo de simulação mecanística da acumulação de biomassa e sacarose na cana-de-açúcar.

De maneira geral, pode-se definir um modelo como uma caracterização de um sistema real, que pode ser representado com um simples desenho do sistema analisado, como uma simples descrição numérica de um dado sistema. No contexto deste trabalho, pode-se definir modelos de culturas como um simulador dinâmico do crescimento da cana-de-açúcar por meio de integração numérica de seus processos biofísicos constituintes com a ajuda de computadores, sendo, portanto uma técnica para a representação da cultura no campo (SINCLAIR; SELIGMAN, 1996).

Utilizando modelos de culturas pode-se analisar e manipular um dado sistema produtivo com maior facilidade e rapidez do que seria possível considerando toda a complexidade do sistema real. Desde a década de 1960 modelos baseados em processos tem sido desenvolvidos e melhorados a partir de dados experimentais que preenchiam pequenas lacunas no conhecimento em oposição aos grandes e onerosos experimentos (OVERMAN; SCHOLTZ III, 2002).

Atualmente, há vários modelos dedicados a cultura da cana-de-açúcar: AUSCANE (JONES et al., 1988), DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), QCANE (LIU; KINGSTON, 1995), APSIM-Sugar (KEATING et al., 1999;

THORBURN et al., 2005), MOSICAS (MARTINE, 2003), CASUPRO (VILLEGAS et al., 2005; MARIN; JONES, 2014). Dada a importância da cultura da cana-de-açúcar, este é um pequeno número de modelos disponíveis haja vista a existência de 27 modelos para a cultura do trigo (ASSENG et al., 2013), além disso, apenas dois modelos estão de fato disponíveis: APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO.

O uso de modelos de crescimento de plantas (MCP), baseados em processos biofísicos de culturas (do inglês, *process based crop model*) (ROSENZWEIG et al., 2013b) é uma maneira aceita na comunidade científica para análise de impacto das mudanças climáticas, sendo estas, ferramentas consagradas na literatura científica para testes de hipóteses acadêmicas, bem como de avaliação de cenários e de impacto de mudanças climáticas na agricultura em escala global (ROSENWEIG; PARRY, 1994), nacional (ADAMS et al., 1990) e regional (MARIN et al., 2012). No entanto, apesar da importância desses modelos, os próprios modelos climáticos apresentam incertezas nas projeções agrícolas futuras.

Cientistas modeladores do clima têm trabalhado com o problema da incerteza nos modelos utilizando agrupamento (do inglês, *ensembles*) de modelos de circulação geral da atmosfera (SEMENOV; STRATONOVITCH, 2010). Os MCP's, contudo, são ainda utilizados com uma abordagem determinística, sem contar com a análise probabilística adequada a despeito das incertezas associadas em seus algoritmos, dados de entrada e parâmetros (ROTTER et al., 2011). O uso de um conjunto de MCP's adequadamente calibrado, em analogia aos *ensembles* dos modelos climáticos, é uma maneira de minimizar essa limitação. Por exemplo, em trigo (ROTTER et al., 2012) e cevada (PALOSUO et al., 2011), foram utilizados nove diferentes MCP's para as simulações de efeitos da mudança do clima desses cultivos na Europa. Uma das conclusões interessantes dos trabalhos foi que nenhum dos modelos mostrou-se superior para todos os locais avaliados e que a média das previsões de todos os modelos mostrou-se a mais adequada. Asseng et al. (2013) encontraram resultados similares utilizando 27 modelos de trigo, mas verificaram que apenas três modelos escolhidos aleatoriamente seriam suficientes para reduzir a incerteza.

O trabalho de Asseng et al. (2013), por verificar que uso de múltiplos modelos em paralelo foi capaz de reduzir a incerteza para níveis similares aos obtidos nos sítios experimentais, demonstrou a capacidade dessa ferramenta para aplicações operacionais em larga escala.

3.6.2 Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia - DSSAT

O Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia (DSSAT do inglês *Decision Support System Agrotechnology Transfer*) simula o crescimento e desenvolvimento de 16 culturas ao longo do tempo, levando em conta o clima, o solo, o manejo e aspectos genéticos da cultura (Figura 5) e vem sendo utilizado nos últimos 30 anos por usuários de todo mundo. O DSSAT é um software desenvolvido por um conjunto de cientistas da Universidade da Flórida, Universidade da Geórgia, da Universidade de Guelph, Universidade do Havaí, o Centro Internacional para o Desenvolvimento Agrícola e Fertilidade do Solo, Universidade do Estado de Iowa e outros cientistas associados ao Consórcio internacional para aplicações de sistemas agrícolas (ICASA – *International Consortium for Agricultural Systems Application*).

Figura 5 - Representação esquemática da base de dados, aplicação e componentes de software e seus usos com modelos de culturas para aplicações no sistema DSSAT (adaptado de JONES et al., 2003)

Este sistema incorpora diferentes modelos em um software que facilita a avaliação e aplicação dos modelos de culturas para diferentes propósitos (JONES et al., 20113). James e Cutforth (1996) descreveram o DSSAT como um conjunto de programas de computador

projetados para acomodar modelos padronizados de culturas, permitindo ao usuário inserir, organizar e armazenar dados de cultura, solo e climáticos, permite a calibração e validação de modelos de crescimento de culturas e, também, permite a avaliação de diferentes sistemas de manejo de um local.

De modo a otimizar o sistema, o DSSAT trabalha com alguns módulos comuns a diversos modelos, como aqueles que gerenciam o clima/tempo, o solo, o balanço de carbono e nitrogênio. No módulo de solo, por exemplo, a maioria das culturas utiliza uma abordagem com perfil unidimensional (horizontalmente homogêneo) e constituído por diferentes camadas verticais (JONES et al., 2003). Atualmente, ele já conta com uma abordagem que simula o balanço hídrico de modo bidimensional, considerando efeitos da cobertura de solo e interseção de sistemas agrícolas. O módulo solo integra informações de quatro módulos componentes: temperatura do solo, carbono e nitrogênio no solo e dinâmica da água. Para estimativa de evapotranspiração, o DSSAT possui o módulo solo-planta-atmosfera, reunindo dados de entrada de solo, planta e atmosfera, computando a interceptação da radiação solar pela cultura e calculando a transpiração máxima da copa em conjunto com a evaporação do solo. No cálculo de evapotranspiração, utilizada para estimar a transpiração foliar, o modelo pode utilizar uma ou duas opções. O padrão é o cálculo pelo método de Priestley e Taylor (1972), que exige somente dados de radiação solar e temperatura, descrito por Jones e Ritchie (1991). O método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), para o cálculo da evapotranspiração potencial pode ser utilizado opcionalmente para melhor representação em condições áridas e de muito vento, sendo necessário dados de umidade do ar e velocidade do vento na entrada do DSSAT.

Para o sistema de produção da cana-de-açúcar, o DSSAT conta com dois modelos. O principal deles é o DSSAT/CANGERO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), sendo baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES; KINIRY, 1986) e desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). O segundo modelo de cana-de-açúcar é o CASUPRO (VILLEGAS et al., 2005), mas que ainda requer desenvolvimentos adicionais para ser aplicado.

3.6.2.1 DSSAT/CANEGRO

Um dos dois modelos utilizados neste trabalho, o modelo DSSAT/CANEGRO foi desenvolvido na África do Sul com o intuito de modelar os processos fisiológicos mais

relevantes da indústria açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1991). Incluído no conjunto de modelos DSSAT (versão 3.1) (INMAN-BAMBER; KIKER, 1997), e atualizado na versão 4.5 do DSSAT por Singels et al. (2008), o modelo DSSAT/CANEGRO vem sendo aplicado em diversas regiões do mundo para análise e avanço no conhecimento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar (O'LEARY, 2000; INMAN-BAMBER et al., 2002; THORBURN et al., 2005). Na figura 6 observa-se um resumo esquemático de como o DSSAT/CANEGRO se encaixa na estrutura do modelo DSSAT.

Figura 6 - Representação diagramática do DSSAT/CANEGRO, como um módulo inserido no DSSAT (NASSIF, 2010 adaptado de SINGELS et al., 2008)

3.6.3 Simulador de Sistemas Produtivos Agrícolas – APSIM

O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM – *Agricultural Production Systems Simulator*) é utilizado para simulação de sistemas agrícolas e que foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa Em Sistemas De Produção Agrícola (APSRU), grupo colaborativo estabelecido sob liderança do CSIRO da Austrália. Desde sua criação, o APSIM foi projetado

como um simulador de sistemas agrícolas que possui como característica combinar a estimativa de rendimento das culturas, de modo acurado e inerente ao sistema de gestão, com a previsão das possíveis consequências, em longo prazo, das práticas agrícolas sobre os recursos do solo (KEATING et al., 2003).

O sistema possui a finalidade de simular processos biofísicos em sistemas agrícolas, principalmente para os que têm interesse econômico e ecológico nas práticas de gestão, tomadas de decisão e análise dos riscos envolvidos na agricultura, como os de clima, solo e manejo. O sistema tem sido largamente utilizado no mundo em aplicações diversas, como por exemplo, no suporte para a tomada de decisão no manejo nutricional de culturas, planejamento de sistemas agrícolas envolvendo sequência de cultivos e seu manejo, avaliação da previsão climática, previsão de safras, gestão e análise da cadeia de suprimentos em atividades do agronegócio, desenvolvimento de diretrizes para gestão de resíduos, avaliação dos riscos nas decisões político-governamentais e como um guia para atividades de investigação e educação (KEATING et al., 2003).

A engenharia de software que suporta o APSIM proporciona uma estrutura flexível para simulações climáticas, de manejo dos solos, no crescimento das culturas em diferentes sistemas agrícolas e para prever as possíveis alterações nos recursos do solo (PROBERT et al., 1998). O modelo também é capaz de simular o crescimento vegetativo, o acúmulo de nitrogênio e de açúcares, o consumo de água, a massa seca e fresca, com diferenciação entre estádios fenológicos. Para cana-de-açúcar também há diferenciação entre cana planta e cana soca e simula-se o efeito do manejo da palhada na cultura (MARIN et al., 2013; COSTA et al., 2014), da irrigação, manejo, solo e aos fatores genéticos (KEATING et al., 1999).

A estrutura do sistema no APSIM é constituída por:

- Um conjunto de módulos que simulam os processos biológicos e físicos em sistemas agrícolas;
- Módulos de gerenciamento que permitem ao usuário especificar as regras de manejo pretendidas e caracterizam o cenário simulado;
- Vários módulos para facilitar a entrada e saída de dados;
- Um mecanismo de simulação que controla todos os processos e mensagens entre os módulos independentes;

Estes elementos podem ser representados por um comando central e seus periféricos como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Representação esquemática dos componentes e modo de operação do sistema APSIM (KEATING et al., 2003)

O APSIM contém uma matriz de módulos para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade dos sistemas agrosilvopastoris, assim como as possíveis interações com os outros modelos de solo e clima. Alguns módulos de culturas disponíveis são: canola, cevada, grão de bico, algodão, soja, girassol, trigo e cana-de-açúcar (KEATING et al., 2003). O modelo possui parâmetros gerais para os solos que podem ser alterados de acordo com o local de interesse, como descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Componentes e parâmetros gerais do módulo de solos do modelo APSIM-Sugar

Parâmetros de Solo	Descrição
SOIL	Descrição geral: Classificação, País, Local...
SOIL – INITIAL WATER	Quantidade inicial de água – (%) A partir do topo ou uniformemente distribuído
SOIL	Profundidade molhada de solo – em (mm)
SOIL	Quantidade de água diretamente disponível (PAW) - (mm).
SOIL – WATER	Depth – Profundidade em (cm). KS – Condutividade hidráulica (facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo) BD – Bulk Density – Densidade do solo (Expressa em (g/cc), mas pode ser comparada ao padrão g/cm ³)
SOIL – WATER	AirDry – Limite inferior ao ponto de murcha. LL15 – Ponto de murcha permanente (15 bar). DUL – Capacidade de campo (0.1 bar) SAT – Conteúdo de água saturado
SOIL – WATER	Sugar LL – Ponto de murcha permanente para “cana” PAWC – Plant available water content = (DUL-LL15) conteúdo de água disponível para a planta KL – Fração de água disponível que pode ser extraída por dia (varia com solo e espécie) XF – root exploration factor “(1-0) para demonstrar se o solo é bom ou não”
SOILWAT	SWCON – Proporção da solução de solo acima da capacidade de campo, que pode ser drenada em um dia. MWCON – (0 ou 1) – se (valor=1) toda água acima da capacidade de campo é drenada. Se (valor = 0) água não é drenada. KLAT – Condutividade lateral (mm/day), que influencia o fluxo lateral.
Cona	Coefficiente de evaporação
CnCov	Superfície limiar da cobertura
CNRed	Diminuição do numero da curva
CN	Curve number
ANALYSIS	Rocks, texture, MunsellColour. EC – Condutividade elétrica (dS/m) pH, Cl, B CEC – (Cation Exchange Capacity) = (CTC) Ca, Mg, K Na e ESP (Exchangeable sodium percentage - %)
SOIL ORGANIC MATTER	OC – Carbono Orgânico (% total) Fbiom (%)– (BIOM = Forma lábil) Fração biológica e produtos derivados Finert (%)– Fração que não pode ser facilmente degradada (Húmus e produtos húmi-cos).
ANALYSIS	Mn – manganês, Al – alumínio, Sand, Silt, Clay (%) NO3 – nitrato NH4 – amônio SW – água inicial no solo (mm/mm)

Adaptado de APSIM-SUGAR Wiki, 2012

3.6.3.1 APSIM-Sugar

A Figura 8 descreve matematicamente o módulo APSIM-Sugar (APSIM-SUGAR WIKI, 2012). Neste modelo, os processos variam de acordo com o estágio fenológico. Existem cinco categorias distintas controlando a simulação da cultura, envolvendo informações genotípicas e das variedades, dentro do APSIM-Sugar (Tabela 2). Este é um módulo que pode ser utilizado para simular o desenvolvimento vegetal da cana-de-açúcar, concomitantemente ao desenvolvimento de outras espécies vegetais, ou em outros contextos diferentes de manejo, clima ou tipo de solo.

Figura 8 - Descrição do módulo Sugar do APSIM. Adaptado de APSIM-SUGAR Wiki, 2012

Tabela 2- Categorias e descrição dos arquivos INI utilizados pelo modelo APSIM-Sugar

Categorias para módulo INI - APSIM-Sugar	
Constants	Limites inferiores e superiores para os dados de clima e variáveis de solo.
Plant_crop	Parâmetros do crescimento e particionamento dos fotoassimilados; Fatores para temperaturas baixas, “geadas”; Parâmetros de uso da água e fatores de estresse para água e temperatura; Teores e fator de estresse para o nitrogênio.
Ratoon_crop	Os fatores são os mesmos utilizados no “Plant_crop” com possibilidade de alteração em alguns parâmetros para diferenciação entre cana planta e cana soca.
Cultivar plant crop	Parâmetros de desenvolvimento foliar; Fenologia; Parâmetros de particionamento de sacarose nos colmos.
Cultivar ratoon crop	Mesmos fatores estabelecidos no “Cultivar plant crop”, entretanto, podem ocorrer alterações entre os ciclos de cana planta e cana soca.

Adaptado de APSIM-Sugar Wiki, 2012

O modelo baseia-se no conceito de eficiência no uso da radiação (RUE) para computar a acumulação de biomassa seca da planta. Este parâmetro sofre redução por temperaturas extremas, excesso ou escassez de água no solo ou por limitação de nitrogênio, utilizado na fotossíntese. Nele, as folhas localizadas na parte aérea das plantas são responsáveis por interceptar a radiação incidente. O aumento da área foliar ocorre em função do tempo e da temperatura. A redução ocorre pelos mesmos fatores do exemplo anterior.

A biomassa da planta pode ser dividida nas seguintes variáveis de estado: folhas, palmito ou meristema apical (folhas imaturas), colmo, raízes e açúcares, sacarose que são determinadas pelo estágio fenológico da planta. O particionamento de matéria seca é realizado em 5 compartimentos diferentes na cana-de-açúcar: raiz, folhas, colmos, ponteiro e sacarose. No período correspondente entre a emergência e o início do crescimento da planta, a biomassa acima do solo é particionada entre a folha e o meristema apical na proporção de 1,7/1,0, segundo Keating et al. (1999), 63% da biomassa vai para as folhas e após o crescimento do caule 70% da biomassa vai para o colmo. Posteriormente, a biomassa é dividida entre estrutural e sacarose. A absorção de nitrogênio é simulada assim como retorno

de carbono e nitrogênio para o solo, por meio das raízes e da palhada. O modelo também diferencia a cana planta e cana soca.

O modelo assume que o desenvolvimento fenológico da cultura dê-se em cinco fases distintas:

- (Planting – sprouting), plantio à brotação;
- (Sprouting – emergence), brotação à emergência;
- (Emergence – Begin cane), emergência ao começo do crescimento da cana;
- (Begin cane – flowering), crescimento ao florescimento;
- (Flowering – end crop), florescimento até o fim da cultura.

Para brotação na cana planta são necessários 350 °C dia e para brotação na cana soca, 100 °C dia. Os brotos, do inglês “shoots”, crescem pela superfície do solo numa taxa de 0,8 mm por °C dia. O tempo térmico entre a emergência e o começo do crescimento do colmo é específico para cada cultivar, podendo variar entre 1200 °C dia a 1800 °C dia.

A cana produz flores, o número de colmos que podem estar florescendo varia muito no campo e a fisiologia é parcialmente compreendida. O modelo, portanto, foi desenvolvido para incluir o florescimento como um estágio fenológico, entretanto, não tem sido utilizado até um conhecimento aprimorado da fisiologia para a predição e avaliação do florescimento. A base experimental do algoritmo de expansão da copa está descrita em Robertson et al. (1998). O índice de área foliar verde é o produto da área verde foliar por colmos e o número de colmos por unidade de área. Os perfis de área foliar são parâmetros pertencentes específicos aos coeficientes genotípicos. Segundo Robertson et al. (1998) a emergência das primeiras folhas necessitam de 80°C dia, enquanto que para a quadragésima folha são necessários 150 °C dia. Tais respostas são reproduzidas no modelo para cana soca e cana planta, através de interpolação linear (KEATING et al., 1999).

O número de colmos aumenta rapidamente até atingir o pico durante os primeiros 1400 °C dia após a emergência, e posteriormente diminui até o número estável de colmos. Na cana soca o número máximo de colmos é atingido em tempo inferior ao da cana planta. O modelo é concebido para atingir um número final de colmos constante definido pelo usuário e diferenciado entre cana planta e cana soca.

A taxa diária de senescência para folhas verdes é calculada como o máximo de quatro taxas determinadas por fatores de envelhecimento, competição por luz, estresse hídrico e geada. Para evitar competição por luz, o modelo não permite mais que 13 folhas verdes

totalmente expandidas por colmo. A simulação induz a senescência uma vez que a fração da radiação interceptada atinge 0,85.

O estresse hídrico induz a senescência assim que o fator de déficit hídrico para a fotossíntese atinge níveis inferiores a 1,0. Com a temperatura mínima 0 °C, o índice de área foliar sofre redução de 10% por dia, caso a temperatura atinja -5°C ocorre a falência total dos tecidos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Calibração dos MCP's

Os modelos APSIM-Sugar (AS) e DSSAT/CANEGRO (DC) foram calibrados (Tabelas 4 e 5) conforme trabalho de Marin et al (2015), utilizando dados de 7 experimentos com a variedade RB867515 coletados em seis diferentes regiões do Brasil (Figura 9 e Tabela 3).

Dois dos 7 experimentos contaram com dois tratamentos hídricos (sequeiro e plenamente irrigado), enquanto que os cinco restantes cresceram sob condição de sequeiro. O experimento de Piracicaba foi irrigado por pivô-central, enquanto os demais foram irrigados por aspersão convencional. Esses conjuntos de dados continham cinco diferentes tipos edafoclimáticos representativos das distintas zonas de produção de cana no Brasil (Tabela 3). Todos os experimentos receberam níveis adequados de N, P e K e tiveram controle adequado de pragas, doenças e daninhas, tendo sido plantados com colmos saudáveis com densidade variando entre 13 e 15 gemas m^{-2} . Os experimentos foram implantados com espaçamentos entrelinhas variando entre 1,4 m e 1,5 m.

Figura 9 - Localização dos experimentos de campo usando a variedade RB867515, utilizados para calibração dos modelos de simulação APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO

Fonte: Marin et al. (2015)

Tabela 3 - Localização, datas de plantio e colheita, clima, solo, tratamento hídrico e profundidade máxima do sistema radicular nos sítios experimentais utilizados para calibração dos modelos APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO

Sítio	Localização	Datas de plantio e colheita	Clima ¹	Tratamento hídrico	Tipo de solo	Profundidade máxima do sistema radicular (cm)
1	União/PI, 4°51'S, 42°52'W, 68 m asml	29/9/2007 e 16/6/2008	27°C, 1500 mm, Aw	Irigado e sequeiro	Plintossolo (Oxisol)*	125
2	Coruripe/AL, 10°07'S, 36°10'W, 16 m asml	11/8/2007 e 15/12/2008	24.4 °C, 1400 mm, As'	2 níveis de irrigação parcial	Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	40
3	Coruripe/AL, 10°07'S, 36°10'W, 16 m asml	16/8/2005 e 15/9/2006	21.6°C, 1400 mm, As'	Sequeiro	Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	40
4	Aparecida do Taboado/MS, 20°05'S, 51°18'W, 335 m asml	1/7/2006 e 9/8/2007	23.5°C, 1560 mm, Aw	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400
5	Colina/SP, 20°25'S, 48°19'W, 590 m asml	10/2/2004 e 1/12/2005	22.8°C, 1363 mm, Cwa	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400
6	Olimpia/SP, 20°26'S, 48°32'W, 500 m asml	10/2/2004 e 1/12/2005	23.3°C, 1349 mm, Cwa	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400
7	Piracicaba/SP, 22°41'S, 47°38'W, 540 m asml	16/10/2012 e 15/6/2013	22.4°C, 1280 mm, Cwa	Irigado	Argissolo Vermelho (Typic Hapludults)*	400

*Classificação segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) e, entre parênteses, a correspondente mais próxima segundo o U.S. Soil Taxonomy.

Fonte: Marin et al. (2015)

¹ Respectivamente: temperatura média anual, chuva total anual, classificação de Koeppen

Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados para simulação da cultivar RB867515 para o modelo DSSAT/CANEGRO

Parâmetro	Descrição	Unidade	RB867515
PARCEMAX	Radiation use conversion efficiency	gMJ	9.9
APFMX	Aboveground biomass partition fraction of a mature crop	fraction	0.88
STKPFMAX	Stalk partition fraction of aboveground biomass	fraction	0.65
LFMAX	Maximum green leaf number	Leaves/stalk	10.
MXLFAREA	Area of the biggest leaf	cm ²	594
MXLFARNO	Leaf no. of the biggest leaf		18
PI1	Phyllochron for leaves younger than leaf no.= Pswitch	°C.d	89
PI2	Phyllochron for leaves older than leaf no.= Pswitch	°C.d	107
PSWITCH	Leaf no. where switch in phyllochron occurs		18
TTPLNTEM	Thermal time requirement for emergence of a plant crop	°C.d	408
CHUIBASE	Thermal time requirement for start of stalk elongation	°C.d	547
TT_POPGROWTH	Thermal time requirement to peak tiller population	°C.d	628
MAX_POP	Peak tiller population	m ⁻²	16
POPTT16	Final tiller population	m ⁻²	10

Fonte: Marin et al. (2015)

Tabela 5 – Valores de parâmetros utilizados na simulação da cultivar RB867515 para o modelo APSIM-Sugar

Parâmetro	Descrição	Unidade	RB867515				
leaf_size	Área da folha	cm ²	3500	45000	74600	74600	
leaf_size_no	Número de folha		1	5	18	26	
cane_fraction	Fração de partição do colmo da biomassa acima do solo	fração	0.70				
sucrose_fraction_stalk	Fração da sacarose no colmo	fração	1	0.55			
stress_factor_stalk	Fator de estresse no crescimento do colmo		0.2	1			
tt_emerg_to_beg_cane	Tempo térmico da emergência ao início do crescimento do colmo	°C.d	650				
tt_begcane_to_flowering	Tempo térmico da emergência ao florescimento	°C.d	8000				
tt_flowering_to_crop_end	Tempo térmico da emergência ao florescimento	°C.d	2000				
green_leaf_no	Número máximo de folhas verdes	folhas/colmo ¹	13				
tillerf_leaf_size	Fator de perfilhamento		2	3	3	3	2
tillerf_leaf_size_no	Número de perfilhos		1	5	10	18	26

Fonte: Marin et al. (2015)

4.2 Delimitação das Zonas Homogêneas no Estado de São Paulo

Os MCP's operam na escala local e sua operação demanda recursos computacionais relativamente grandes. Desta maneira, entende-se que a delimitação das zonas homogêneas é importante para a alocação mais adequada dos pontos de simulação no Estado de São Paulo. Dada a complexidade dos sistemas, a demanda por dados de entrada e o grande número de cenários a serem simulados, é necessário limitar o número de pontos de simulação.

Para limitar o número de pontos de simulação, mantendo o compromisso com a representatividade das simulações, utilizou-se uma adaptação da abordagem desenvolvida por van Wart et al. (2013), utilizou-se uma base geoespacial contendo dados climáticos de São Paulo e Estados vizinhos, mapas pedológicos e dados de análises físico-químicas de perfis de solo (SOARES, 2015). Os critérios de classificação estão apresentados na Tabela 6 com as variáveis utilizadas para a elaboração do mapa de zonas homogêneas do Estado de São Paulo (Figura 10). Neste trabalho, na caracterização do solo utilizou-se o mapa de solos do Brasil publicado pela Embrapa Solos na escala de 1:250.000. Sua elaboração foi baseada no Projeto RADAMBRASIL (1973-1986), que contém o levantamento do relevo do território brasileiro por imagens aéreas de radar. Essa base de dados possui as características dos solos:

nomenclatura, cor, textura e característica química. Além disso, foi integrada a este mapa, uma base de dados detalhada (5772 pontos) contendo análises físico-químicas de perfis de solos do projeto RADAMBRASIL, no qual foram utilizadas as variáveis capacidade de troca de cátions (CTC), matéria orgânica no solo e água disponível. A base de dados de tipo de solo foi obtida através do trabalho de Cooper et al (2005). O mapa de zonas homogêneas resultou em 29 zonas distribuídas pelo Estado de São Paulo (Figura 10).

Tabela 6 - Variáveis consideradas para o mapa de zonas homogêneas e suas respectivas classes

Variável	Siglas	Classes
Graus-dias	GDD1	500 a 1000
	GDD2	1000 a 1500
	GDD3	1500 a 2000
	GDD4	2000 a 2500
Deficiência hídrica	DEF1	0 a 100 mm
	DEF2	100 a 200 mm
	DEF3	200 a 300 mm
Índice de Aridez	IA1	Médio
	IA2	Pouco úmido
	IA3	Muito úmido
Solos	Solo A	Nitossolo, Argissolo, Latossolo; Eutrófico; Argiloso; CTC média/alta
	Solo B	Gleissolo; CTC alta / Argissolo; distrófico; argisolo e média; CTC média/alta / Argissolo; eutrófico; argiloso; CTC baixa / Latossolo; eutrófico; média; CTC baixa / Latossolo; distrófico; argiloso e média; CTC média/alta
	Solo C	Gleissolo; CTC média / Argissolo; distrófico; média; CTC baixa / Latossolo; distrófico; argiloso e média; CTC Baixa
	Solo D	Glissolo; CTC baixa / Cambissolo / Neossolo

Figura 10 - Mapa de zonas homogêneas do Estado de São Paulo e a localização das estações meteorológicas utilizadas nas simulações

4.3 Consistência e formatação das séries climáticas e geração da linha de base.

Utilizaram-se séries de dados meteorológicos obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) selecionando-se 38 estações meteorológicas, distribuídas pelo Estado de São Paulo e Estados vizinhos (Tabela 7). A seleção das estações baseou-se na representatividade de cada ponto de simulação em relação à sua respectiva zona homogênea, bem como na qualidade da série de dados, a distribuição espacial das estações em relação às áreas onde a cana-de-açúcar é cultivada, com base nos dados do CanaSat (AGUIAR et al., 2010). Tais séries constituíram o cenário atual (linha de base) das simulações, constituída por uma série de 26 anos de dados diários assumindo-se $[CO_2]$ de 350 ppm.

Cada série consistiu em dados de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, e radiação solar global. Os dados de radiação solar nos locais e períodos faltantes foram estimados com o método de Angstron-Prescott (nos locais em que havia dados de insolação disponíveis) ou método de Bristow e Campbell com os coeficientes calibrados por Marin et

al. (2012). Os dados das 38 estações foram consistidos e tiveram suas falhas preenchidas com programa WGEN (RICHARDSON; WRIGHT, 1984). Quando disponível, utilizou-se dados de estações próximas para preenchimento de períodos com grandes falhas (maior que uma semana). Todas as séries foram uniformizadas para ter início em 1 de janeiro de 1980 e final em 31 de dezembro de 2006, totalizando 26 anos, com o intuito de padronizar o período das séries históricas e facilitar a configuração dos modelos para as simulações e convertidas em arquivos .MET (formato do modelo APSIM) e .WTH (formato DSSAT) para serem inseridas nos MCP's.

Tabela 7 - Estações meteorológicas com suas respectivas latitude, longitude e altitude.

	Estação	Estado	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Adamantina	SP	-21.67	-51.07	409
2	Assis	SP	-22.67	-50.37	527
3	Barretos	SP	-20.57	-48.57	551
4	Catanduva	SP	-21.11	-48.93	570
5	Casa Branca	SP	-21.77	-47.08	698
6	Cordeirópolis	SP	-22.52	-47.45	648
7	Franca	SP	-20.55	-47.42	978
8	Ilha Solteira	SP	-20.40	-51.32	329
9	Itapeva	SP	-23.97	-48.90	661
10	Jaboticabal	SP	-21.25	-48.30	589
11	Jales	SP	-20.27	-50.57	484
12	Jaú	SP	-22.27	-48.57	555
13	José Bonifácio	SP	-21.07	-49.70	454
14	Lins	SP	-21.67	-49.77	439
15	Manduri	SP	-23.07	-49.35	570
16	Marília	SP	-22.22	-49.95	683
17	Matão	SP	-21.60	-48.37	563
18	Frutal	MG	-20.03	-48.93	546
19	Machado	MG	-21.66	-45.91	857
20	Uberaba	MG	-19.75	-47.91	788
21	Mirante do Paranapanema	SP	-22.30	-51.92	414
22	Mococa	SP	-21.47	-47.01	621
23	Paranaíba	MS	-19.70	-51.18	419
24	Três Lagoas	MS	-20.78	-51.70	328
25	Osvaldo Cruz	SP	-21.77	-50.90	479
26	Palmital	SP	-22.80	-50.20	501
27	Paulínia	SP	-22.77	-47.15	601
28	Pedrinhas Paulista	SP	-22.82	-50.77	354
29	Pindorama	SP	-21.22	-48.93	587
30	Presidente Prudente	SP	-22.10	-51.37	430
31	Rancharia	SP	-22.23	-50.90	517
32	Ribeirão Preto	SP	-21.17	-47.80	568
33	Santa Cruz do Rio Pardo	SP	-22.82	-49.37	566
34	São José do Rio Preto	SP	-20.80	-49.37	515
35	São Simão	SP	-21.48	-47.55	668
36	São Carlos	SP	-21.96	-49.37	856
37	Tupi Paulista	SP	-21.38	-51.58	395
38	Votuporanga	SP	-20.42	-49.97	498

4.4 Geração dos cenários climáticos futuros

A equipe responsável pelas pesquisas climáticas do projeto AgMIP – *The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project* – desenvolveu um algoritmo em linguagem “R” (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011) que permite criar cenários futuros baseados nos RCP’s. O projeto AgMIP por sua vez utilizou dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) que envolve cenários de 20 grupos de modelagem climática pelo mundo, totalizando 20 modelos de circulação global (HUDSON; RUANE, 2015).

A base de dados desenvolvida pelo AgMIP foi disponibilizada para uso neste trabalho e os cenários foram criados para os 38 locais de simulação propostos. Os GCM’s (Modelos de Circulação Global) utilizados foram CSIRO-Mk3-6-0 (G) e HadGEM2-ES (K), gerando projeções futuras para o período entre 2040 a 2065. Foram selecionados os cenários de emissão do RCP 4.5 (G) e RCP 8.5 (I), permitindo assim a comparação com a série da linha de base (série climática atual). O RCP 4.5 foi desenvolvido pela equipe de modelagem MiniCAM, baseada no Instituto de Investigação de Mudança Global e o Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico. Este é um cenário que assume a possibilidade de estabilização nas concentrações de gases pelo emprego de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa até 2100, com forçamento radiativo de aproximadamente $4,5 \text{ W m}^{-2}$ e concentração de CO_2 em torno de 650 ppm. O RCP 8.5 foi desenvolvido pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados, na Áustria e é caracterizado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa que levam a altas concentrações desses gases ao longo do tempo, onde o forçamento radiativo é maior do que $8,5 \text{ W m}^{-2}$ e a concentração de CO_2 maior do que 1370 ppm. Sinteticamente, pode-se afirmar que o RCP 4.5 é de mudanças no padrão de emissões de gases de efeito estufa, enquanto o RCP 8.5 de aumento das emissões.

Com as séries climáticas futuras criadas e formatadas, os dados foram organizados em dois cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5) e pelos modelos de circulação geral CSIRO-Mk3-6-0 (G) e HadGEM2-ES (K), com três épocas de corte/colheita da cana-de-açúcar para cada local, como sumarizado esquematicamente na Figura 11.

Figura 11 - Representação esquemática dos cenários climáticos futuros utilizados para simulação com dois modelos de cana-de-açúcar. RCP 4.5 e RCP 8.5 representam cenários de emissões. CSIRO-Mk3-6-0 e HadGEM2-ES representam os modelos climáticos. Colheita precoce, média e tardia representam as épocas de plantio e corte de cana-de-açúcar nos meses de maio, agosto e novembro, respectivamente

Para as simulações do cenário atual foram utilizadas séries de 26 anos de dados diários assumindo concentração de CO₂ ([CO₂]) de 350 ppm. Já nas simulações das projeções futuras acrescentou-se CO₂ atmosférico, na concentração de 650 ppm e 1370 ppm, respectivamente para os RCP's 4.5 e 8.5. Não foram simuladas alterações na radiação solar. Os tratamentos foram replicados para cada estação e os resultados das simulações foram extraídos dos arquivos de saída dos modelos para avaliar o desempenho da cultura sob os diferentes cenários climáticos. Os tratamentos realizados para as simulações de crescimento e produtividade nos cenários futuros totalizaram 456 combinações (38 municípios · 2 cenários · 2 GCM's · 3 períodos de corte) que somados à simulação do cenário atual (38 municípios · 1 cenário · 3 períodos de corte = 114), totalizaram 570 tratamentos. Sabendo que essas simulações foram feitas para 26 anos, tem-se que os modelos DC e AS simularam 14820 ciclos de cana-de-açúcar.

4.5 Configurações dos MCP's

Após a calibração e a configuração das séries históricas climáticas, os MCP's tiveram seu módulo de manejo ajustado para representar de modo mais próximo possível o sistema produtivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Foram assumidas três datas de plantios de cana de ano (12 meses), com plantio em 15 de maio (precoce), 15 de agosto (média) e 15 de novembro (tardia), com o objetivo de avaliar a resposta da cana-de-açúcar em diferentes épocas do ano e diferentes fases de crescimento. Em ambos os modelos, as configurações de irrigação, densidade de plantas, profundidade de plantio e quantidade de cortes para a reforma do canavial, foram determinados buscando tornar a simulação mais próxima possível com o tratamento dado pelas usinas brasileiras aos canaviais (Tabela 8). Para o modelo AS (uma vez que o DC não simula tais aspectos) os padrões de adubação nitrogenada e sistema de colheita foram configurados como consta na Tabela 9.

Tabela 8 – Descrição do padrão de manejo utilizado nas simulações com os modelos

Manejo	Descrição	
Adubação	Cana planta	Aplicação de 30 kg/ha 60 dias após o plantio e colheita
	Cana soca	Aplicação de 120 kg/ha 60 dias após o plantio e colheita
Irrigação	Não há	
Ocorrência de queimada	Não há	
Densidade de plantas (m ²)	7	
Cortes para reforma do canavial	5	

4.6 Caracterização dos solos predominantes

Os perfis de solos necessários para simulações nos MCP's, para cada localidade, foram configurados com base numa análise regional a partir de mapas e perfis de solo provenientes do PROJETO RADAMBRASIL (1973-1986), na escala 1:250.000, utilizando-se

o programa ArcGIS 9.3/ArcMap®, como desenvolvido por Pinto (2012) e utilizado por Marin (2014). Com o uso da ferramenta “buffer” do referido software estabeleceu-se raio de 100 km em torno de cada um dos pontos que foram cruzados com o mapa de solos e posterior cruzamento com os elementos do mapa de solo. Com base nesse procedimento, foi possível identificar e quantificar quais os solos ocorrem entorno de cada ponto, selecionando-se então o solo mais representativo de cada ponto. Após essa seleção, foi realizada busca no banco de dados de perfis de solos da Embrapa (<http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/>) coletando-se dados de perfis de solos com a mesma classificação e oriundos de análises realizadas em proximidade com o ponto de simulação selecionado. Para os perfis que não contavam com os parâmetros físico-hídricos, utilizaram-se as equações de pedotransferência para os solos brasileiros estabelecidas por Tomasella, Hodnett e Rossato (2000).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos cenários climáticos futuros.

Os cenários futuros, em média, representaram um aumento de 3% de precipitação total anual (45 mm), 9% na temperatura média máxima (3°C) e 15% na temperatura média mínima (3°C) dos locais analisados neste estudo em relação ao cenário atual.

Ao caracterizar cada cenário individualmente (Tabela 9), pôde-se observar que o cenário GG projetou manutenção dos volumes de chuva e aumento de cerca de 2°C nas temperatura máxima e mínima, em média. O cenário GK, por sua vez, indicou aumento de 5% o volume de chuvas e de 2,5°C nas temperaturas máxima e mínima. Já o cenário IG projetou aumento de 3% no volume de chuva e de 3°C nas temperaturas. No cenário IK observou-se projeção de aumento de 5% no volume de chuvas e de 3°C nas temperaturas máxima e mínima (Tabela 10). De modo geral, é possível sumarizar os quatro cenários comparando-os entre si da seguinte forma: GG sendo seco com aumento de 2°C, GK úmido com aumento de 2,5°C, IG seco com aumento de 3°C e IK úmido com aumento de 3°C de temperatura.

A título de exemplo, selecionando-se quatro localidades situadas em diferentes regiões do Estado como é o caso de Paulínia/SP (Leste), Adamantina/SP (Oeste), Votuporanga/SP (Norte) e Itapeva/SP (Sul) (Tabela 11), observou-se que a maior diferença entre a linha de base (LB - clima atual) e o cenário futuro deu-se em termos de precipitação. Paulínia, dentre elas, foi a localidade que apresentou o maior aumento da precipitação, chegando a 8% no volume anual de chuva, enquanto Adamantina e Votuporanga tiveram apenas 1% de elevação em relação ao volume atualmente observado. O Anexo A apresenta o extrato do balanço hídrico para cada localidade analisada, onde é possível analisar detalhadamente a disponibilidade hídrica no solo comparando deficiências e excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas (valores negativos apenas para fins de distinção do excedente na tabela). De maneira geral, é possível observar que em média para todos os locais e cenários futuros, há tendência de que a deficiência hídrica seja elevada em cerca de 37% e o excedente hídrico diminuirá 7%, resultando em um cenário de estresse hídrico relativamente maior para a cultura da cana-de-açúcar nos cenários climáticos futuros.

Ao analisar os cenários climáticos considerando a média de todos os locais de estudo, mês a mês, é possível observar as perturbações introduzidas por cada modelo climático. O cenário GG indicou que o mês de fevereiro foi o que apresentou maior aumento do volume de

chuvas, cerca de 48% (22 mm) maior em relação à LB. Já o mês de julho sofreu queda de 19% no volume, representando perda de 4 mm. Em relação à temperatura, no cenário GG o mês mais afetado pelo aumento da temperatura média foi setembro, com aumento de 2,9°C neste mês. Neste cenário, o mês que sofreu menor perturbação foi fevereiro, com aumento de 1,5°C na temperatura média.

O cenário GK apresentou aumento no volume de chuvas no mês de outubro, com 41 mm (34 %) em relação à LB. Nos meses de março, novembro e dezembro não houve alteração da precipitação, e em setembro foi a maior perda, chegando a 11 % (9mm). O mês de setembro sofreu aumento de 3,2°C na temperatura, sendo este o mês de maior aumento (ver Anexo A).

O cenário IG teve o maior aumento do volume de chuva em maio, chegando a 51 mm de aumento (76%) e a maior perda em julho, atingindo 47% (11mm). Quanto à temperatura, o mês de outubro atingiu aumento de 4°C, representando aumento de 16% na temperatura para este mês, em relação à LB. O mês de menor aumento foi março, com 7% (1,8°C) (ver Anexo A).

O cenário IK teve maior aumento da precipitação no mês de fevereiro, chegando a 48mm (22%). O mês de maior perda de chuva foi julho com queda de 13% na precipitação que representa 3 mm de chuva a menos para este mês. Quanto à temperatura, novamente outubro apresentou o maior aumento, chegando ao incremento de 3,6°C (15%) na temperatura média. O mês de abril sofreu o menor aumento (8%), representando aumento de 2°C (ver Anexo A).

De maneira geral, pode-se afirmar, através da média dos quatro cenários que em termos de precipitação o mês de maio terá aumento no volume de chuvas de 20 mm, representando 30% de aumento, e, o mês de dezembro terá redução de 12mm (6%) de precipitação. Quanto à temperatura média, setembro será o mês mais afetado, com aumento de 3,1°C (14%), enquanto que fevereiro terá a menor faixa de aumento, chegando a 1,9°C (7%) (ver Anexo A).

Tabela 9 - Média anual atual e variações introduzidas por cada modelo de circulação geral da atmosfera (GCM) utilizado para a geração dos cenários climáticos futuros, onde: GG representa o cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; GK representa o cenário de emissão RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; IG representa o cenário de emissão RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; e IK representa o cenário de emissão RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

Localidade	Atual				GG			GK			IG			IK		
	RS	Chuva	T _{máx}	T _{mín}	Chuva	T _{máx}	T _{mín}	Chuva	T _{máx}	T _{mín}	Chuva	T _{máx}	T _{mín}	Chuva	T _{máx}	T _{mín}
Adamantina	23,2	1303,7	30,4	17,8	1294,7	32,8	20,2	1317,4	33,0	20,0	1356,0	33,2	20,6	1286,8	33,6	20,5
Assis	19,3	1391,4	28,6	15,6	1436,7	30,7	17,7	1441,7	31,1	18,0	1411,3	31,2	18,2	1409,3	31,5	18,1
Barretos	20,2	1567,2	31,8	17,6	1553,1	34,1	19,9	1673,3	34,1	20,2	1603,2	34,5	20,4	1685,9	34,7	20,3
Casa Branca	19,9	1583,4	28,8	15,1	1587,0	31,0	17,4	1716,9	30,9	17,8	1621,8	31,5	17,8	1709,2	31,5	17,9
Catanduva	17,4	1340,2	29,5	18,2	1327,2	31,8	20,5	1390,3	32,0	20,9	1382,2	32,2	21,0	1381,9	32,5	20,9
Cordeirópolis	18,3	1478,5	27,6	15,8	1536,6	29,5	17,8	1629,2	29,5	18,2	1545,3	29,9	18,2	1671,7	30,0	18,4
Franca	19,6	1474,8	28,8	15,5	1483,9	31,0	17,7	1585,1	30,9	18,1	1510,5	31,5	18,2	1596,2	31,5	18,2
Frutal	18,9	1140,7	31,0	18,6	1053,6	33,6	21,0	1211,8	33,3	21,2	1100,1	33,9	21,4	1210,3	34,0	21,3
Ilha Solteira	18,6	1534,3	31,3	19,5	1443,3	33,9	22,0	1606,9	33,9	22,0	1599,4	34,2	22,5	1571,8	34,4	22,3
Itapeva	17,5	1630,3	26,9	16,1	1681,6	28,9	18,2	1679,5	28,8	18,4	1692,4	29,3	18,7	1726,0	29,3	18,5
Jaboticabal	18,9	1395,0	29,5	17,1	1376,4	31,8	19,4	1376,4	31,8	19,4	1419,6	32,2	19,9	1430,9	32,5	19,8
Jales	19,5	1342,3	30,9	17,8	1263,5	33,6	20,3	1402,9	33,5	20,3	1359,4	33,9	20,8	1390,1	34,1	20,6
Jaú	18,3	1435,4	28,4	16,6	1410,1	30,7	18,9	1470,6	30,6	19,1	1479,2	31,1	19,4	1488,3	31,2	19,2
José Bonifácio	19,2	1361,1	30,8	17,8	1354,5	33,2	20,2	1393,2	33,3	20,0	1399,7	33,5	20,7	1336,0	33,9	20,6
Lins	18,1	1261,7	30,2	18,9	1256,5	32,6	21,2	1292,1	32,7	21,0	1324,2	32,9	21,7	1258,5	33,3	21,6
Machado	18,4	1526,4	27,0	14,9	1560,7	29,1	17,0	1805,9	28,9	17,3	1601,6	29,5	17,4	1763,4	29,5	17,5
Manduri	19,0	1446,3	28,0	14,9	1498,8	29,9	17,0	1488,2	30,2	17,5	1523,3	30,4	17,5	1507,8	30,8	17,6
Marília	18,6	1575,4	29,5	17,4	1561,4	31,9	19,8	1615,1	31,9	19,8	1629,9	32,2	20,3	1579,2	32,4	19,9
Matão	18,6	1393,4	29,5	17,3	1370,6	31,8	19,6	1453,9	32,0	20,0	1406,3	32,2	20,1	1440,7	32,5	20,0
Mirante do Paranapanema	16,4	1340,2	28,3	19,1	1325,2	30,9	21,5	1431,8	30,9	21,5	1392,8	31,3	22,0	1355,6	31,3	21,7
Mococa	18,2	1534,9	28,7	17,0	1537,3	31,0	19,3	1657,7	30,8	19,7	1594,2	31,4	19,7	1657,6	31,5	19,8
Oswaldo Cruz	19,3	1350,1	32,1	19,0	1351,1	34,4	21,4	1373,8	34,6	21,2	1398,9	34,8	21,8	1334,0	35,2	21,7
Palmital	18,3	1445,5	28,9	17,0	1486,7	31,0	19,1	1485,6	31,4	19,4	1473,2	31,5	19,6	1463,0	31,8	19,5
Paranaíba	18,5	1538,6	30,4	18,5	1537,3	31,0	19,3	1657,7	30,8	19,7	1594,2	31,4	19,7	1657,6	31,5	19,8
Paulínia	19,0	1448,4	29,0	16,0	1510,7	30,9	18,0	1594,7	30,9	18,4	1522,5	31,3	18,4	1639,6	31,4	18,6
Pedrinhas Paulista	19,3	1796,4	30,2	16,9	1818,6	32,3	19,0	1830,0	32,6	19,3	1826,2	32,7	19,5	1807,3	33,1	19,4
Pindorama	19,1	1377,5	29,5	16,7	1406,3	32,3	19,5	1436,0	32,0	19,4	1406,3	32,3	19,5	1427,0	32,5	19,4
Presidente Prudente	17,3	1452,7	29,1	18,7	1435,7	31,5	21,0	1494,0	31,6	21,1	1506,8	31,9	21,5	1459,3	32,1	21,2
Rancharia	18,8	1323,3	30,2	17,8	1385,0	32,2	19,9	1366,9	32,1	20,1	1400,8	32,6	20,3	1406,4	32,6	20,2
Ribeirão Preto	18,6	1491,0	29,0	16,8	1501,0	31,2	19,1	1617,8	31,1	19,6	1544,5	31,7	19,5	1616,8	31,7	19,6
Santa Cruz do Rio Pardo	20,4	1342,1	29,4	14,7	1410,8	33,5	21,2	1473,1	33,7	21,6	1463,9	33,9	21,7	1474,3	34,2	21,6
São Carlos	18,0	1465,1	26,9	15,5	1432,4	29,2	17,8	1503,5	29,1	18,0	1478,8	29,6	18,2	1507,4	29,7	18,1
São José do Rio Preto	19,0	1435,8	31,2	18,9	1410,8	33,5	21,2	1473,1	33,7	21,6	1463,9	33,9	21,7	1474,3	34,2	21,6
São Simão	18,7	1444,0	29,1	16,8	1540,5	31,4	19,0	1540,5	31,3	19,5	1492,3	31,8	19,4	1559,6	31,9	19,5
Tres Lagoas	18,3	1386,1	30,9	19,2	1378,3	33,5	21,6	1432,0	33,6	21,6	1414,0	33,8	22,1	1404,7	34,1	21,9
Tupi Paulista	19,8	1369,8	31,4	17,7	1343,9	33,7	20,1	1394,3	33,8	20,5	1424,2	34,1	20,5	1410,9	34,4	20,4
Uberaba	18,6	1547,6	29,0	17,1	1432,3	31,6	19,5	1673,8	31,3	19,7	1486,5	31,9	19,9	1660,6	32,0	19,8
Votuporanga	18,9	1442,4	30,5	17,9	1362,9	33,1	20,5	1515,4	33,0	20,5	1465,1	33,4	20,9	1483,8	33,6	20,8

Tabela 10 – Caracterização climática dos cenários futuros em relação ao clima atual

Cenários	GG			GK			IG			IK		
Elementos Climáticos	Chuva	Tmáx	Tmín	Chuva	Tmáx	Tmín	Chuva	Tmáx	Tmín	Chuva	Tmáx	Tmín
Variação relativa (%)	0	8	14	5	8	15	3	9	17	5	10	16
Variação (mm ou °C)	-1	2	2	73	2	3	42	3	3	67	3	3

Tabela 11 - Porcentagem de aumento na chuva, temperatura máxima e mínima, quando comparados os cenários futuros (média) do clima atual

Municípios	Chuva	Tmáx	Tmín
Adamantina	1	9	14
Itapeva	4	8	14
Paulinia	8	7	15
Votuporanga	1	9	15

5.2 Cenários agrícolas futuros com base nas simulações nos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO

Com base nas simulações produzidas pelos 2 modelos foi possível identificar que a massa fresca de colmos nos cenários futuros respondeu positivamente ao clima futuro (Tabelas 12 e 13) em relação à LB, chegando a 16% no modelo AS e 4% no modelo DC (Tabela 12). De modo geral, nenhum dos cenários climáticos futuros implicaria em perda de produtividade em relação ao padrão atual. Na Tabela 12, por exemplo, nota-se que os incrementos futuros de produtividade para o modelo DSSAT são relativamente menores que os produzidos pelo modelo APSIM, e essa diferença parece estar mais associada à diferenças quanto a simulação da LB entre os dois modelos, uma vez que o APSIM sugere uma média geral de 100 t ha⁻¹, enquanto o DSSAT simula uma produtividade média de 115 t ha⁻¹. A este respeito, vale mencionar que esse padrão produzido pelos modelos é coerente com o esperado, uma vez que o APSIM considera o balanço de carbono e nitrogênio no sistema solo-planta – e portanto o possível estresse por deficiência de nitrogênio sobre cultura –, enquanto o DSSAT leva em conta apenas o estresse por deficiência hídrica. Assim, conceitualmente, parece razoável esperar que ambos os modelos com base nas calibrações utilizadas (baseadas em experimentos conduzidos em condições próximas do potencial de crescimento – ver item 4.1) produzam simulações acima dos valores comerciais médios observados em condições de campo. Além disso, por simular mais processos que podem

produzir estresse sobre a cultura (água e nitrogênio neste caso), é fácil compreender que o modelo APSIM produza simulações com produtividade inferiores ao DSSAT (que simula apenas o estresse hídrico no caso da cana-de-açúcar).

Tabela 12 – Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT com relação aos 38 locais simulados, em 4 cenários climáticos futuros em relação ao clima atual, assumindo que 28% da área plantada era de cana precoce, 44% de cana média e 28% de cana tardia

Cenário	Média Ponderada de Produtividade - APSIM (t/ha)	Média Ponderada de Produtividade - DSSAT (t/ha)
LB	100	115
GG	114	117
GK	116	120
IG	119	119
IK	118	120

Nos cenários futuros, os modelos apresentaram produtividade mais elevadas e em níveis relativamente próximos, o que parece estar associado à resposta direta e indireta do $[CO_2]$ sobre a fotossíntese e à regulação estomática, como discutido por Marin e Nassif (2012). A regulação estomática é afetada pela elevação da CO_2 nos cenários futuros, com fechamento parcial dos estômatos e a consequente elevação da resistência estomática. Isso, por sua vez, reduz o fluxo de seiva no xilema e eleva o potencial nos tecidos vegetais e minimizando o estresse hídrico (OWENSBY et al., 1997). Esse efeito vale ressaltar, ocorre sem que haja limitação na absorção do CO_2 , uma vez que o gradiente de concentração entre a cavidade estomática e o ar livre será suficientemente elevado para assegurar um alto gradiente, mesmo que os estômatos estejam relativamente menos abertos.

No trabalho de Marin et al. (2012), por exemplo, utilizou-se o modelo DC calibrado com um conjunto de dados experimentais coletados na região centro-sul do país, para projetar cenários futuros para o Estado de São Paulo, considerando quatro cenários climáticos produzidos pelos modelos de circulação geral da atmosfera PRECIS e CSIRO, com projeções futuras bastante favoráveis (ganhos de 1% para PRECIS B2 ciclo tardio até 54% no PRECIS A2 ciclo precoce) para a produtividade dos canaviais paulistas. Naquele trabalho, os autores apontaram a sensibilidade do modelo DC à elevação da $[CO_2]$ como principal razão para tais resultados.

Outro aspecto a diferenciar a resposta dos modelos AS e DC aos cenários climáticos futuros está relacionado com a sensibilidade dos modelos à variação da temperatura do ar. Como mostrado em Marin et al. (2013) e Singels et al. (2013), o modelo AS tem maior sensibilidade ao aumento da temperatura do ar e normalmente simula menores produtividades sob condição de temperatura relativamente mais elevada. O modelo DC, ao contrário, mostra-se mais estável para aumentos de até 3°C na temperatura do ar, passando a reduzir as estimativas de massa de colmos a partir desse valor. Isto está associado principalmente ao cômputo de graus-dia. Na versão atual do modelo DC, não há restrição para temperatura base superior no cômputo de graus-dia, enquanto que o AS tem essa limitação para temperaturas elevadas, que parecem limitar o ritmo de desenvolvimento da cultura para os padrões observados no Brasil (MARIN et al., 2015). No Anexo B, é possível observar os valores de temperatura média mensal e anual para os cenários atual e futuros, em todos os locais de estudo, verificando-se que a temperatura é substancialmente maior que as observadas no cenário atual. Em locais mais quentes, como Barretos/SP, o aumento chega a 3,8 °C enquanto que em locais de temperatura mais amenas, como São Carlos/SP, o aumento de temperatura chega a 2,7 °C.

É importante destacar o fato de que em todos os cenários analisados, a cana-de-açúcar tem maiores ganhos de produção quando plantadas em maio e agosto, que pode ser observado na Tabela 13. Tais diferenças de produtividade nesses períodos podem ser atribuídas, principalmente, ao fato de que os canaviais de novembro passam pelo período de maior estresse por deficiência hídrica com porte relativamente maior, asseverando o efeito do estresse sobre o desenvolvimento e crescimento da cultura. Analogamente, as plantas cultivadas em maio e agosto têm seu plantio realizado no outono e inverno, porém, em sua fase de intenso crescimento têm radiação solar e água no solo em níveis relativamente melhores, com consequências positivas sobre a produtividade da cultura.

Tabela 13 - Média das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT com relação aos 38 locais simulados, em 4 cenários climáticos futuros em relação ao clima atual, em 3 diferentes períodos de corte

Cenário	Média de Produtividade APSIM (t/ha)	Média de Produtividade DSSAT (t/ha)
LB		
Precoce	108	120
Médio	101	116
Tardio	90	108
GG		
Precoce	116	121
Médio	118	119
Tardio	104	111
GK		
Precoce	119	124
Médio	120	121
Tardio	106	115
IG		
Precoce	119	123
Médio	124	120
Tardio	110	114
IK		
Precoce	119	124
Médio	123	121
Tardio	108	115

A média ponderada por município, cenário e modelo é apresentada no Anexo C, onde se pode observar que na maioria dos locais analisados o modelo DC apresentou níveis de produtividade maiores que no modelo AS. Foram exceções as localidades de Assis/SP, Cordeirópolis/SP, Jaú/SP, José Bonifácio/SP, Matão/SP, Palmital/SP, Pedrinhas Paulistas/SP, Pindorama/SP, Presidente Prudente/SP, São Carlos/SP e São Simão/SP e uma possível causa para este padrão inverso (com produtividade do AS maior que o DC) pode estar relacionada com as diferentes de respostas dos modelos à disponibilidade de água (MARIN et al., 2015). Analisando os cenários climáticos dos 11 municípios supracitados foi possível observar um aumento de 1,25% no volume de chuva em média, para todos os cenários futuros, em relação aos outros municípios que apresentaram produtividade superior no modelo DC. Marin et al. (2015) explicam que este resultado, em parte, pode estar associado com o desenvolvimento radicular mais rápido em perfis de solos profundos. Assim, as raízes aprofundam-se mais

rapidamente cedo no AS, garantindo o abastecimento de água no reservatório do solo e reduzindo a influência dos períodos de seca no desenvolvimento da cultura e do crescimento.

5.3 Risco de produção para os cenários agrícolas futuros com base nas simulações nos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO

Uma forma útil de analisar o risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é através da probabilidade acumulada associada a níveis de produtividade e compará-las entre os dois modelos. Como já discutido, as projeções climáticas futuras indicaram aumento médio da produtividade para as três datas de colheita e todos os locais e ambos os modelos, e esse aumento correspondeu a uma maior estabilidade produtividade, com redução dos riscos de produção de cana-de-açúcar (Figura 12). Apesar de esse padrão ter sido observado em todos os cenários, a redução do risco climático foi mais marcante nas projeções dos modelos IG e IK.

Tal redução do risco de quebras de rendimentos nos cenários climáticos futuros indica uma possibilidade de menor volatilidade na produção cana-de-açúcar numa região de grande importância para o país, com potencial de melhoria no ambiente de negócios do setor e reflexos positivos sociais e econômicos. Recentemente, vale lembrar, oscilações no rendimento da cana devido ao clima e gestão tiveram grandes impactos sociais e econômicos (MARIN et al., 2012). Padrões similares de redução de risco foram também simulados para os canaviais sem irrigação na África do Sul, enquanto que lavouras irrigadas da Austrália mostraram menor potencial de ganho no futuro em decorrência das mudanças no clima (SINGELS et al., 2013).

Ao analisar a Tabela 14 é possível observar que o modelo AS projetou menor risco de perdas de produtividade em climas futuros do que o modelo DC, simulando menos de 140 t ha⁻¹ em 72% dos anos no cenário IG, com plantio em agosto. Uma maneira clara de interpretar esse dado exemplificado é que há 72% de chance de que no cenário IG a cana plantada em agosto produza menos de 140 t ha⁻¹, e que de igual modo, há 28% de chance da produtividade superar este nível.

Com base nas simulações do modelo AS, o cenário climático de maior risco no futuro foi o GG, com corte de novembro, indicando probabilidade de 12% de produzir mais de 140 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar. Enquanto que o modelo DC obteve maior risco nos cenários GG com cana plantada em agosto e novembro, e todos os outros cenários com cana plantada em

novembro (GK, IG, IK), chegando a apenas 1% de probabilidade de produzir mais de 140 t ha⁻¹.

Assim como discutido na seção 5.2, os maiores riscos de perda produtividade foram observados para os cortes de novembro, o que parece coerente com a realidade produtiva, uma vez que esses canaviais enfrentam estresses maiores que os cortes de maio e agosto. Na análise dos cenários climáticos (item 5.1), observou-se que o cenário GG projetou manutenção dos volumes de chuva e aumento de cerca de 2°C na temperatura máxima e mínima, em média, enquanto que os outros cenários indicaram aumento também da chuva. Este parece ser o motivo mais provável para que o cenário GG apresente maior risco de produtividade nos cenários futuros. Considerando conjuntamente os resultados apresentados na Figura 12 e a discussão da seção 5.2 (comparando as médias de produtividade), nota-se coerência nesses conjuntos de dados, uma vez que o modelo DC apontou pequena variação do risco no futuro (Figura 12a, 12c e 12e), enquanto que o modelo AS apontou para redução mais pronunciada no risco (Figuras 12b, 12d e 12f), o que concorda com o aumento mais expressivo das médias de produtividade (Tabela 12).

A título de exemplo, foram utilizadas as mesmas quatro localidades pontuadas no item 5.1 – Paulínia/SP, Adamantina/SP, Votuporanga/SP e Itapeva/SP – e tomou-se como base de referência para comparação o patamar de 80% de probabilidade de ocorrência. No município de Paulínia (Anexo AA), por exemplo, o modelo DC projetou menor risco de produção do que o AS, com 80% de probabilidade de produzir menos de 138,9 t ha⁻¹ no cenário IK, com corte em maio, indicando aumento de 3,5% na produtividade em relação à LB precoce (134,1 t ha⁻¹). Já o modelo AS, para o mesmo nível de probabilidade, simulou menos de 104,3 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar no cenário GG, com corte em agosto, resultando em aumento de 12,5% em relação à LB precoce (91,3 t ha⁻¹). Em Adamantina (Anexo D), o modelo DC simulou 80% de probabilidade de produzir menos de 146,5 t ha⁻¹ no cenário IG, com corte em maio, com ganhos de 3,5% na produtividade em relação à LB precoce (141,3 t ha⁻¹). No modelo AS, o cenário IG apresentou 80% de probabilidade de produzir menos de 144,3 t ha⁻¹ com corte em novembro, aumentando 6,3% comparado à LB precoce (135,1 t ha⁻¹). Em Votuporanga (AN), o modelo DC projetou probabilidade de 80% de produzir no máximo 139,7 t ha⁻¹ no cenário GK, com corte em maio, aumentando de 1,4% na produtividade em relação à LB precoce (137,7 t ha⁻¹) para o mesmo nível de probabilidade. O modelo AS simulou o limite de 156,1 t ha⁻¹ no cenário IG, com corte em agosto, com aumento de 13,5% em relação à LB média (135 t ha⁻¹). Em Itapeva (M), o modelo DC simulou menos de 135 t ha⁻¹ em 80% dos anos no cenário GK, com corte em maio, com ganhos de 3,2% na produtividade em relação à LB

precoce ($130,7 \text{ t ha}^{-1}$). Já as simulações com o modelo AS simularam menos de $130,7 \text{ t ha}^{-1}$ em 80% dos anos, no cenário IK, com corte em novembro, resultando em aumento de 11,2% em relação à LB média ($116,1 \text{ t ha}^{-1}$).

Figura 12 - Probabilidade acumulada de produtividade de cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para a linha de base e quatro cenários futuros, para as três datas de colheita de cana, nos modelos DSSAT/CANEGRO (DC) e APSIM/Sugar (AS)

Tabela 14 - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade consolidado para todos os municípios, em diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar nos modelos APSIM e DSSAT e para os seguintes cenários climáticos: (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

Cenário	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
Precoce_LB	3	15	41	68	85	2	8	19	29	95
Precoce_GG	1	11	35	61	77	1	8	19	27	92
Precoce_GK	1	8	30	58	75	1	5	15	25	88
Precoce_IG	1	8	29	57	75	1	6	17	25	89
Precoce_IK	1	7	30	57	75	1	6	16	25	88
Médio_LB	4	21	50	76	91	2	7	20	35	99
Médio_GG	1	8	27	57	77	2	6	19	30	99
Médio_GK	1	8	25	54	76	1	5	17	27	98
Médio_IG	1	6	21	49	72	1	5	18	28	98
Médio_IK	1	7	22	50	73	1	6	17	27	98
Tardio_LB	11	39	68	87	96	7	17	31	59	98
Tardio_GG	4	22	50	73	88	4	14	26	50	99
Tardio_GK	3	20	46	70	86	4	11	23	43	99
Tardio_IG	3	15	41	66	84	3	12	23	44	99
Tardio_IK	3	18	43	67	85	3	10	22	42	99

A associação da redução do risco climático (Figura 12 e Tabela 14) com a elevação das médias de produtividade (Tabela 12) indicam um potencial positivo para a cana-de-açúcar caso os cenários climáticos futuros sejam confirmados. Vale também destacar que para nenhum dos cenários e modelos avaliados houve queda na produtividade ou aumento do risco de produção. Isso concorda com estudos anteriores para o Brasil (MARIN et al., 2012; PINTO; MARIN, 2012; VIANA et al., 2015) utilizando outras configurações de simulação, modelos e cenários climáticos futuros. Como discutido, esse padrão positivo está fortemente associado a fertilização pelo CO₂, chegando a representar 50% da resposta positiva da cultura em termos de produtividade e estabilidade produtiva (SINGELS et al., 2013) e explica a resposta positiva mesmo havendo elevação da evapotranspiração em todos os cenários futuros sem compensação completa pela chuva. Outro importante ponto que explica esse padrão positivo de resposta é a aceleração do desenvolvimento da copa em decorrência da elevação das temperaturas, com maior interceptação da radiação solar ao longo do ciclo (SINGELS et al., 2013). Esses fatores explicam as diferenças de resultados observados neste estudo em comparação com as simulações feitas por Marin (2014) que encontrou possibilidade de

redução da produtividade média futura para o modelo AS. Nas simulações de Marin (2014) os valores de concentração de CO₂ são menores do que os utilizados nesta dissertação. Outro fator é que os cenários climáticos futuros utilizados por Marin (2014) apontam elevação da temperatura menores do que os aqui simulados, reforçando a tese de que o aumento da temperatura associado a altas concentrações de CO₂ são as principais razões para os cenários positivos aqui observados. Como discutido por Marin & Nassif (2012), tais cenários reforçam a ideia de que a cana-de-açúcar continua sendo uma estratégia promissora para o Brasil no futuro, fortalecendo uma matriz energética limpa, sustentável e que agrega valor à produção agrícola do país.

5.4 Incertezas e Limitações

É importante destacar que as projeções futuras tratam-se de cenários e não de previsões, e devem ser assim encaradas. Este trabalho representa um avanço no sentido de atender às recomendações de Rötter et al. (2011) e Rosenzweig et al. (2012) no sentido de se avaliar mais de um cenário climático futuro, dadas as incertezas que eles carregam. Seguindo a abordagem do projeto AgMIP, este trabalho também avança no sentido de reduzir a incerteza de análises baseadas em modelagem pelo uso de mais de um modelo de cultura, reduzindo as incertezas associadas à modelagem agrícola. Contudo, é bem sabido que os dois modelos aqui utilizados carregam consigo uma série de simplificações quanto à fertilidade e salinidade do solo, efeito de pragas, doenças e daninhas. Dentre eles, apenas o modelo AS considera os processos associados ao ciclo do carbono e do nitrogênio nas respostas da cultura.

Uma melhoria a ser avaliada para futuros estudos está relacionada ao possível efeito da radiação solar e da umidade relativa sobre o desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar, mas os cenários climáticos aqui utilizados não consideram estas duas variáveis meteorológicas, desconsiderando, portanto essa fonte de variação no clima futuro.

6 CONCLUSÕES

Os cenários climáticos futuros representaram, em média, um aumento de 3% de precipitação total anual (45 mm), 9% na temperatura média máxima (3°C) e 15% na temperatura média mínima (3°C) nos locais analisados em relação ao cenário atual. De modo geral, os quatro cenários foram definidos da seguinte forma: GG sendo seco com aumento de 2°C, GK úmido com aumento de 2,5°C, IG seco com aumento de 3°C e IK úmido com aumento de 3°C de temperatura.

As projeções climáticas futuras indicaram aumento da produtividade média para as três datas de colheita e todos os locais e ambos os modelos, chegando a 16% no modelo AS e 4% no modelo DC em relação à linha de base.

O modelo APSIM-Sugar indicou menor variabilidade temporal da produtividade em relação ao modelo DSSAT/CANEGRO, com redução do risco de baixa produtividade para todos os cenários, modelos e locais analisados.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, R.M.; ROSENZWEIG, C; PEART, R.M. Global climate change and US agriculture. **Nature**, London, v. 345, p. 219-224, 1990.
- AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y.E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v. 29, p. 440–451, 2010.
- AGUIAR, G.A.M.; SILVA, A.S.L.; LIMA FILHO, R.R.; TORRES JUNIOR, A.M. Cana-de-açúcar: índices e resultados econômicos. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, v. 32, p. 18–19, 2012.
- AINSWORTH, E.A.; LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, Cambridge, v. 165, p. 351-372, 2005.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**: a comprehensive study of the *Saccharum* source-T-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 725 p.
- ALEXANDROV, V.A.; HOOGENBOOM, G. The impact of climate variability and change on crop yield In Bulgaria. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 104, p. 315-327, 2000.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage, 56).
- ALLEN, V.H.; JONES, J.W. Rising atmospheric CO₂ and evapotranspiration. In: American Society of Agricultural Engineers. **Advances in evapotranspiration**. St Joseph: ASAE, 1985. p. 13-27.
- ALLISON, J.C.S.; PAMMENTER, N.W. Effect of nitrogen supply on the production and distribution of dry matter in sugarcane. **South African Journal of Plant and Soil**, Pretoria, v. 19, p. 12–16, 2002.
- ALLISON, J.C.S.; PAMMENTER, N.W.; HASLAM, R.J. Why does sugarcane (*Saccharum* Sp. hybrid) grow slowly? **South African Journal of Botany**, Pretoria, v. 73, p. 546-551, 2007.
- ANDRADE JR., A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J. A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 76–84, 2012.
- APSIM-SUGARCANE. Wiki. Disponível em: <<http://www.apsim.info/Wiki/APSIM-Documentation.ashx>>. Acesso em: 19 fev. 2012.
- ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change Advance Online Publication**, 2013. Disponível em: <<http://www.nature.com/nclimate/journal/v3/n9/full/nclimate1916.html>>. Acesso em: 05 maio 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES.
Publicação mensal da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores.
 Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/cartas/carta345.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2015.

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S., VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1979, Mossoró-RN.

BEZUIDENHOUT, C.N.; OLEARY, G.J.; SINGELS, A.; BAJIC, V.B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, Singapore, v. 76, p. 589-599, 2003.

BIGGS, J.S.; THORBURN, P.J.; CRIMP, S.; MASTERS, B.; ATTARD, S.J. Interactions between climate change and sugarcane management systems for improving water quality leaving farms in the Mackay Whitsunday Region, Austrália. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 180, n. 11, p. 79-89, 2013.

BOMBARDI, R.J.; CARVALHO, L.M.V. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com CO₂ usando o Modelo MIROC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, p. 58-72, 2008.

BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. Sugarcane. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology: some case histories**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: _____. **Produção da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 1993. p. 34-64.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 6, p. 449-456, 2013.

CARMO, J.B. do; FILOSO, S.; ZOTELLI, L.C. **Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizers application and crop trash accumulation**. Los Angeles: GCB Bioenergy, 2012. 136 p.

CASAGRANDE, A.A. Crescimento da cana-de-açúcar. **STAB, Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 7-8, 1996.

CLEMENTS, H.F. The ripening of sugar cane. **Sugar y Azúcar**, Engliword, v. 57, p. 29-78, 1962.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: v. 1 – Safra 2014/15, n. 4 – quarto levantamento, Brasília, 2015. p. 1-29,

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.; PINTO, H.M.; LOPES-ASSD, M.L. Simulação do efeito combinado de palhada e adubação na modelagem da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

CRONQUIST, A. **An integrated system of classification of flowering plants**. New York: Columbia University Press, 1981. 270 p.

DA MATTA, F.M.A.; GRANDIS, A.B.C.; BUCKERIDGE, M.S. **Impacts of climate changes on crop physiology and food quality**. New York: Food Research International, 2009.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, K.; REICHARDT, D.R.; NIELSEN, J.A.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 46–50, 1998.

DRAKE, B.G.; GONZALEZ-MELER, M.A.; LONG, S.P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 48, p. 609–639, 1997.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.A.; DANTAS NETO, J. Índice de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356–362, 2008.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La canne à sucre**. Paris: Maisonneuve et Larose, 1970. 468 p.

FERREIRA, M.A.S.; SOUZA, M.; TEIXEIRA, E. Determinantes da receita de exportação brasileira de açúcar e álcool. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 56, p. 47–59, 2009.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A. Efeito de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 62–68, 1997.

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445–479.

GHANNOUM, O.; VON CAEMMERER, Z.; ZISKA, L.H.; CONROY, J.P. The growth response of C4 plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant, Cell and Environment**, Dordrecht, v. 23, p. 931–942, 2000.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, Washington, v. 315, p. 808–810, 2007.

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**, Piracicaba, v. 66, p. 593–605, 2009.

HUDSON, N.I.; RUANE, A.C. Appendix 2: guide for running AgMIP climate scenario generation tools with R in windows, version 2.3. In: ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. (Ed.). **Handbook of climate change and agroecosystems: the Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP)**. New York: Imperial College Press, 2015. p. 387–440. (ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation, 3).

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, Bethlehem, v. 8, n. 2, p. 93-99, 1991.

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, London, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G.; KIKER, G. **CANEGRO 3.10**: DSSAT version 3.1 distribution software. Honolulu: University of Hawaii, IBSNAT, 1997.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, London, v. 76, p. 71-84, 2002.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2nd ed. Oxford: Blackwell, 2004. 216 p.

JAMES, Y.W.; CUTFORTH, H.W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 76, p. 9-19, 1996.

JONES, C.A.; KIRIRY, J.R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. Temple: Texas A&M University Press, 1986. 194 p.

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSELL, J.S. AUSCANE: simulation of Australian sugarcane with EPIC. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1988. 1290 p.

JONES, J.W.; RITCHIE, J.T. Crop growth models.. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1991. p. 63-89.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235-265, 2003.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, London, v. 61, p. 253-271, 1999.

KEATING, B.A.; CARBERRY, G.L.; HAMMER, G.L.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM: a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 267-288, 2003.

LEAKEY, A.D.B.; URIBELARREA, M.; AINSWORTH, E.A.; NAIDU, S.L.; ROGERS, A.; ORT, D.R. Photosynthesis, productivity and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. **Plant Physiology**, Amsterdam, v. 140, p. 779, 2006.

LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, London, v. 68, p. 7–111, 2000.

LEGENDRE, B.L. Ripening on sugarcane: effects of sunlight, temperature, and rainfall. **Crop Science**, London, v. 15, p. 349-352, 1975.

LISSEN, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, London, v. 92, p. 321–335, 2005.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, London, v. 144, p. 181–211, 2001.

LIU, D.L.; KINGSTON, G. QCANE: a simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation, in: research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints. In: WORKSHOP PROCEEDING, UNIVERSITY OF QUEENSLAND, 1995, St. Lucia, Brisbane. Workshop **Proceedings** St. Lucia: 1995. p. 25–29.

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

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)**. 1981. 126 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Faculdade de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1981.

MAHERALI, H.; REID, C.D.; POLLEY, H.W.; JOHNSON, H.B.; JACKSON, R.B. Stomatal acclimation over a subambient to elevated CO₂ gradient in C₃/C₄ grassland. **Plant, Cell & Environment**, Amsterdam, v. 25, p. 557-566, 2002.

MANZATTO, C.V.; Assad, E. F.; Bacca, J. F. M.; Zaroni, M. J.; Pereira, S. E. M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p.

MARCHIORI, P.E.R. **Variação da fotossíntese no dossel de variedades de cana-de-açúcar**. 2010. 178 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2010. MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. 2014. 262 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 1091-1096, 2011.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 1-17, 2014.

MARIN, F.; NASSIF, D.S.P. mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 232-239, 2013.

MARIN, F.R.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, New York, v. 26, p. 49-63, 2014.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; COSTA, L.G. da; OTTO, R. Simulating long-term effects of trash management on sugarcane yield for Brazilian cropping systems. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 2, p. 164-173. 2011.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling & Software**, v. 1, p. 1-2, 2015.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana de açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p. 111-130.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yields in Southern Brazil. **Climatic Change**, London, v. 1, p. 101-110, 2012.

MARIN, F.R.; THORNBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for a widely grown Brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28., 2013, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ISSCT, 2013.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, p. 100-110, 2011.

MARTINÉ, J-F.; SIBAND, P.; BONHOMME, R. Simulation of the maximum yield of sugar cane at different altitudes: effect of temperature on the conversion of radiation into biomass. **Agronomie**, Paris, v. 19, p. 3-12, 2003.

MONTEIRO, L.A. **Modelagem agrometeorológica como base para definição de ambientes de produção para cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2012. 117 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MORGAN, J.A.; DANIEL, R.; PENDALL, E.; DANA, M.; BLUMENTHAL, B.; KIMBALL, A.; YOLIMA, C. C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. **Nature**, London, v. 476, p. 202-205, 2011.

MOSS, R.H.; EDMONDS, J.A.; HIBBARD, K.A. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, p. 747-756, 2010.

MOZAMBANI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 11-18.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; KEATING, B.A. Effect of nitrogen on the time-course of sucrose accumulation in sugarcane. **Field Crops Research**, London, v. 47, p. 143–153, 1996.

NAGAOKA, M.P.T.; ESPERANCINI, M.S.T.; PINHEIRO, F.A. Analysis of electrical energy cogeneration by sugar-alcohol sector in State of São Paulo. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 41, p. 759-778, 2012.

NASCIMENTO, F.N. do.; OLIVEIRA NETRO, O.J. de; FIGUEIREDO, R.S. Modelo de avaliação da viabilidade econômica da cogeração de energia no setor sucroalcooleiro utilizando bagaço de cana pela aplicação da metodologia system dynamics. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, p. 3-18, 2011.

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 98 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE FILHO, W.J. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 311–318, 2012.

OLIVEIRA, F.C.R. de. **Ocupação, emprego e remuneração na cana-de-açúcar e em outras atividades agropecuárias no Brasil, de 1992 a 2007**. 2011. 168 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OTTMAN, M.J.; KIMBALL, B.A.; PINTER, P.J.; WALL, G.W.; VANDERLIP, R.L.; LEAVITT, S.W. Elevated CO₂ increases sorghum biomass under drought conditions. **New Phytologist**, London, v. 150, p. 261-273, 2001.

OVERMAN, A.R.; SCHOLTZ, R.V. III. Mathematical models of crop growth and yield. CRC Press. 2002 OWENSBY, C.E.; HAM, J.M.; KNAP, A.K.; BREMER, D.; AUEN, L.M. Water vapor fluxes and their impact under elevated CO₂ in a C₄-tallgrass prairie. **Global Change Biology**, London, v. 3, p. 189-195, 1997.

PALOSUO, T.; KERSEBAUM, K.C.; ANGULO, C. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of europe: a comparison of eight crop growth Models. **European Journal of Agronomy**, London, v. 35, p. 103–114, 2011.

PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

- PEREIRA, A.R.; BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatic conditioning of flowering induction in sugarcane. **Agricultural Meteorology**, London, v. 29, p. 103-110, 1983.
- PEREIRA, M.G.; CAMACHO, C.F.; FREITAS, M.A.V.; SILVA, N.F. da. The renewable energy market In Brazil: current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Berkeley, v. 16, p. 3786–3802, 2012.
- PINTO, H.M.S.; MARIN, F.R. **Projeções futuras de produtividade de cana-de-açúcar no brasil baseadas em cenários de mudanças climáticas**. 2012. 213 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental) – Campinas, 2013
- PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Victoria, v. 100, p. 81–92, 1972.
- PROBERT, M.E.; DIMES, J.P.; KEATING, B.A.; DALAL, R.C.; STRONG, W.M. APSIM s water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**, Essex, v. 56, p. 1-28, 1998.
- PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais**. Rio de Janeiro, 1973–1986. v. 31,32.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation For Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 12 maio2014.
- RICHARDSON, C.W.; WRIGHT, D.A. WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, v.9, p.83,
- ROBERTSON, M.J.; BONNETT, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J.A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian of Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n. 7, p. 819-828, 1998.
- RODRIGUEZ, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100 p.
- ROSENZWEIG, C. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): progress and preliminary results. In: AGU FALL MEETING, 2011, Cidade. **Abstracts**. New York: American Geophysical Union, 2011.
- ROSENZWEIG, C.; PARRY, M.L. Potential impact of climate change on world food supply. **Nature**, London, v. 367, p. 133-138, 1994.
- ROSENZWEIG, C.; JONES, J.W.; HATFIELD, J.L.; RUANE, A.C. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (Agmip): protocols and pilot studies. **Agricultural And Forest Meteorology**, Lincoln, v. 170, p. 166–182, 2013a
- ROSENZWEIG, C.; ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; RUANE, A.C.; MÜLLER, C.; ARNETH, A. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st Century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, v. 111, n. 9, p. 1-6, 2013b.

RÖTTER, R.P.; PALOSUO, T.; KERSEBAUM, K.C. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 133, p. 23–36, 2012.

RÖTTER, R.P.; CARTER, T.R.; OLESEN, J.E.; PORTER, J.R. Crop-climate models need an overhaul. **Nature Climate Change**, v. 1, p. 175–177, 2011.

SANTOS, D.L.; SENTELHAS, P.C. Climate change scenarios and their impact on water balance and sugarcane yield in Southern Brazil. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 4, p. 356–365, 2013.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBINI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. de (Org.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: ESALQ, 2006. cap. 2, p. 19–36.

SEMENOV, M.A.; STRATONOVITCH, P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. **Climate Research**, London, v. 41, n. 1, p. 1–14, 2010.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 698–704, 1996.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro Sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151–167, 2002.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4. 5-Canegro sugarcane plant module**. Mount Edgecombe: SASRI, 2008.

SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. Irricane: a simple computerized irrigation scheduling method for sugarcane. **Proceedings of South African Sugar Technology Association**, Mount Edgecombe, v. 72. p.117–122, 1998.

SINGELS, A.; JONES, M.; MARIN, F.R.; RUANE, A.; THORBURN, P. Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro model. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 4 p. 1–9, 2013,

SOARES, F.A. **Zonas edafoclimáticas homogêneas das principais regiões de cana-de-açúcar do Brasil**. 2015. 81 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

SOUZA, A.P.M.; GASPAR, E.; SILVA, E.C.; ULIAN, A.J.; WACLAWOSKY, M.Y.; NISHIYAMA, J.R. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 31, p. 1116–1127, 2008.

STEVENSON, D.W.A.; VAN DER MERWE, A.; BENNINGA, W.; ALLISON, J.C.S. Response of different sugarcane varieties to greater than normal applications of nitrogen.

Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, Mount Edgecombe, v. 66, p. 50-53, 1992.

STEVENSON, G.C. **Genetics and breeding of sugar cane**. London: Cambridge University Press, 1965. 284 p.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo MOSICAS**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

THORBURN, P.J.; HORAN, H.L.; BIGGS, J.S. Nitrogen management following crop residue retention in sugarcane production. 3rd ed. Melbourne: Super Soil, 2004

THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 337–351, 2005.

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; COLLINS, K.; PROBERT, M.E. Using the APSIM model to estimate nitrous oxide emissions from Australian sugarcane production systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 136, p. 343-350, 2010.

THORBURN, P.J.; VAN ANRWERPEN, R.; MEYER, J.H.; BEZUIDENHOUT, C.N. The impact of trash management on soil carbon and nitrogen: modelling long-term experimental results in the South African sugar industry. **Proceedings of South African Sugar Technology Association**, Mount Edgecombe, v. 76, n. 260, p. 260-268, 2002.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology**. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669 p.

TOLBERT, N.E.; ZELITCH, I. Carbon metabolism. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RISING ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE AND PLANT PRODUCTIVITY, Ed. E.R. Lemon. Westview Press, Boulder, Colorado 1983.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 64, p. 327, 2000.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>>. Acesso em: 01 abr. 2012

VALE, D.W.; PRADO, R.M.; CANTARELLA, H.; FONSECA, I.M. Ammonium and nitrate in soil and ratoon sugarcane grown in function of nitrogen on oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, p. 201-213, 2013.

VALLIS, I.; PARTON, W.J.; KEATING, B.A.; WOOD, A.W. Simulation of the effects of trash and n fertilizes management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 39, p. 115-132, 1996.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.

VAN WART, J.; VAN BUSSEL, L.G.J.; WOLF, J.; LICKER, R.; GRASSINI, P.; NELSON, A.; BOOGARD, H.; GERBER, J.; MUELLER, N.D.; CLAESSENS, K.; CASSMAN, K. Use

of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 44-55, 2013.

VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the saving irrigation impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 1, p. 1, 2015.

VILLEGAS, F.D.; DAZA, O.H.; JONES, J.W.; ROYCE, F.W. **CASUPRO**: an industry-driven sugarcane model. St. Joseph: ASAE, 2005. 22 p. (ASAE Paper, 053025). Apresentado no ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2005, Tampa.

VU, J.C.V.; ALLEN JR., L.H. Stem juice production of the C4 sugarcane (*Saccharum officinarum*) is enhanced by growth at double-ambient CO₂ and high temperature. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 166, p. 1141-1151, 2009.

VU, J.C.V.; ALLEN, L.H.; GESCH, R.W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO₂. **Plant Science**, Amsterdam, v. 171, p. 123-131, 2006.

WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGES, J.E.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, D.; AUBERTOT, J.N. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 757-766, 2001.

ZHOU, M.; SINGELS, A.; SAVAGE, M. J. Physiological parameters for modelling differences in canopy development between sugarcane cultivars. **Proceedings of The Annual Congress of The South African Sugar Technologists Association**, Durban, v.77, p. 610-621, 2003..

ZISKA, L.H.; BUNCE, J.A. Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: MORISON, I.L.; MORECROFT, M.D. (Ed.). **Plant growth and climate change**. Oxford: Blackwell, 2006. p. 17-47.

ANEXOS

Anexo A - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial. Os valores negativos representam o déficit hídrico e valores positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

(continua)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
Adamantina/SP	90	65	15	-10	-8	-15	-41	-66	0	0	22	48	-141 / 239
GG	34	119	8	-19	-9	-35	-65	-93	-13	-59	0	0	-293 / 161
GK	30	90	0	-15	-6	-27	-60	-84	-23	-37	0	0	-252 / 120
IG	55	78	10	-15	0	-7	-42	-73	-10	-69	0	0	-216 / 142
IK	44	84	14	-18	-13	-29	-66	-80	-18	-56	0	0	-280 / 142
Assis/SP	87	121	5	-4	0	-22	-18	-29	-1	0	0	63	-74 / 276
GG	64	189	0	-11	0	-20	-32	-47	-18	0	0	35	-129 / 288
GK	57	142	-1	-9	0	-31	-30	-43	-15	0	0	63	-128 / 261
IG	82	127	0	-12	0	-22	-30	-45	-24	-10	0	18	-143 / 227
IK	67	133	0	-13	0	-23	-30	-37	-6	-7	0	8	-118 / 209
Barretos/SP	193	140	104	-17	-20	-39	-75	-85	-46	0	0	85	-282 / 521
GG	196	177	90	-24	-19	-56	-89	-103	-64	-22	0	12	-376 / 475
GK	154	190	115	-18	-24	-53	-87	-96	-73	0	28	74	-351 / 562
IG	203	141	105	-21	0	-52	-67	-92	-67	-32	0	11	-330 / 461
IK	175	207	128	-23	-29	-53	-91	-97	-69	0	0	57	-362 / 566
Casa Branca/SP	119	121	48	-6	-9	-18	-43	-61	-11	0	85	176	-148 / 549
GG	103	143	46	-11	-8	-32	-57	-78	-27	0	60	145	-212 / 497
GK	89	195	53	-7	-12	-31	-55	-75	-43	16	116	158	-223 / 628
IG	118	141	51	-7	0	-26	-39	-67	-40	0	33	137	-178 / 481
IK	111	191	58	-13	-9	-26	-59	-75	-31	0	75	157	-213 / 592
Catanduva/SP	148	113	36	-7	-11	-36	-56	-75	-49	-13	0	6	-247 / 303
GG	102	145	24	-13	-9	-52	-72	-95	-66	-45	0	0	-352 / 271
GK	96	164	19	-8	-11	-47	-68	-88	-76	0	0	73	-298 / 352
IG	120	114	34	-9	0	-28	-62	-85	-69	-54	-10	0	-317 / 268
IK	89	164	32	-18	-17	-51	-74	-89	-69	-21	0	0	-338 / 285
Cordeirópolis/SP	162	86	61	-7	-11	-19	-44	-47	-9	0	19	119	-138 / 447
GG	159	97	59	-10	-11	-24	-52	-56	-26	0	18	108	-178 / 441
GK	149	148	82	-10	-13	-28	-53	-52	-37	0	51	109	-193 / 539
IG	169	82	68	-7	-2	-12	-49	-58	-25	-8	0	91	-160 / 410
IK	161	132	60	-11	-5	-17	-53	-48	-16	0	40	123	-150 / 517
Franca/SP	162	108	56	-7	-17	-42	-64	-58	-24	0	40	131	-212 / 496
GG	143	128	54	-12	-20	-55	-76	-74	-40	0	20	104	-277 / 450
GK	141	170	60	-9	-27	-56	-76	-68	-47	0	57	121	-283 / 548
IG	162	126	59	-8	-9	-42	-75	-73	-54	-9	1	97	-270 / 445
IK	160	190	59	-13	-26	-55	-78	-74	-38	0	3	131	-285 / 542
Frutal/MG	134	32	18	-12	-33	-59	-75	-96	-90	-14	0	2	-379 / 186
GG	34	53	14	-16	-44	-79	-93	-110	-112	-57	-5	0	-516 / 102
GK	90	57	22	-12	-38	-72	-85	-107	-111	0	0	0	-425 / 169
IG	43	45	25	-15	-26	-63	-94	-112	-114	-63	-13	0	-501 / 112
IK	93	66	29	-18	-44	-74	-90	-109	-110	-20	0	0	-464 / 188

Anexo A - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial. Os valores negativos representam o déficit hídrico e valores positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

(continuação)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
Ilha Solteira/SP	138	101	40	-4	0	-30	-41	-58	-27	0	0	49	-160 / 329
GG	61	138	29	-9	2	-21	-65	-82	-66	-47	0	0	-291 / 229
GK	135	121	36	-5	0	-39	-56	-76	-56	0	0	45	-233 / 336
IG	89	115	42	-8	98	-5	-59	-78	-61	-56	-2	0	-270 / 344
IK	144	135	36	-9	-4	-31	-72	-82	-60	-19	0	8	-278 / 323
Itapeva/SP	146	120	48	-5	-4	0	-9	0	41	48	2	84	-17 / 489
GG	147	170	23	-8	-4	0	-7	-1	2	30	8	56	-20 / 436
GK	119	132	17	-3	-2	3	-2	-3	8	80	0	59	-10 / 419
IG	159	114	38	-6	0	59	-6	-8	0	0	0	62	-20 / 432
IK	123	137	28	-6	-2	18	-1	-1	36	26	15	65	-9 / 448
Jaboticabal/SP	180	112	22	-4	-11	-39	-52	-76	-45	0	0	54	-228 / 368
GG	171	144	10	-10	-11	-54	-68	-95	-63	-27	0	0	-327 / 325
GK	123	163	6	-5	-12	-49	-64	-89	-72	0	0	55	-292 / 346
IG	180	113	19	-6	0	-37	-62	-87	-66	-37	0	0	-295 / 312
IK	145	163	17	-14	-19	-56	-70	-91	-66	0	0	15	-315 / 340
Jales/SP	154	113	47	-16	-22	-41	-73	-78	-25	-26	0	0	-282 / 313
GG	55	151	35	-23	-16	-60	-90	-97	-64	-68	-9	0	-428 / 241
GK	118	133	42	-19	-26	-56	-86	-94	-54	-4	0	0	-339 / 293
IG	89	127	49	-22	0	-44	-70	-89	-57	-75	-18	0	-376 / 265
IK	129	148	43	-23	-33	-56	-90	-96	-57	-47	0	0	-402 / 320
Jauú/SP	160	97	57	-8	-6	-19	-40	-52	-20	-8	0	63	-153 / 377
GG	162	126	44	-13	-3	-35	-57	-74	-38	-40	0	2	-261 / 334
GK	116	141	39	-9	-7	-27	-51	-62	-42	0	0	34	-198 / 330
IG	168	97	55	-10	1	-5	-44	-60	-41	-47	0	5	-207 / 326
IK	133	124	35	-13	-5	-23	-55	-60	-29	-29	0	52	-214 / 344
José Bonifácio/SP	162	92	20	-16	-21	-34	-62	-80	-44	0	0	36	-258 / 310
GG	122	156	13	-25	-25	-53	-82	-102	-60	-26	0	0	-373 / 291
GK	137	123	0	-19	-19	-45	-74	-93	-68	0	0	97	-318 / 357
IG	155	109	15	-21	-6	-30	-83	-95	-59	-44	0	0	-338 / 279
IK	105	108	12	-23	-24	-46	-80	-92	-64	-27	0	0	-356 / 226
Lins/SP	52	98	12	-18	-21	-8	-61	-54	-37	-22	0	0	-221 / 163
GG	0	153	5	-27	-24	-30	-81	-83	-54	-47	-3	0	-349 / 158
GK	17	130	-1	-25	-19	-21	-74	-67	-61	-14	-21	0	-303 / 147
IG	30	116	7	-23	-5	0	-91	-56	-47	-59	-16	0	-298 / 153
IK	0	103	4	-25	-24	-16	-78	-60	-57	-49	-17	0	-326 / 107
Machado/MG	182	102	41	-1	-5	-15	-30	-42	-28	0	38	156	-120 / 518
GG	154	126	51	-4	-9	-27	-41	-54	-42	0	33	133	-176 / 497
GK	202	196	66	-1	-10	-27	-43	-60	-45	0	113	170	-186 / 747
IG	176	148	43	0	-2	-10	-37	-54	-54	0	3	126	-157 / 497
IK	243	164	67	-3	-8	-22	-43	-56	-41	0	15	183	-173 / 671

Anexo A - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial. Os valores negativos representam o déficit hídrico e valores positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

(continuação)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
Manduri/SP	140	103	28	-4	0	-9	-7	-20	0	0	0	62	-41 / 333
GG	140	149	4	-8	0	-4	-11	-26	0	0	14	42	-50 / 350
GK	98	149	11	-5	0	-12	-15	-30	0	0	0	58	-62 / 316
IG	152	97	18	-6	36	13	-12	-33	0	0	0	36	-51 / 352
IK	114	131	8	-9	0	-10	-14	-26	0	0	6	51	-59 / 310
Marília/SP	172	123	57	0	-3	-12	-43	-55	-13	-3	0	89	-128 / 441
GG	153	195	50	-4	-7	-31	-68	-85	-30	-28	0	27	-253 / 425
GK	133	144	31	0	-4	-19	-56	-70	-29	0	0	93	-178 / 400
IG	170	143	53	-1	1	-4	-50	-68	-26	-43	0	44	-192 / 410
IK	148	135	41	-3	-7	-22	-61	-67	-21	-25	0	52	-206 / 377
Matão/SP	149	140	28	-4	-19	-29	-49	-67	-18	0	0	0	-184 / 317
GG	81	177	16	-9	-23	-47	-66	-88	-36	-18	-2	0	-289 / 274
GK	99	199	12	-4	-21	-41	-61	-80	-48	0	0	41	-256 / 351
IG	99	142	26	-6	-7	-24	-68	-81	-42	-28	-14	0	-269 / 267
IK	119	199	24	-13	-30	-42	-67	-80	-39	0	0	41	-271 / 383
Mirante do Paranapanema/SP	61	96	4	-5	-2	-12	-30	-39	-4	-5	0	0	-97 / 162
GG	0	132	7	-13	-2	-33	-58	-61	-25	-29	-2	0	-223 / 139
GK	85	107	-1	-9	-7	-23	-46	-61	-11	0	0	70	-158 / 262
IG	20	116	0	-11	0	-3	-43	-46	-17	-46	-12	0	-177 / 136
IK	36	87	0	-11	-11	-21	-46	-58	-15	-26	-7	0	-195 / 123
Mococa/SP	205	117	31	-1	-5	-20	-57	-71	-40	0	6	140	-195 / 499
GG	185	139	28	-5	-5	-33	-71	-88	-56	0	0	94	-259 / 445
GK	168	190	35	-2	-7	-32	-70	-85	-67	0	44	123	-264 / 560
IG	207	137	33	-2	0	-14	-55	-82	-65	-2	0	62	-220 / 439
IK	197	186	39	-7	-5	-29	-72	-87	-59	0	0	115	-260 / 538
Osvaldo Cruz/SP	102	99	21	-9	-19	-34	-61	-72	-15	-36	0	0	-246 / 222
GG	122	166	14	-19	-23	-54	-83	-99	-32	-59	0	0	-368 / 302
GK	47	131	0	-11	-16	-44	-73	-85	-41	-30	-6	0	-305 / 178
IG	61	117	16	-14	-5	-28	-83	-87	-29	-74	0	0	-319 / 195
IK	17	117	14	-16	-23	-46	-80	-81	-36	-62	0	0	-343 / 147
Palmital/SP	137	135	11	-3	0	-8	-15	-30	-3	-3	0	0	-63 / 282
GG	84	208	0	-9	0	-8	-30	-48	-22	-9	0	0	-125 / 291
GK	91	157	-1	-6	0	-21	-27	-44	-18	0	0	0	-117 / 249
IG	98	144	0	-7	9	0	-25	-51	-33	-35	0	0	-151 / 251
IK	72	148	0	-11	0	-10	-27	-38	-9	-22	0	0	-117 / 220
Paranaíba/MS	205	99	45	-6	-9	-37	-63	-84	-61	-12	0	147	-272 / 497
GG	185	139	28	-5	-5	-33	-71	-88	-56	0	0	94	-259 / 445
GK	168	190	35	-2	-7	-32	-70	-85	-67	0	44	123	-264 / 560
IG	207	137	33	-23	0	-24	-54	-81	-58	0	0	62	-240 / 439
IK	197	186	39	-76	-89	-67	-77	-105	-116	0	0	115	-531 / 538
Paulínia/SP	178	113	25	-7	-10	-22	-43	-62	-21	-4	0	89	-169 / 405
GG	175	126	22	-9	-9	-26	-50	-72	-37	-18	0	94	-223 / 417
GK	164	186	42	-9	-12	-31	-51	-71	-47	0	2	96	-221 / 490
IG	185	109	30	-6	-1	-14	-48	-72	-36	-33	0	68	-209 / 392
IK	177	167	23	-10	-3	-20	-52	-68	-28	-3	0	109	-185 / 476

Anexo A - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial. Os valores negativos representam o déficit hídrico e valores positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

(continuação)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
Pedrinhas Paulista/SP	224	117	52	3	37	-1	-9	-23	0	0	57	110	-33 / 601
GG	190	185	38	-1	18	-3	-24	-42	-1	-6	0	82	-77 / 514
GK	179	138	26	5	35	-4	-20	-38	0	0	0	110	-62 / 493
IG	221	125	37	0	80	0	-22	-46	-14	-32	0	71	-115 / 535
IK	197	129	36	-2	26	-3	-20	-31	0	0	36	81	-55 / 505
Pindorama/SP	119	127	12	-6	-12	-27	-58	-69	-34	0	0	81	-206 / 338
GG	119	160	0	-12	-12	-44	-74	-90	-51	-31	0	19	-314 / 299
GK	71	181	0	-8	-14	-39	-71	-82	-62	0	0	78	-277 / 330
IG	124	128	9	-8	0	-31	-56	-77	-55	-40	0	21	-268 / 282
IK	88	181	6	-16	-20	-40	-75	-82	-54	-3	0	46	-290 / 322
Presidente Prudente/SP	142	84	27	-7	-1	-10	-32	-57	-16	0	0	37	-123 / 290
GG	87	153	18	-14	0	-26	-57	-86	-38	-15	0	0	-236 / 258
GK	97	108	1	-6	-4	-17	-45	-73	-37	0	0	51	-181 / 258
IG	117	107	20	-10	6	0	-37	-67	-34	-32	0	0	-179 / 250
IK	104	101	10	-12	-2	-15	-48	-69	-29	-12	0	0	-187 / 214
Rancharia/SP	180	121	53	-6	-11	-35	-60	-76	-51	0	0	142	-239 / 496
GG	122	123	-12	-36	-1	-18	-66	-55	-46	-27	0	0	-261 / 245
GK	101	90	-14	-28	0	0	-36	-48	-37	0	0	0	-163 / 192
IG	134	75	-9	-30	0	0	-31	-50	-41	-42	0	0	-203 / 208
IK	119	95	-12	-31	0	0	-31	-44	-27	-28	0	8	-173 / 221
Ribeirão Preto/SP	180	121	53	-6	-11	-35	-60	-76	-51	0	0	142	-239 / 496
GG	161	143	51	-11	-11	-48	-72	-92	-66	-1	0	94	-303 / 450
GK	146	196	60	-7	-15	-48	-71	-89	-76	0	33	126	-306 / 560
IG	181	141	57	-7	-1	-30	-69	-90	-76	-19	0	78	-292 / 458
IK	172	192	65	-13	-12	-46	-74	-91	-69	0	0	111	-305 / 540
Santa Cruz do Rio Pardo/SP	147	83	3	-3	-5	-20	-29	-36	-4	-15	0	35	-113 / 268
GG	148	124	-2	-12	-7	-28	-42	-45	-23	-30	0	9	-189 / 281
GK	104	123	-1	-7	-7	-32	-41	-45	-27	-10	0	4	-170 / 231
IG	159	77	0	-6	0	-24	-31	-45	-21	-44	0	9	-170 / 245
IK	120	107	-1	-13	-6	-30	-47	-42	-12	-36	0	19	-187 / 246
São Carlos/SP	209	86	24	-8	-8	-33	-41	-63	-47	0	46	162	-201 / 527
GG	212	111	12	-14	-6	-47	-57	-83	-64	0	0	104	-271 / 439
GK	159	125	8	-10	-9	-42	-52	-75	-67	0	43	157	-255 / 492
IG	219	85	21	-11	0	-27	-51	-73	-66	0	0	96	-229 / 421
IK	179	109	5	-14	-8	-41	-57	-74	-59	0	40	141	-253 / 474

Anexo A - Comparação entre as deficiências hídricas e os excedentes hídricos anuais para as localidades estudadas, considerando uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, calculados pelo método de balanço hídrico climatológico normal e sequencial. Os valores negativos representam o déficit hídrico e valores positivos o excedente hídrico (mm mês⁻¹ ou mm ano⁻¹)

(conclusão)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
São José do Rio Preto/SP	173	84	61	-10	-23	-39	-67	-78	-68	-17	0	71	-302 / 388
GG	175	112	48	-16	-24	-57	-82	-98	-85	-50	0	14	-413 / 350
GK	115	129	43	-11	-25	-52	-79	-90	-93	0	0	47	-349 / 334
IG	182	84	60	-12	-5	-34	-82	-92	-88	-60	0	13	-372 / 339
IK	137	130	58	-21	-32	-53	-83	-90	-87	-25	0	41	-392 / 366
São Simão/SP	184	115	14	-7	-14	-30	-46	-68	-39	0	5	95	-205 / 413
GG	151	175	19	-8	-19	-44	-57	-83	-68	0	40	80	-280 / 465
GK	145	173	16	-8	-19	-44	-57	-81	-67	0	37	80	-276 / 451
IG	185	134	15	-8	-4	-25	-59	-82	-67	-22	0	45	-267 / 379
IK	176	184	20	-14	-16	-40	-62	-82	-59	0	0	70	-274 / 449
Três Lagoas/MS	133	84	44	-16	-14	-46	-54	-67	-50	0	0	23	-247 / 285
GG	59	134	51	-25	-16	-64	-79	-86	-70	-6	0	0	-347 / 243
GK	140	98	22	-20	-21	-59	-72	-86	-72	0	0	18	-331 / 277
IG	86	103	41	-23	0	-62	-68	-74	-64	-30	0	0	-321 / 230
IK	99	90	45	-23	-24	-62	-74	-79	-74	0	0	0	-336 / 234
Tupi Paulista/SP	113	67	51	-16	-9	-18	-53	-58	-5	-25	0	0	-183 / 231
GG	62	92	38	-23	-4	-37	-70	-81	-23	-56	0	0	-295 / 192
GK	30	107	33	-18	-8	-31	-66	-69	-38	-5	0	0	-237 / 170
IG	74	66	50	-20	0	-11	-46	-63	-28	-62	-6	0	-236 / 190
IK	48	107	48	-27	-13	-28	-70	-67	-26	-35	0	0	-266 / 203
Uberaba/MG	146	141	73	-2	-14	-47	-60	-83	-58	0	41	171	-264 / 572
GG	128	182	70	-5	-23	-65	-80	-98	-87	-5	0	42	-363 / 422
GK	113	190	80	-1	-16	-57	-70	-94	-82	22	71	146	-320 / 622
IG	123	169	83	-4	-6	-48	-79	-99	-90	-10	0	54	-336 / 429
IK	130	206	91	-6	-24	-63	-76	-97	-80	0	25	162	-345 / 614
Votuporanga/SP	153	140	54	-8	-14	-33	-66	-70	-35	-8	0	29	-236 / 376
GG	68	184	42	-15	-8	-51	-84	-90	-71	-55	0	0	-372 / 294
GK	150	164	49	-10	-17	-47	-79	-86	-63	0	0	15	-303 / 379
IG	93	157	56	-14	0	-14	-65	-82	-65	-63	0	0	-303 / 306
IK	152	177	50	-14	-24	-48	-85	-88	-65	-33	0	0	-358 / 379

Anexo B – Temperatura média mensal e anual para os cenários atual e futuro, em todos os locais de estudo

(continua)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
Adamantina/SP	26,6	26,4	26,0	24,4	21,3	20,4	20,5	22,8	23,7	25,1	25,8	26,8	24,7
GG	28,4	27,9	27,6	26,7	24,0	23,1	23,0	25,6	26,7	27,9	28,2	29,1	27,0
GK	28,8	28,3	27,8	26,7	24,3	22,8	23,6	26,1	27,1	29,3	28,9	29,5	27,4
IG	28,8	28,3	27,8	26,7	24,3	22,8	23,6	26,1	27,1	29,3	28,9	29,5	27,4
IK	26,9	27,1	27,1	27,0	25,4	24,5	24,2	26,2	27,3	27,7	27,6	27,3	26,9
Assis/SP	25,0	24,8	24,6	22,7	19,0	18,1	18,4	20,1	21,0	23,2	23,7	24,4	22,7
GG	26,7	26,1	26,3	24,8	21,3	20,3	20,8	22,6	23,9	25,6	25,8	26,4	24,8
GK	27,3	26,8	26,8	24,8	21,3	20,5	20,5	22,8	24,4	26,0	26,5	26,6	25,2
IG	27,1	26,6	26,6	24,9	21,6	20,2	21,5	23,1	24,5	26,9	26,4	26,8	25,3
IK	27,2	26,9	27,1	24,7	21,4	21,1	21,0	23,1	24,0	26,7	27,4	27,2	25,3
Barretos/SP	26,9	26,9	26,5	25,0	22,0	20,3	21,3	23,0	24,6	26,8	26,3	26,8	25,4
GG	28,5	28,4	28,3	27,1	24,5	22,9	23,6	25,7	27,6	29,6	28,8	29,1	27,7
GK	29,4	28,9	28,8	27,2	24,3	22,6	23,3	25,4	28,1	29,8	29,0	29,0	28,0
IG	29,0	28,8	28,4	27,2	24,8	22,6	24,2	26,2	28,0	31,0	29,5	29,5	28,1
IK	29,3	29,2	29,1	27,0	24,3	23,1	23,8	26,2	28,3	30,6	29,9	29,5	29,3
Casa Branca/SP	24,3	24,2	23,7	22,4	19,2	18,1	18,3	21,0	21,9	23,3	23,3	23,9	22,5
GG	25,7	25,7	25,4	24,4	21,6	20,5	20,6	23,7	25,0	25,9	25,8	26,1	24,8
GK	26,9	26,2	25,9	24,5	21,5	20,5	20,4	23,3	24,8	26,3	26,1	26,2	25,0
IG	26,3	26,1	25,4	24,6	22,0	20,3	21,1	24,2	25,3	27,5	26,5	26,5	25,2
IK	26,7	26,4	26,3	24,4	21,6	20,9	20,7	23,8	25,1	27,0	26,9	26,9	25,3
Catanduva/SP	25,6	25,6	25,5	24,4	21,7	20,7	20,8	22,7	23,6	25,1	25,3	25,4	24,4
GG	27,3	27,1	27,2	26,6	24,2	23,3	23,1	25,4	26,6	27,9	27,8	27,7	26,6
GK	28,2	27,7	27,8	26,7	24,1	23,2	23,0	25,3	27,1	28,3	28,2	27,7	27,1
IG	27,7	27,6	27,3	26,7	24,5	23,0	23,7	25,9	26,9	29,3	28,5	28,2	27,0
IK	27,9	27,8	28,0	26,5	24,1	23,6	23,2	25,8	27,1	28,9	29,0	28,3	27,1
Cordeirópolis/SP	24,4	24,4	23,6	21,9	18,8	18,1	18,1	20,4	21,1	23,0	23,1	23,7	22,2
GG	25,8	25,8	25,2	23,8	21,0	20,0	20,1	22,6	23,8	25,2	25,1	25,7	24,2
GK	26,6	26,3	25,6	23,7	20,9	20,5	20,0	22,6	23,4	25,3	25,5	25,7	24,3
IG	26,3	26,2	25,4	23,9	21,3	20,0	20,7	23,0	24,2	26,3	25,7	26,0	24,6
IK	26,4	26,5	26,0	23,9	21,1	20,9	20,4	23,0	23,5	26,2	26,5	26,5	24,7
Franca/SP	23,9	24,2	23,7	22,5	19,9	18,6	19,1	20,5	22,2	23,7	23,6	23,7	22,7
GG	25,3	25,7	25,4	24,5	22,3	21,1	21,3	23,3	25,3	26,3	26,0	25,9	25,0
GK	26,5	26,2	26,0	24,5	22,1	21,0	21,1	22,8	25,1	26,8	26,2	25,9	25,2
IG	25,8	26,1	25,5	24,7	22,7	20,8	21,9	23,8	25,6	27,9	26,7	26,3	25,3
IK	26,3	26,4	26,3	24,5	22,3	21,3	21,5	23,5	25,5	27,4	27,0	26,5	25,4
Frutal/MG	26,3	26,3	26,5	25,4	22,2	22,3	21,3	23,7	25,7	25,6	26,0	26,3	25,3
GG	28,0	28,0	28,2	27,4	25,0	25,2	23,9	26,7	28,7	28,8	28,8	28,8	27,8
GK	28,9	28,4	28,8	27,6	24,5	24,6	23,4	26,2	29,2	28,7	28,7	28,5	27,9
IG	28,5	28,4	28,1	27,6	25,3	25,0	24,3	27,3	28,9	30,1	29,5	29,2	28,1
IK	28,7	28,6	29,0	27,4	24,5	25,1	23,9	26,9	29,4	29,5	29,5	29,0	28,1
Ilha Solteira/SP	27,3	27,0	27,3	26,1	22,7	22,2	21,8	24,2	25,3	26,8	27,0	27,0	26,1
GG	29,1	28,7	29,1	28,4	25,7	25,1	24,5	27,3	28,5	30,0	29,8	29,5	28,5
GK	29,8	29,0	29,5	28,3	25,0	24,6	23,9	27,1	29,3	29,9	29,7	29,4	28,7
IG	29,6	29,1	29,0	28,4	26,0	25,1	25,0	27,8	28,7	31,4	30,5	29,8	28,8
IK	29,7	29,3	29,9	28,3	25,1	25,2	24,5	27,8	29,3	30,8	30,7	29,9	29,0

Anexo B – Temperatura média mensal e anual para os cenários atual e futuro, em todos os locais de estudo (continuação)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
Itapeva/SP	24,8	24,5	24,2	22,5	19,0	17,7	17,6	20,0	19,9	21,6	22,9	23,9	21,9
GG	26,3	25,8	25,9	24,5	21,2	19,6	19,7	22,2	22,6	23,9	24,9	25,9	24,0
GK	26,8	26,3	26,2	24,4	21,2	20,0	19,5	22,5	22,2	23,5	25,1	25,7	23,9
IG	26,8	26,3	26,1	24,6	21,5	19,5	20,3	22,7	23,1	25,1	25,6	26,2	24,6
IK	26,7	26,5	26,6	24,5	21,2	20,4	20,0	22,6	22,0	24,2	25,9	26,4	24,3
Jaboticabal/SP	25,2	25,3	25,1	23,6	20,5	20,2	20,0	21,7	23,3	24,8	24,8	25,2	23,9
GG	26,9	26,8	26,8	25,8	23,0	22,8	22,4	24,5	26,3	27,6	27,3	27,5	26,2
GK	27,8	27,4	27,4	25,9	22,9	22,7	22,3	24,4	26,8	28,0	27,6	27,5	26,6
IG	27,3	27,2	26,9	25,9	23,3	22,5	23,0	24,9	26,6	29,0	28,0	28,0	26,6
IK	27,5	27,5	27,6	25,7	22,9	23,1	22,5	24,9	26,8	28,6	28,4	28,1	26,6
Jales/SP	26,0	26,2	25,6	24,4	21,8	21,1	21,6	23,7	24,3	25,9	25,6	26,2	24,8
GG	27,8	27,9	27,4	26,6	24,8	24,0	24,3	26,8	27,5	29,1	28,4	28,7	27,3
GK	28,4	28,2	27,8	26,6	24,1	23,5	23,7	26,6	28,3	29,0	28,3	28,6	27,5
IG	28,2	28,3	27,3	26,7	25,1	24,0	24,9	27,3	27,7	30,5	29,1	29,0	27,5
IK	28,4	28,5	28,2	26,6	24,2	24,1	24,3	27,3	28,3	29,9	29,3	29,1	27,8
Jauú/SP	25,1	25,1	24,7	23,0	20,1	19,1	18,7	20,5	21,8	23,7	24,0	24,5	23,0
GG	26,8	26,6	26,5	25,2	22,6	21,7	21,0	23,2	24,8	26,5	26,5	26,8	25,4
GK	27,5	27,2	27,0	25,1	22,4	21,5	20,7	23,0	24,7	26,3	26,7	26,6	25,5
IG	27,2	27,0	26,6	25,3	22,9	21,4	21,6	23,7	25,1	27,9	27,2	27,2	25,8
IK	27,3	27,3	27,3	25,2	22,5	22,0	21,2	23,4	24,7	27,2	27,6	27,3	25,7
José Bonifácio/SP	26,4	26,4	26,1	24,6	21,7	20,6	20,9	23,4	24,3	25,7	25,7	26,2	24,8
GG	28,1	27,9	27,7	26,8	24,4	23,3	23,5	26,3	27,3	28,5	28,1	28,5	27,1
GK	28,6	28,3	28,1	26,6	23,8	22,8	22,9	26,1	27,9	28,7	28,4	28,3	27,3
IG	28,5	28,4	27,9	26,9	24,7	23,0	24,1	26,7	27,7	29,8	28,8	28,9	27,6
IK	28,7	28,7	28,6	26,7	24,2	23,7	23,6	26,8	27,8	29,6	29,5	29,1	27,7
Lins/SP	27,3	26,6	26,7	25,4	21,7	20,2	20,4	22,7	24,1	25,5	26,3	27,3	25,2
GG	29,1	28,1	28,4	27,6	24,5	22,9	23,0	25,5	27,1	28,3	28,7	29,6	27,5
GK	29,5	28,4	28,7	27,4	23,9	22,4	22,4	25,3	27,7	28,5	28,9	29,4	27,7
IG	29,5	28,5	28,5	27,7	24,7	22,6	23,6	26,0	27,5	29,7	29,4	30,0	27,9
IK	29,6	28,9	29,3	27,5	24,2	23,3	23,1	26,1	27,6	29,4	30,0	30,2	28,0
Machado/MG	23,4	23,6	23,3	21,5	18,6	17,5	17,1	18,8	20,7	21,8	22,6	22,8	21,5
GG	24,6	25,2	24,8	23,3	20,8	19,7	19,2	21,4	23,6	24,3	24,7	24,7	23,6
GK	25,7	25,5	25,3	23,2	20,7	19,8	19,0	20,9	23,0	24,6	25,0	24,9	23,7
IG	25,2	25,3	24,8	23,6	21,2	19,6	19,7	21,9	23,9	25,7	25,4	25,0	24,1
IK	25,6	25,7	25,7	23,4	20,8	20,0	19,2	21,3	23,2	25,3	26,1	25,7	24,0
Manduri/SP	24,6	24,6	23,9	22,0	18,6	17,3	17,2	18,6	20,2	22,5	23,5	24,6	22,1
GG	26,2	25,9	25,6	24,1	20,8	19,3	19,3	20,7	22,9	24,8	25,5	26,6	24,2
GK	27,0	26,7	26,2	24,1	20,9	19,7	19,2	21,1	23,1	25,1	26,2	26,7	24,5
IG	26,7	26,5	25,9	24,1	21,2	19,1	19,9	21,2	23,4	26,0	26,2	26,9	24,7
IK	26,8	26,9	26,5	24,2	21,0	20,2	19,7	21,5	23,1	26,0	27,1	27,4	24,8
Marília/SP	25,1	25,0	25,2	23,9	21,2	20,4	20,7	22,7	22,9	24,7	24,3	25,5	23,8
GG	26,9	26,5	26,9	26,2	24,0	23,1	23,2	25,6	25,9	27,5	26,7	27,8	26,1
GK	27,4	27,0	27,4	26,0	23,6	22,8	22,7	25,4	26,2	27,5	27,0	27,7	26,3
IG	27,3	26,9	27,0	26,2	24,2	22,9	23,8	26,0	26,3	28,8	27,4	28,2	26,5
IK	27,3	27,1	27,7	25,9	23,6	23,4	23,2	25,7	25,9	28,2	27,9	28,2	26,4
Matão/SP	25,5	25,7	25,4	23,7	20,9	19,8	20,1	22,0	22,8	24,7	25,1	25,4	23,9
GG	27,1	27,2	27,2	25,8	23,5	22,4	22,4	24,8	25,8	27,5	27,6	27,7	26,2
GK	28,1	27,8	27,8	26,0	23,3	22,2	22,3	24,7	26,4	27,9	27,9	27,7	26,7
IG	27,6	27,7	27,3	25,9	23,8	22,1	23,0	25,2	26,2	28,9	28,3	28,2	26,6
IK	27,8	27,9	27,9	25,7	23,3	22,7	22,5	25,2	26,3	28,5	28,7	28,3	26,7

Anexo B – Temperatura média mensal e anual para os cenários atual e futuro, em todos os locais de estudo (continuação)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
Mirante do Paranapanema/SP	26,3	26,2	26,3	24,8	21,2	20,2	19,5	22,1	22,6	24,1	25,1	26,1	24,3
GG	28,1	27,9	28,1	27,2	24,1	22,9	22,3	25,2	25,9	27,1	27,4	28,4	26,8
GK	28,6	28,2	28,6	27,0	23,5	22,6	21,6	25,1	26,2	26,8	27,8	28,5	26,9
IG	28,6	28,2	28,3	27,3	24,4	22,8	22,9	25,6	26,1	28,4	28,2	28,9	27,2
IK	28,6	28,5	28,9	27,0	23,7	23,2	22,0	25,2	25,8	27,6	28,8	29,0	27,1
Mococa/SP	24,7	24,8	24,7	22,8	20,4	19,5	19,9	21,6	22,7	24,5	24,2	24,7	23,3
GG	26,1	26,3	26,4	24,9	22,8	22,0	22,2	24,3	25,8	27,1	26,7	26,8	25,6
GK	27,3	26,8	26,9	24,9	22,7	21,9	22,0	23,9	25,6	27,5	27,0	26,9	25,8
IG	26,7	26,7	26,4	25,0	23,2	21,7	22,7	24,8	26,1	28,7	27,4	27,3	26,0
IK	27,1	27,0	27,3	24,8	22,8	22,3	22,3	24,4	25,9	28,2	27,8	27,6	26,1
Osvaldo Cruz/SP	27,9	27,1	27,6	26,5	23,1	22,1	22,4	24,5	24,4	26,3	26,8	27,7	25,9
GG	29,6	28,6	29,2	28,7	25,8	24,8	25,0	27,4	27,4	29,1	29,2	30,0	28,3
GK	30,1	29,0	29,6	28,5	25,2	24,4	24,4	27,2	28,0	29,3	29,4	29,8	28,5
IG	30,0	29,1	29,4	28,8	26,1	24,6	25,6	27,8	27,8	30,5	29,9	30,4	28,7
IK	30,2	29,4	30,1	28,6	25,6	25,2	25,1	27,9	28,0	30,2	30,5	30,6	28,9
Palmital/SP	25,4	25,2	25,2	23,3	20,3	18,5	19,4	21,0	22,3	24,4	24,7	25,5	23,6
GG	27,1	26,6	26,9	25,3	22,7	20,7	21,8	23,5	25,2	26,7	26,8	27,5	25,7
GK	27,7	27,3	27,4	25,4	22,7	20,9	21,5	23,7	25,7	27,2	27,5	27,7	26,2
IG	27,5	27,1	27,1	25,4	23,0	20,6	22,5	24,0	25,8	28,0	27,4	27,9	26,2
IK	27,6	27,4	27,6	25,3	22,7	21,5	22,0	24,0	25,3	27,9	28,4	28,3	26,3
Paranaíba/MS	26,1	26,2	26,0	25,0	21,8	21,5	21,1	23,2	25,1	25,7	25,6	25,7	25,0
GG	26,1	26,3	26,4	24,9	22,8	22,0	22,2	24,3	25,8	27,1	26,7	26,8	25,6
GK	27,3	26,8	26,9	24,9	22,7	21,9	22,0	23,9	25,6	27,5	27,0	26,9	25,8
IG	26,7	26,7	26,4	25,0	23,2	21,7	22,7	24,8	26,1	28,7	27,4	27,3	26,0
IK	27,1	27,0	27,3	24,8	22,8	22,3	22,3	24,4	25,9	28,2	27,8	27,6	26,1
Paulínia/SP	25,3	25,3	24,9	23,0	20,0	18,5	18,6	20,1	21,8	23,8	24,0	24,8	23,1
GG	26,7	26,7	26,6	24,9	22,2	20,4	20,6	22,3	24,5	26,0	26,0	26,8	25,1
GK	27,5	27,2	27,0	24,8	22,1	20,8	20,5	22,3	24,2	26,2	26,3	26,8	25,2
IG	27,2	27,2	26,7	25,0	22,5	20,3	21,2	22,7	24,9	27,2	26,6	27,1	25,6
IK	27,4	27,4	27,4	25,0	22,3	21,3	20,9	22,7	24,3	27,0	27,3	27,6	25,6
Pedrinhas Paulista/SP	26,3	26,2	26,0	24,6	20,7	19,4	19,6	21,2	22,5	24,4	25,5	26,3	24,1
GG	28,0	27,5	27,7	26,6	23,1	21,6	22,0	23,6	25,4	26,7	27,5	28,2	26,2
GK	28,6	28,2	28,2	26,7	23,1	21,8	21,7	23,9	25,9	27,2	28,2	28,5	26,7
IG	28,4	28,0	28,0	26,7	23,4	21,5	22,7	24,1	26,0	28,0	28,1	28,6	26,8
IK	28,5	28,3	28,5	26,6	23,1	22,3	22,2	24,2	25,5	27,9	29,1	29,0	26,7
Pindorama/SP	25,0	25,2	24,7	23,4	20,6	19,7	20,0	22,1	23,0	24,6	24,5	24,7	23,6
GG	26,7	26,7	26,5	25,6	23,2	22,3	22,4	24,8	26,0	27,4	27,0	27,0	26,0
GK	27,6	27,3	27,1	25,7	23,0	22,1	22,3	24,7	26,5	27,8	27,3	27,0	26,4
IG	27,1	27,2	26,6	25,7	23,5	22,0	23,0	25,3	26,3	28,8	27,7	27,5	26,4
IK	27,3	27,4	27,2	25,5	23,0	22,6	22,5	25,2	26,5	28,4	28,1	27,6	26,4
Presidente Prudente/SP	26,2	25,9	25,7	24,2	21,4	20,5	20,6	22,3	23,6	25,1	25,2	26,2	24,5
GG	27,9	27,4	27,3	26,5	24,1	23,2	23,2	25,1	26,6	27,9	27,6	28,5	26,7
GK	28,4	28,0	27,9	26,3	23,7	22,9	22,7	25,0	27,0	27,9	27,9	28,4	27,0
IG	28,3	27,9	27,5	26,5	24,4	23,0	23,8	25,6	27,0	29,3	28,3	28,9	27,1
IK	28,3	28,1	28,1	26,2	23,8	23,5	23,2	25,3	26,6	28,6	28,8	29,0	27,0

Anexo B – Temperatura média mensal e anual para os cenários atual e futuro, em todos os locais de estudo (continuação)

Rancharia/SP	26,1	26,2	26,2	24,7	21,3	20,3	20,6	23,1	22,9	25,0	25,6	26,5	24,6
GG	27,7	27,5	27,9	26,7	23,5	22,3	22,7	25,2	25,6	27,3	27,6	28,5	26,6
GK	28,1	28,0	28,3	26,6	23,5	22,7	22,5	25,5	25,2	27,0	27,7	28,3	26,6
IG	28,2	28,0	28,2	26,8	23,8	22,1	23,3	25,7	26,1	28,6	28,2	28,8	27,1
IK	28,1	28,2	28,6	26,7	23,5	23,0	23,0	25,7	25,0	27,6	28,5	29,0	26,9
Ribeirão Preto/SP	24,5	24,9	24,6	23,3	20,5	19,6	19,6	21,6	22,9	24,6	24,4	24,6	23,5
GG	25,9	26,5	26,3	25,3	22,9	22,1	21,9	24,4	26,0	27,2	26,8	26,7	25,7
GK	27,1	27,0	26,8	25,4	22,8	22,0	21,7	24,0	25,8	27,7	27,1	26,8	25,9
IG	26,5	26,8	26,3	25,5	23,3	21,8	22,4	24,9	26,3	28,8	27,5	27,2	26,1
IK	26,9	27,2	27,2	25,3	22,9	22,4	22,0	24,5	26,1	28,4	28,0	27,5	26,2
Santa Cruz do Rio Pardo/SP	24,6	24,7	24,9	23,1	19,0	18,6	18,0	19,9	21,1	23,0	23,3	24,4	22,4
GG	26,2	26,0	26,6	25,1	21,2	20,5	20,1	22,0	23,8	25,3	25,3	26,4	24,5
GK	27,0	26,8	27,2	25,2	21,3	20,9	20,1	22,4	24,0	25,6	26,0	26,6	24,9
IG	26,7	26,6	26,9	25,2	21,6	20,4	20,8	22,5	24,3	26,6	26,0	26,8	25,0
IK	26,8	27,0	27,5	25,2	21,4	21,4	20,6	22,8	24,0	26,5	26,9	27,2	25,2
São Carlos/SP	23,0	23,2	23,1	21,9	18,8	18,3	18,1	20,0	21,4	21,5	22,4	22,4	21,6
GG	24,7	24,7	24,9	24,0	21,3	20,9	20,4	22,8	24,4	24,3	24,9	24,7	23,9
GK	25,4	25,3	25,4	24,0	21,1	20,7	20,1	22,5	24,3	24,1	25,1	24,6	24,0
IG	25,1	25,1	25,0	24,1	21,6	20,6	21,0	23,2	24,7	25,7	25,6	25,2	24,3
IK	25,2	25,4	25,7	24,0	21,2	21,2	20,6	22,9	24,3	25,0	26,0	25,2	24,3
São José do Rio Preto/SP	27,3	27,4	27,0	26,1	22,2	20,7	21,1	23,7	24,9	26,8	26,6	27,0	25,8
GG	29,0	28,9	28,8	28,2	24,7	23,3	23,5	26,5	27,9	29,6	29,1	29,3	28,1
GK	29,9	29,5	29,4	28,4	24,6	23,1	23,4	26,4	28,5	30,0	29,5	29,3	28,6
IG	29,4	29,3	28,9	28,3	25,0	23,0	24,1	26,9	28,3	31,0	29,8	29,8	28,6
IK	29,6	29,6	29,5	28,1	24,6	23,6	23,6	26,9	28,4	30,6	30,3	29,9	28,7
São Simão/SP	24,7	24,8	25,1	23,4	20,4	19,6	19,5	21,6	23,6	24,0	24,3	24,4	23,5
GG	26,1	26,4	26,8	25,4	22,8	22,1	21,7	24,4	26,7	26,6	26,8	26,6	25,7
GK	27,3	26,9	27,4	25,5	22,7	22,0	21,6	24,0	26,5	27,0	27,1	26,7	26,0
IG	26,7	26,7	26,9	25,6	23,2	21,8	22,3	24,9	27,0	28,2	27,5	27,0	26,2
IK	27,1	27,1	27,7	25,4	22,8	22,4	21,8	24,5	26,8	27,7	27,9	27,4	26,2
Três Lagoas/MS	27,5	27,3	27,0	25,3	22,5	22,1	21,6	23,1	25,0	25,9	26,4	26,8	25,5
GG	29,3	29,0	28,7	27,7	25,4	24,9	24,4	26,1	28,2	28,9	28,8	29,1	28,0
GK	29,9	29,3	29,1	27,5	24,7	24,5	23,8	26,1	28,8	29,0	29,2	29,3	28,2
IG	29,8	29,3	28,9	27,8	25,7	24,8	25,0	26,6	28,5	30,2	29,6	29,6	28,4
IK	30,0	29,7	29,6	27,6	25,0	25,2	24,2	26,4	28,3	29,8	30,4	29,9	28,5
Tupi Paulista/SP	27,2	27,1	26,7	25,1	21,6	20,5	20,8	22,9	23,5	26,1	26,5	26,8	25,3
GG	28,9	28,6	28,4	27,2	24,2	23,1	23,1	25,7	26,5	28,9	29,0	29,1	27,5
GK	29,8	29,2	29,0	27,4	24,0	23,0	23,0	25,6	27,1	29,3	29,4	29,1	27,9
IG	29,3	29,1	28,5	27,3	24,5	22,8	23,7	26,1	26,9	30,3	29,7	29,5	27,9
IK	29,5	29,3	29,2	27,1	24,0	23,4	23,2	26,1	27,0	29,9	30,2	29,6	28,0
Uberaba/MG	24,5	24,5	24,6	23,5	20,8	20,6	19,6	22,2	23,7	24,3	24,1	24,1	23,6
GG	26,2	26,1	26,3	25,6	23,6	23,5	22,2	25,2	26,7	27,5	26,9	26,7	25,9
GK	27,0	26,5	26,9	25,7	23,1	22,9	21,7	24,6	27,2	27,4	26,8	26,4	26,1
IG	26,6	26,5	26,2	25,7	23,9	23,3	22,6	25,7	26,9	28,8	27,6	27,0	26,2
IK	26,9	26,8	27,1	25,6	23,1	23,4	22,2	25,4	27,4	28,2	27,6	26,9	26,3

Anexo B – Temperatura média mensal e anual para os cenários atual e futuro, em todos os locais de estudo

(conclusão)

Município/Cenário	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
Votuporanga/SP	26,2	26,0	25,9	24,8	21,6	20,7	21,0	22,8	24,1	25,8	25,7	26,1	24,9
GG	28,0	27,7	27,6	27,0	24,6	23,6	23,7	25,9	27,2	29,1	28,5	28,6	27,4
GK	28,7	28,0	28,0	27,0	23,9	23,0	23,1	25,6	28,1	28,9	28,4	28,5	27,6
IG	28,5	28,1	27,6	27,1	24,9	23,5	24,3	26,4	27,4	30,4	29,2	28,9	27,7
IK	28,6	28,3	28,5	27,0	24,0	23,7	23,7	26,4	28,0	29,8	29,4	29,0	27,9

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(continua)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Adamantina		
Atual	116	130
GGXA	118	131
GKXA	120	134
IGXA	126	136
IKXA	123	132
Assis		
Atual	139	133
GGXA	157	136
GKXA	158	137
IGXA	162	137
IKXA	159	137
Barretos		
Atual	94	119
GGXA	104	123
GKXA	109	123
IGXA	113	123
IKXA	110	124
Casa Branca		
Atual	72	121
GGXA	83	127
GKXA	83	128
IGXA	87	129
IKXA	86	129
Catanduva		
Atual	101	125
GGXA	121	126
GKXA	122	129
IGXA	126	128
IKXA	124	129
Cordeirópolis		
Atual	128	82
GGXA	149	91
GKXA	149	94
IGXA	152	93
IKXA	152	84

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(continuação)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Franca		
Atual	89	125
GGXA	104	129
GKXA	106	131
IGXA	110	130
IKXA	108	131
Frutal		
Atual	82	105
GGXA	89	103
GKXA	98	113
IGXA	97	107
IKXA	99	112
Ilha Solteira		
Atual	102	130
GGXA	113	129
GKXA	117	132
IGXA	119	131
IKXA	117	131
Itapeva		
Atual	99	123
GGXA	115	127
GKXA	115	129
IGXA	117	128
IKXA	117	129
Jaboticabal		
Atual	94	122
GGXA	108	124
GKXA	108	126
IGXA	111	125
IKXA	111	126
Jales		
Atual	71	84
GGXA	76	86
GKXA	80	91
IGXA	82	89
IKXA	81	92

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(continuação)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Jaú		
Atual	134	78
GGXA	152	82
GKXA	158	89
IGXA	160	84
IKXA	161	86
José Bonifácio		
Atual	83	55
GGXA	91	61
GKXA	92	62
IGXA	98	68
IKXA	95	63
Lins		
Atual	88	118
GGXA	100	119
GKXA	101	122
IGXA	105	122
IKXA	103	121
Machado		
Atual	67	118
GGXA	81	124
GKXA	79	126
IGXA	82	125
IKXA	81	127
Manduri		
Atual	95	121
GGXA	111	126
GKXA	111	127
IGXA	114	127
IKXA	113	128
Marília		
Atual	90	129
GGXA	104	130
GKXA	105	133
IGXA	108	132
IKXA	107	133

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(continuação)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Matão		
Atual	126	81
GGXA	142	84
GKXA	148	91
IGXA	152	87
IKXA	150	89
Mirante do Paranapanema		
Atual	101	121
GGXA	113	122
GKXA	114	121
IGXA	115	122
IKXA	116	124
Mococa		
Atual	68	121
GGXA	79	125
GKXA	79	127
IGXA	81	126
IKXA	81	127
Oswaldo Cruz		
Atual	96	125
GGXA	104	126
GKXA	106	127
IGXA	113	127
IKXA	108	127
Palmital		
Atual	127	93
GGXA	146	94
GKXA	147	95
IGXA	150	94
IKXA	149	95
Paranaíba		
Atual	104	127
GGXA	128	130
GKXA	128	132
IGXA	131	131
IKXA	131	132

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(continuação)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Paulínia		
Atual	70	126
GGXA	82	131
GKXA	82	131
IGXA	83	132
IKXA	83	132
Pedrinhas Paulistas		
Atual	146	136
GGXA	162	137
GKXA	163	139
IGXA	167	137
IKXA	166	138
Pindorama		
Atual	91	90
GGXA	103	92
GKXA	106	96
IGXA	109	95
IKXA	107	102
Presidente Prudente		
Atual	118	127
GGXA	133	128
GKXA	134	130
IGXA	136	129
IKXA	136	129
Rancharia		
Atual	94	127
GGXA	108	130
GKXA	109	131
IGXA	111	130
IKXA	111	132
Ribeirão Preto		
Atual	92	123
GGXA	108	124
GKXA	110	126
IGXA	111	125
IKXA	111	126

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(continuação)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Santa Cruz do Rio Pardo		
Atual	93	119
GGXA	99	124
GKXA	104	126
IGXA	107	126
IKXA	104	127
São Carlos		
Atual	118	114
GGXA	136	119
GKXA	142	122
IGXA	145	121
IKXA	144	123
São José do Rio Preto		
Atual	83	66
GGXA	91	71
GKXA	95	73
IGXA	99	74
IKXA	95	75
São Simão		
Atual	148	135
GGXA	171	136
GKXA	172	137
IGXA	176	137
IKXA	175	137
Três Lagoas		
Atual	92	128
GGXA	105	129
GKXA	106	130
IGXA	111	130
IKXA	108	130
Tupi Paulista		
Atual	105	131
GGXA	115	131
GKXA	119	135
IGXA	121	133
IKXA	120	134

Anexo C - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT

(conclusão)

Município/Cenário	Média ponderada de produtividade APSIM (t/ha)	Média ponderada de produtividade DSSAT (t/ha)
Uberaba		
Atual	75	124
GGXA	86	125
GKXA	88	129
IGXA	89	128
IKXA	89	129
Votuporanga		
Atual	114	130
GGXA	128	130
GKXA	134	133
IGXA	137	132
IKXA	134	133

Anexo D - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Adamantina/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
adamantina_p			4	50	88				12	77
adamantina_p_gg			32	52	96				15	77
adamantina_p_gk			32	56	92				12	73
adamantina_p_ig			8	46	81				4	62
adamantina_p_ik			12	48	84				12	65
adamantina_m		8	28	64	92				15	88
adamantina_m_gg			8	44	88				19	88
adamantina_m_gk			24	52	80				15	88
adamantina_m_ig			8	32	72				6	73
adamantina_m_ik			8	44	80				19	88
adamantina_t			27	62	88			13	35	88
adamantina_t_gg		4	27	58	96			12	31	92
adamantina_t_gk		4	23	58	92			12	23	88
adamantina_t_ig			15	46	73			8	15	85
adamantina_t_ik		4	19	58	88			12	23	85

Anexo E - Probabilidade acumulada (%) por nível de produtividade em Assis/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
assis_p				12	42					81
assis_p_gg				4	27					42
assis_p_gk				4	27					35
assis_p_ig				0	23					27
assis_p_ik				4	27				4	100
assis_m				15	50				2	100
assis_m_gg					19				2	100
assis_m_gk				4	19					96
assis_m_ig					12					96
assis_m_ik					15					96
assis_t				19	69				2	100
assis_t_gg				4	31				2	100
assis_t_gk					27					100
assis_t_ig				4	19					100
assis_t_ik					27					100

Anexo F - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Barretos/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
barretos_p		4	46	81	100			4	15	
barretos_p_gg		12	38	73	100				10	
barretos_p_gk		8	23	65	96				8	
barretos_p_ig		8	27	65	100				10	
barretos_p_ik			27	65	96				8	
barretos_m	4	12	52	100					12	
barretos_m_gg			24	76					10	
barretos_m_gk			16	56	100				8	
barretos_m_ig			8	52	92				8	
barretos_m_ik			12	48	96				9	
barretos_t	15	77	100				8	38	92	
barretos_t_gg		35	85				4	15	69	
barretos_t_gk		27	69	100				12	69	
barretos_t_ig		12	50	96			4	19	69	
barretos_t_ik		23	69	100			4	15	65	

Anexo G - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Casa Branca/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
casa_branca_p	16	40	92					4	19	100
casa_branca_p_gg	8	46							15	100
casa_branca_p_gk	8	42							15	98
casa_branca_p_ig	8	42							13	100
casa_branca_p_ik	8	42							12	98
casa_branca_m	24	68						4	35	
casa_branca_m_gg	8	28							12	100
casa_branca_m_gk	12	28	72	92					10	100
casa_branca_m_ig	8	24	60	84					8	96
casa_branca_m_ik	8	24	64	88					10	96
casa_branca_t	48	100						15	44	
casa_branca_t_gg	27	73	100					13	29	
casa_branca_t_gk	23	75	100					12	27	
casa_branca_t_ig	15	69	100					6	21	92
casa_branca_t_ik	19	73	100					4	23	100

Anexo H - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Catanduva/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	< 60 t/ha	< 80 t/ha	< 100 t/ha	< 120 t/ha	< 140 t/ha	< 60 t/ha	< 80 t/ha	< 100 t/ha	< 120 t/ha	< 140 t/ha
catanduva_p		8	23	58	88				13	94
catanduva_p_gg		8	15	38	73				12	93
catanduva_p_gk		4	15	38	69				10	93
catanduva_p_ig		2	15	31	65				4	93
catanduva_p_ik		4	12	35	69				4	93
catanduva_m		15	42	77					10	94
catanduva_m_gg			8	38	73				15	94
catanduva_m_gk			15	33	69				10	94
catanduva_m_ig			8	27	65				8	94
catanduva_m_ik			12	27	69				10	94
catanduva_t		31	88					6	58	98
catanduva_t_gg		4	38	92					25	96
catanduva_t_gk		4	31	81					42	95
catanduva_t_ig			27	81	96				42	96
catanduva_t_ik			27	77					44	95

Anexo I - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Cordeirópolis/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
cordeiropolis_p			4	21	52	6	13	92		
cordeiropolis_p_gg					23		58	99		
cordeiropolis_p_gk					19		8	58		
cordeiropolis_p_ig					19		8	73		
cordeiropolis_p_ik					19		38	96		
cordeiropolis_m			8	38	77	4	13	81		
cordeiropolis_m_gg				10	33		6	69		
cordeiropolis_m_gk			4	12	33			82		
cordeiropolis_m_ig				8	27		6	77		
cordeiropolis_m_ik				8	27		38	96		
cordeiropolis_t			12	62		15	81			
cordeiropolis_t_gg				15	50	4	58	100		
cordeiropolis_t_gk				4	48		38	92		
cordeiropolis_t_ig				4	50		38	96		
cordeiropolis_t_ik					44		35	92		

Anexo J - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Franca/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
franca_p	8	27	50	92						100
franca_p_gg		8	35	77	96					98
franca_p_gk		8	27	73	94					96
franca_p_ig		8	27	73	94					92
franca_p_ik		8	27	73	93					92
franca_m	4	27	77	100						100
franca_m_gg		6	27	77	96					100
franca_m_gk		6	31	77	96					100
franca_m_ig		6	23	69						100
franca_m_ik		6	23	73	94					100
franca_t	12	58	96					23	75	
franca_t_gg		31	73	96			4	35	100	
franca_t_gk		27	69	92				29	100	
franca_t_ig		12	58	85				30	100	
franca_t_ik		27	58	92				29	100	

Anexo K - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Frutal/MG, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
frutal_p		25	63	92			6	14	77	
frutal_p_gg		40	75				6	10	81	
frutal_p_gk		21	50	88			3	6	42	
frutal_p_ig		17	58	92			6	10	62	
frutal_p_ik		17	58	92			5	7	42	
frutal_n		28	76	98			6	15	85	
frutal_m_gg		6	56	92		4	7	33	94	
frutal_m_gk			24	72			4	13	46	
frutal_m_ig			36	88			6	31	88	
frutal_m_ik			28	80			5	13	54	
frutal_t		100				7	31	85		
frutal_t_gg	15	77				5	23	81		
frutal_t_gk	8	58					8	52	99	
frutal_t_ig	6	54	100				13	58	100	
frutal_t_ik	4	54	100				6	45	99	

Anexo L - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Ilha Solteira/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
ilha_solteira_p		8	31	58						90
ilha_solteira_p_gg			23	62					4	90
ilha_solteira_p_gk			12	54	85					89
ilha_solteira_p_ig			12	58	88					89
ilha_solteira_p_ik			12	58	85					88
ilha_solteira_m		4	50	88					4	100
ilha_solteira_m_gg			12	58	92				8	96
ilha_solteira_m_gk			19	54	92					96
ilha_solteira_m_ig			12	38	88				4	93
ilha_solteira_m_ik			15	50	88				4	93
ilha_solteira_t		23	81	100					27	96
ilha_solteira_t_gg		4	42	85	96			4	29	98
ilha_solteira_t_gk			35	85					12	96
ilha_solteira_t_ig			19	81	96				13	97
ilha_solteira_t_ik			31	85	96				15	96

Anexo M - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Itapeva/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
itapeva_p		19	54	90					13	
itapeva_p_gg			19	81					6	
itapeva_p_gk			19	73					4	
itapeva_p_ig			12	77	96				4	
itapeva_p_ik			12	77	96				4	
itapeva_m		19	42	88					42	
itapeva_m_gg			27	65	92				12	
itapeva_m_gk			23	65	92				7	
itapeva_m_ig			23	65	92				10	
itapeva_m_ik			23	65	92				10	
itapeva_t		19	62	100					23	
itapeva_t_gg			29	62	92				8	
itapeva_t_gk			29	62	88					100
itapeva_t_ig			27	62	87					100
itapeva_t_ik			27	58	87					100

Anexo M - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Jaboticabal/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
jaboticabal_p		19	42	88					4	
jaboticabal_p_gg		4	38	85					6	
jaboticabal_p_gk		4	38	85						100
jaboticabal_p_ig			35	85					4	
jaboticabal_p_ik			31	81						100
jaboticabal_m		19	58	92					12	
jaboticabal_m_gg			19	73					11	
jaboticabal_m_gk			19	73					4	
jaboticabal_m_ig		4	15	62	96				7	
jaboticabal_m_ik		4	15	62	96				4	
jaboticabal_t		46	88					18	74	
jaboticabal_t_gg			54	96				10	69	
jaboticabal_t_gk			54	96				4	42	
jaboticabal_t_ig		4	42	88				6	54	
jaboticabal_t_ik		4	35					6	58	

Anexo N - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Jales/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
jales_p		52					25	83	100	
jales_p_gg		48	96				13	81		
jales_p_gk		24	92				4	69	98	
jales_p_ig		28	96				10	73		
jales_p_ik		16	92				4	60	94	
jales_m	15	65					29	85		
jales_m_gg		42	92				23	83		
jales_m_gk	4	38	85				9	75		
jales_m_ig		38	78				13	77		
jales_m_ik	4	35	81				5	73		
jales_t	65	96				15	87			
jales_t_gg	46	92					75	100		
jales_t_gk	38	88					66	96		
jales_t_ig	31	81					70	95		
jales_t_ik	35	88					66	95		

Anexo O - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Jaú/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
jau_p			4		34	6	43	100		
jau_p_gg				10	15	4	35	98		
jau_p_gk			4	6	12		19	88		
jau_p_ig				8	15		33	97		
jau_p_ik			4		12		23	94		
jau_m			8	20	56	4	30			
jau_m_gg				12	16	4	27	100		
jau_m_gk				8	16		12	87		
jau_m_ig				4	12	4	23	92		
jau_m_ik				4			17	88		
jau_t			8	69	85	23	82			
jau_t_gg				19	77	8	63			
jau_t_gk				8	46	6	33	96		
jau_t_ig				8	38	7	58	100		
jau_t_ik				8	38	6	50	100		

Anexo P - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em José Bonifácio/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
jose_bonifacio_p			76		100	64	90			
jose_bonifacio_p_gg				72	96	33	87			
jose_bonifacio_p_gk		4	12	60		35	87			
jose_bonifacio_p_ig			10	36	96	15	81	96		
jose_bonifacio_p_ik				52	96	25	86	100		
jose_bonifacio_m		8	38	92	100	67	94			
jose_bonifacio_m_gg			13	54	96	52	92			
jose_bonifacio_m_gk			13	54	88	46	90	98		
jose_bonifacio_m_ig			4	33	75	30	80	98		
jose_bonifacio_m_ik				50	88	46	91	100		
jose_bonifacio_t	31	90	100			94				
jose_bonifacio_t_gg	15	69	96			88				
jose_bonifacio_t_gk	12	65				87				
jose_bonifacio_t_ig	8	46	88			65	94			
jose_bonifacio_t_ik	12	62	92			88	96			

Anexo Q - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Lins/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8,5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
lins_p		23	73	100				10	27	
lins_p_gg		15	54	88				7	29	
lins_p_gk		10	50	88				6	23	
lins_p_ig		4	50	88				7	21	
lins_p_ik		4	50	92				7	22	
lins_m		36	72					10	35	
lins_m_gg		8	40	88				11	35	
lins_m_gk		4	35	92				7	27	
lins_m_ig			31	77				6	27	
lins_m_ik		4	31	77				7	31	
lins_t		56	96					19	77	
lins_t_gg		23	69					12	73	
lins_t_gk		23	69	96				10	56	
lins_t_ig		12	50	90				6	54	
lins_t_ik		23	65	94				8	53	

Anexo R - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Machado/MG, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8,5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
machado_p	31	62	92						10	
machado_p_gg		35	96						3	
machado_p_gk		35	96						3	
machado_p_ig		35	96						3	
machado_p_ik		31	96						3	
machado_m	31	69							50	
machado_m_gg		50	77	96					10	
machado_m_gk		54	77	100					10	
machado_m_ig		50	69						10	
machado_m_ik		50	69	96					10	
machado_t	38	85					10	46	73	
machado_t_gg	15	58	88					13	60	
machado_t_gk		54	88					4	52	
machado_t_ig	23	58	94					4	56	
machado_t_ik	15	54	88						42	

Anexo S - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Manduri/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
manduri_p		19	50					6	17	
manduri_p_gg		8	31	77	96				11	
manduri_p_gk		8	27	73	96				10	
manduri_p_ig		8	27	77	96				9	
manduri_p_ik		6	27	69	96				10	
manduri_m		19	50	100				4	38	
manduri_m_gg			31	73					15	
manduri_m_gk			31	69					12	
manduri_m_ig			31	58					11	
manduri_m_ik			77	62	100				11	
manduri_t		29	77				4	10	51	
manduri_t_gg		8	35	73				6	18	
manduri_t_gk		8	31	65				5	12	
manduri_t_ig		6	31	69	98			5	17	
manduri_t_ik		6	29	65	100				13	

Anexo T - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Marília/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
marilia_p		15	62	96						95
marilia_p_gg			38	92						94
marilia_p_gk		4	27	96						85
marilia_p_ig			35	85						86
marilia_p_ik			27	88						82
marilia_m		27	69						4	
marilia_m_gg		8	36	77					6	
marilia_m_gk		4	35	79					2	
marilia_m_ig			27	77					2	
marilia_m_ik			29	73					2	
marilia_t		54	88						35	
marilia_t_gg		19	69						12	
marilia_t_gk		12	62	88					10	
marilia_t_ig		8	50	88					12	
marilia_t_ik		4	62	81					6	

Anexo U - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Matão/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
matao_p			4	16	52	4	35	97		
matao_p_gg				15	38		35	91		
matao_p_gk				4	27		7	69		
matao_p_ig				6	27		19	92		
matao_p_ik				4	23		11			
matao_m		8		31	77		27			
matao_m_gg				12	29		18	99		
matao_m_gk				6	23		11	81		
matao_m_ig					15		13	96		
matao_m_ik					19		13	88		
matao_t		31		81	96	12	77			
matao_t_gg		4		35	85	6	66	100		
matao_t_gk		4		23	77		29	94		
matao_t_ig				19	65	4	41	99		
matao_t_ik				23	73	4	36	98		

Anexo V - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Mirante do Paranapanema/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
mirante_do_paranapanema_p		12	46	92				4	28	
mirante_do_paranapanema_p_gg				31	69			4	23	
mirante_do_paranapanema_p_gk				31	69			3	13	
mirante_do_paranapanema_p_ig		12		31	65				4	
mirante_do_paranapanema_p_ik		12		27	62			4	13	
mirante_do_paranapanema_m		12		42	96			8	40	
mirante_do_paranapanema_m_gg				12	62			8	40	
mirante_do_paranapanema_m_gk				8	54			4	31	
mirante_do_paranapanema_m_ig				12	54			4	33	
mirante_do_paranapanema_m_ik				8	46			4	33	
mirante_do_paranapanema_t		8		58				6	58	
mirante_do_paranapanema_t_gg				27	69				60	
mirante_do_paranapanema_t_gk				27	65				42	
mirante_do_paranapanema_t_ig				27	62				48	
mirante_do_paranapanema_t_ik		8		23	58				40	

Anexo X - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Mococa/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
mococa_p	23	42	86						7	
mococa_p_gg		58	92						6	
mococa_p_gk		50	88						5	
mococa_p_ig		58	88						4	
mococa_p_ik		50	85						4	
mococa_m	20	72							6	
mococa_m_gg		31	81						6	
mococa_m_gk		31	81						6	
mococa_m_ig		27	77						6	
mococa_m_ik		27	77						5	
mococa_t	42	85					6	27	75	
mococa_t_gg	15	60	100					12	67	
mococa_t_gk	15	54	100					6	60	
mococa_t_ig	8	54						6	69	
mococa_t_ik	8	54							6	

Anexo W - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Palmital/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
palmital_p				15	65		11	73		
palmital_p_gg				15	31		11	70		
palmital_p_gk				15	31		9	67		
palmital_p_ig				12	35		15	73		
palmital_p_ik				15	35		10	67		
palmital_m			12	31	77		8	81		
palmital_m_gg				8	23		8	77		
palmital_m_gk				6	23		5	73		
palmital_m_ig				6	15		6	73		
palmital_m_ik				4	19		6	75		
palmital_t			23	69	96			82		
palmital_t_gg				23	54			83		
palmital_t_gk				19	50			78		
palmital_t_ig				12	50			83		
palmital_t_ik				15	46			75		

Anexo Y - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Paranaíba/MS, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
paranaiba_p			27	46	65			4	7	100
paranaiba_p_gg			4	23	65					100
paranaiba_p_gk				21	62					100
paranaiba_p_ig				17	65					100
paranaiba_p_ik				19	58					100
paranaiba_m			39	91	100				6	
paranaiba_m_gg			4	23	73				2	
paranaiba_m_gk			4	19	73				2	
paranaiba_m_ig				19	62				2	
paranaiba_m_ik				19	62				2	
paranaiba_t		23	73						42	
paranaiba_t_gg		4	15	77					23	
paranaiba_t_gk			19	77	88				8	
paranaiba_t_ig			13	69	88				12	
paranaiba_t_ik			15	65	88				8	

Anexo Z - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Osvaldo Cruz/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
osvaldo_cruz_p		4	40	80				5	13	97
osvaldo_cruz_p_gg		8	40	72				5	10	100
osvaldo_cruz_p_gk		4	36	68				4	12	100
osvaldo_cruz_p_ig			28	64					8	100
osvaldo_cruz_p_ik		4	36	68					10	96
osvaldo_cruz_m		18	56	94				6	17	
osvaldo_cruz_m_gg		8	36	72				6	19	
osvaldo_cruz_m_gk		8	32	64				6	17	
osvaldo_cruz_m_ig		4	24	56				6	15	
osvaldo_cruz_m_ik		8	32	64				6	15	
osvaldo_cruz_t		50	88						52	
osvaldo_cruz_t_gg		15	73	96					40	
osvaldo_cruz_t_gk		12	69	96					27	
osvaldo_cruz_t_ig		4	54	81					27	
osvaldo_cruz_t_ik		10	65	92					27	

Anexo AA - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Paulínia/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
paulinia_p	31	69							4	100
paulinia_p_gg	8	58	96							100
paulinia_p_gk	12	58	92							99
paulinia_p_ig	8	58								87
paulinia_p_ik	12	50	88							87
paulinia_m	27	73	92						8	
paulinia_m_gg	8	58	69						2	
paulinia_m_gk	8	54	73						2	
paulinia_m_ig		50	65							98
paulinia_m_ik		54	65							98
paulinia_t	35	81						6	60	
paulinia_t_gg	8	58	96						31	
paulinia_t_gk	8	58	92						15	
paulinia_t_ig		58	92						12	
paulinia_t_ik		58	92						12	

Anexo AB - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Pedrinhas Paulista/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
pedrinhas_paulista_p				8	27					58
pedrinhas_paulista_p_gg					12					27
pedrinhas_paulista_p_gk					12					4
pedrinhas_paulista_p_ig					4					31
pedrinhas_paulista_p_ik					6					23
pedrinhas_paulista_m				4	38					100
pedrinhas_paulista_m_gg					13					98
pedrinhas_paulista_m_gk					12					87
pedrinhas_paulista_m_ig					11					96
pedrinhas_paulista_m_ik					8					92
pedrinhas_paulista_t				15	73					91
pedrinhas_paulista_t_gg					15					99
pedrinhas_paulista_t_gk					15					100
pedrinhas_paulista_t_ig					12					100
pedrinhas_paulista_t_ik					13					94

Anexo AC - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Pindorama/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
pindorama_p		20	52	84		13	61			
pindorama_p_gg		17	50	85		13	59			
pindorama_p_gk		12	38	69				35	100	
pindorama_p_ig		10	38	73		6	39			
pindorama_p_ik		12	38	73				28	100	
pindorama_m		15	73	100		8	57			
pindorama_m_gg		10	23	73		10	41			
pindorama_m_gk		12	23	69		4	34		100	
pindorama_m_ig		8	19	73		7	37			
pindorama_m_ik		4	15	65				23	99	
pindorama_t		54	96			13	71	100		
pindorama_t_gg		23	73	100		4	61	98		
pindorama_t_gk		17	58	96			46	98		
pindorama_t_ig		19	54	83			37	98		
pindorama_t_ik		17	62	96			14	83		

Anexo AD - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Presidente Prudente/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
presidente_prudente_p			14	38	90				4	98
presidente_prudente_p_gg			8	27	62				4	96
presidente_prudente_p_gk			4	23	58				2	92
presidente_prudente_p_ig			4	23	58					96
presidente_prudente_p_ik			4	19	58					92
presidente_prudente_m			20	48	84				13	
presidente_prudente_m_gg			4	15	58				12	
presidente_prudente_m_gk				15	54				4	100
presidente_prudente_m_ig				12	46				4	100
presidente_prudente_m_ik				15	46				4	100
presidente_prudente_t			31	77	100				23	
presidente_prudente_t_gg				46	81				25	
presidente_prudente_t_gk				31	81				10	
presidente_prudente_t_ig				23	77				12	
presidente_prudente_t_ik				23	77				13	

Anexo AE - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Rancharia/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
rancharia_p		19	58						8	92
rancharia_p_gg		4	19	96					4	88
rancharia_p_gk		4	23	92						88
rancharia_p_ig			19	96					4	92
rancharia_p_ik			19	92						81
rancharia_m		19	65	96					12	
rancharia_m_gg			31	77					10	
rancharia_m_gk			27	81					10	
rancharia_m_ig			15	81					10	100
rancharia_m_ik			19	69					8	100
rancharia_t		31	81					4	46	
rancharia_t_gg		12	42	92					27	
rancharia_t_gk		8	35	92					23	
rancharia_t_ig		4	31	88					19	
rancharia_t_ik		8	31	88					6	

Anexo AF - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Ribeirão Preto/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
ribeirao_preto_p	4	19	42	88	88				4	100
ribeirao_preto_p_gg		4	35	77	96				4	100
ribeirao_preto_p_gk			27	77	92				4	100
ribeirao_preto_p_ig			35	77	81				4	100
ribeirao_preto_p_ik			31	73	84				4	100
ribeirao_preto_m		33	73		92				8	
ribeirao_preto_m_gg		8	31	69	88				12	
ribeirao_preto_m_gk			27	69	80				8	
ribeirao_preto_m_ig			23	62	72				8	
ribeirao_preto_m_ik			23	62	80				4	
ribeirao_preto_t		50	81		88		4	19	69	
ribeirao_preto_t_gg		15	50	88	96			15	65	
ribeirao_preto_t_gk		12	46	85	92			12	54	
ribeirao_preto_t_ig		15	50	85	73			12	54	
ribeirao_preto_t_ik		8	42	85	88			8	54	

Anexo AG - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Santa Cruz do Rio Pardo/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
santa_cruz_do_rio_pardo_p		19	65	96				8	15	100
santa_cruz_do_rio_pardo_p_gg		8	50	92				6	14	96
santa_cruz_do_rio_pardo_p_gk			24	84				4	12	92
santa_cruz_do_rio_pardo_p_ig			27	88				4	13	96
santa_cruz_do_rio_pardo_p_ik			44	84				4	12	90
santa_cruz_do_rio_pardo_m			58	98				8	27	
santa_cruz_do_rio_pardo_m_gg		8	36	80				8	15	100
santa_cruz_do_rio_pardo_m_gk			24	76				4	15	100
santa_cruz_do_rio_pardo_m_ig		4	24	68				4	14	
santa_cruz_do_rio_pardo_m_ik			24	76				4	12	100
santa_cruz_do_rio_pardo_t		38	81	98				23	77	
santa_cruz_do_rio_pardo_t_gg		38	96					12	58	100
santa_cruz_do_rio_pardo_t_gk		23	85					4	38	100
santa_cruz_do_rio_pardo_t_ig		17	69					8	54	100
santa_cruz_do_rio_pardo_t_ik		23	85					4	35	100

Anexo AH - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em São Carlos/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
sao_carlos_p			12	31					19	
sao_carlos_p_gg				19					17	
sao_carlos_p_gk				12					8	
sao_carlos_p_ig				8					15	
sao_carlos_p_ik				12					8	
sao_carlos_m			28	52					62	
sao_carlos_m_gg				16					27	
sao_carlos_m_gk				8					8	
sao_carlos_m_ig				4					12	
sao_carlos_m_ik				8					10	
sao_carlos_t		4	42	85			12	69	98	
sao_carlos_t_gg			23	69			4	38	81	
sao_carlos_t_gk			15	54			2	12	77	
sao_carlos_t_ig			8	42			2	19	79	
sao_carlos_t_ik			8	46				12	77	

Anexo AI - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em São José do Rio Preto/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
sao_jose_do_rio_preto_p		8	73			19	92			
sao_jose_do_rio_preto_p_gg		8	77			12	69	100		
sao_jose_do_rio_preto_p_gk		8	54			8	54	100		
sao_jose_do_rio_preto_p_ig		6	50	100		8	54	100		
sao_jose_do_rio_preto_p_ik		8	50	100		8	52	98		
sao_jose_do_rio_preto_m		28	84			21	85	100		
sao_jose_do_rio_preto_m_gg		16	52	100		15	65	98		
sao_jose_do_rio_preto_m_gk		4	36	92		8	54	98		
sao_jose_do_rio_preto_m_ig		4	24	80		8	54	98		
sao_jose_do_rio_preto_m_ik		4	36	92		6	52	98		
sao_jose_do_rio_preto_t		96				85				
sao_jose_do_rio_preto_t_gg		73	100			50	100			
sao_jose_do_rio_preto_t_gk		50	100			46	98			
sao_jose_do_rio_preto_t_ig		31	96			35	100			
sao_jose_do_rio_preto_t_ik		54	100			31	98			

Anexo AJ - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em São Simão/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
sao_simao_p					27					69
sao_simao_p_gg				4	8					46
sao_simao_p_gk					4					31
sao_simao_p_ig					8					19
sao_simao_p_ik					4					14
sao_simao_m				15	38					100
sao_simao_m_gg					10					100
sao_simao_m_gk					6					100
sao_simao_m_ig					4					100
sao_simao_m_ik					4					100
sao_simao_t					54					88
sao_simao_t_gg					12					100
sao_simao_t_gk					8					100
sao_simao_t_ig					8					100
sao_simao_t_ik					4					100

Anexo AK - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Três Lagoas/MS, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
tres_lagoas_p		8	42	81	100				7	100
tres_lagoas_p_gg		8	42	69					8	100
tres_lagoas_p_gk		4	42	69					7	100
tres_lagoas_p_ig		8	35	62					4	100
tres_lagoas_p_ik		4	42	65					7	98
tres_lagoas_m		29	67	100					7	
tres_lagoas_m_gg		8	21	75					7	
tres_lagoas_m_gk			25	71					6	
tres_lagoas_m_ig			17	63					7	
tres_lagoas_m_ik			21	63					7	
tres_lagoas_t		58	96						25	
tres_lagoas_t_gg		21	73						13	
tres_lagoas_t_gk		23	73						13	
tres_lagoas_t_ig		13	46	92					12	
tres_lagoas_t_ik		19	54						12	

Anexo AL - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Tupi Paulista/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8.5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
tupi_paulista_p		8	23	85				4	11	79
tupi_paulista_p_gg			23	69					10	85
tupi_paulista_p_gk			15	58					9	55
tupi_paulista_p_ig			14	62					6	69
tupi_paulista_p_ik			15	54					8	73
tupi_paulista_m		4	32	72				4	11	
tupi_paulista_m_gg		4	23	50				4	11	99
tupi_paulista_m_gk			15	42					10	82
tupi_paulista_m_ig			12	38					10	92
tupi_paulista_m_ik			12	31				4	9	88
tupi_paulista_t			58	100				6	16	95
tupi_paulista_t_gg		8	35	77				6	8	100
tupi_paulista_t_gk		4	25	65					7	95
tupi_paulista_t_ig			27	54					7	98
tupi_paulista_t_ik		4	23	65				4	7	95

Anexo AM - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Uberaba/MG, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (ik) RCP 8,5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
uberaba_p	15	46	81						10	
uberaba_p_gg		35	85						10	
uberaba_p_gk		31	81						4	
uberaba_p_ig		31	85						6	100
uberaba_p_ik		19	88						6	
uberaba_m		69	96						10	
uberaba_m_gg		38	73	96					10	
uberaba_m_gk		35	77	90					9	
uberaba_m_ig		31	73	88					10	
uberaba_m_ik		35	73	88					9	
uberaba_t		85					6	15	77	
uberaba_t_gg		50						12	67	
uberaba_t_gk		50	92					6	48	
uberaba_t_ig		42	92					6	48	
uberaba_t_ik		54	88					6	39	

Anexo AN - Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade em Votuporanga/SP, para diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar e cenários climáticos nos modelos APSIM e DSSAT. Sendo representado pelas siglas: (p) precoce; (m) médio; (t) tardio; (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (ik) RCP 8,5 e GCM HadGEM2-ES

	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha	≤ 60 t/ha	≤ 80 t/ha	≤ 100 t/ha	≤ 120 t/ha	≤ 140 t/ha
votuporanga_p			12	31	69					99
votuporanga_p_gg			8	38	65					100
votuporanga_p_gk			4	19	54					85
votuporanga_p_ig			4	19	50					91
votuporanga_p_ik			4	27	54					90
votuporanga_m		4	30	72						100
votuporanga_m_gg			4	23	69					100
votuporanga_m_gk			2	15	50					100
votuporanga_m_ig				15	38					100
votuporanga_m_ik				15	58					100
votuporanga_t		8	58						19	100
votuporanga_t_gg			19	58					11	100
votuporanga_t_gk			15	46	96				4	100
votuporanga_t_ig			4	35	85				4	100
votuporanga_t_ik			4	46	96				4	100