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

Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos

Fábio Ricardo Marin

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para o Concurso de Livre-Docência junto ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, área de Agrometeorologia.

Piracicaba
2014

Fábio Ricardo Marin
Engenheiro Agrônomo

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para o Concurso de Livre-Docência junto ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, área de Agrometeorologia.

Piracicaba – SP
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Marin, Fábio Ricardo
Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos / Fábio Ricardo Marin. - - Piracicaba, 2014.
262 p.

Livre-Docência - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.
Bibliografia.

1. Simulação estocástica 2. Incerteza 3. Mudanças climáticas 4. Monte Carlo Calibração I. Título

CDD 633.61
M337e

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

Aos meus amores Michelle, André, Pedro e Alice,

dedico.

AGRADECIMENTOS

A Michelle, pelo apoio incondicional, pela paciência e compreensão quase infinitas e por seu amor que nutre minha alma. Sem ela, não teria sido possível.

Ao Prof. Luiz Roberto Angelocci pela revisão e sugestões feitas a este trabalho. Agradeço também pelas dedicadas orientações na graduação, mestrado e doutorado, bem como pelo constante apoio em todos os momentos.

Ao Prof. Marcos Vinicius Folegatti pelo apoio na fase de transição para a ESALQ e pelo incentivo à realização desta etapa.

Ao funcionário Luiz Fernando Novello pelo constante suporte e disposição para o trabalho, assim como pelo apoio na preparação deste documento.

Ao Prof. Quirijn de Jong van Lier pelas oportunidades de cooperação científica e acadêmica e pelas valiosas contribuições feitas a este documento.

Ao Prof. Felipe Gustavo Pilau pela revisão do texto e sugestões.

Aos meus orientadores Prof. Paulo Cesar Sentelhas, Dr. Ângelo Paes de Camargo, Prof. Durval Dourado Neto e Prof. James W. Jones, pelo tempo e ensinamentos dispensados, assim como pelas oportunidades que nos permitiram atingir esta etapa.

Aos estudantes Daniel S. P. Nassif, Leandro G. Costa, Helena Maria S. Pinto, Felipe A. Soares, Murilo Vianna, Gabriel Blair, Rodolfo Pilar, Mariane Romero e Lucas Putti pela confiança, suporte e apoio na coleta, processamento e simulação dos dados utilizados neste trabalho.

A Embrapa, pela oportunidade de trabalho e crescimento ao longo de 11 anos.

“Siempre estoy haciendo cosas que no puedo hacer, así es como logro hacerlas.”

Pablo Picasso

Sumário

RESUMO 9
ABSTRACT 10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES 11
LISTA DE TABELAS 14
1 INTRODUÇÃO 16
2 OBJETIVOS 18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
3.1 A cultura da cana-de-açúcar: da origem ao Brasil 19
3.2 A cultura da cana-de-açúcar: breve descrição morfofisiológica 28
3.2.1 Fenologia 28
3.3 Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar 44
3.4 Cenários de expansão da cana-de-açúcar no Brasil à luz da ciência climática e fisiológica 51
3.5 Mudanças tecnológicas no sistema de produção 52
3.6 Eficiência da produção agrícola 55
3.7 Modelagem e simulação baseados em processos biofísicos da cultura da cana-de-açúcar 59
3.7.1. Conceitos e definições 59
3.7.2 Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia - DSSAT 65
3.7.3 Simulador de sistemas produtivos agrícolas – APSIM 67
3.7.4 Modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar 71
3.8 Extrapolação espacial das simulações com modelos de crescimento de plantas 84
4 MATERIAL E MÉTODOS 88
4.1 Análise e calibração dos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar para a cana-de-açúcar brasileira 88
4.2 Dados de campo utilizados para a calibração dos modelos 88
4.3 Simulação das produtividades potencial e atingível da cana-de-açúcar 92
4.4 Geração dos Cenários Climáticos Futuros 97
4.5 Descrição dos dados de produtividade real 100
4.6 Modelos de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar 100
4.7 Desenvolvimento de um modelo estocástico para cana-de-açúcar 101
4.7.2 Simulação dos componentes da cultura 103
4.7.2 Simulação dos componentes do solo 114
4.7.3 Estimação de parâmetros e avaliação do modelo 119
4.7.4 Matriz de correlação e correlação entre variáveis aleatórias 121
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 126
5.1 Desempenho do modelo SAMUCA 126
5.1.1 Simulação de área foliar e perfilhamento 126

5.1.2 Desempenho do Modelo SAMUCA: Simulação da massa de colmo e sacarose 131
5.1.3 Simulação estocástica, incerteza dos parâmetros e variabilidade das simulações..... 134

5.2 Análise e calibração dos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar para a cana-de-açúcar brasileira 137
5.2.1 Intercomparação de modelos simulando o crescimento e o desenvolvimento de uma variedade padrão 137
5.2.2 Intercomparação de modelos após a calibração para uma importante variedade brasileira 143

5.3. Simulação multimodelos de crescimento e desenvolvimento da variedade RB867515..... 150

5.4 Cenários agrícolas futuros com base em simulações multimodelos..... 154

5.5 Eficiência da produção da cana-de-açúcar brasileira com base em simulação multimodelos..... 165

5.6 Incertezas e Limitações 172

6 CONCLUSÕES..... 174

REFERÊNCIAS 176

ANEXO A – Caracterização climática resumida da séries históricas referente à linha de base – Cenário Atual 200

ANEXO B – Caracterização dos cenários climáticos futuros de nove locais no brasil com DADOS gerados POR três modelos de circulação globaL para o cenário de emissões A2..... 209

ANEXO C – Caracterização dos cenários climáticos futuros de nove locais no brasil com DADOS gerados POR três modelos de circulação globaL para o cenário de emissões B1..... 236

RESUMO

EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR BRASILEIRA: ESTADO ATUAL E CENÁRIOS FUTUROS BASEADOS EM SIMULAÇÕES MULTIMODELOS

Até 2050, a população mundial aumentará em aproximadamente 30%. Essas projeções implicam na necessidade de elevar a produção agrícola, o que representa um grande desafio tanto para a sustentabilidade do planeta. A identificação das regiões com os maiores potenciais de incremento da produtividade pode ser feita com base na eficiência produtiva. Sabe-se que as projeções acerca do clima futuro e seu impacto na agricultura contêm uma série de incertezas. Na agricultura, uma das ferramentas cientificamente aceitas para a análise de impactos das mudanças climáticas na agricultura é o uso de modelos de crescimento de plantas baseados em processos fisiológicos e físicos. Estudos recentes indicam que o uso de pelo menos três modelos em paralelo pode reduzir a incerteza da simulação. Há vários modelos disponíveis para cana-de-açúcar, mas apenas dois estão efetivamente disponíveis para usuários finais. Este trabalho apresenta um novo modelo estocástico para cana-de-açúcar, baseado no método de Monte Carlo com variáveis aleatórias correlacionadas e contando com um módulo de calibração assistida pelo método GLUE. Este modelo foi utilizado em conjunto com os modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO. Os três modelos mostraram-se capazes de simular a fenologia, índice de área foliar e massa fresca de colmos para nove conjuntos de dados coletados em diferentes regiões do Brasil. O novo modelo SAMUCA, mostrou-se capaz de quantificar a incerteza associada aos parâmetros genéticos ou às variáveis de entrada associadas ao clima ou ao solo. As simulações de massa fresca de colmos geradas pelos três modelos para os cenários climáticos de 2050 permitem inferir que é mais provável que a cultura seja levemente beneficiada pelas condições climáticas futuras. No entanto o modelo APSIM-Sugar, o único a incluir processos relativos à decomposição da palha e ao ciclo do nitrogênio no solo e na planta, indicou perda produtividade para praticamente todos os locais e cenários climáticos futuros avaliados. Este aspecto conduz à questão de que a adaptação da cultura ao clima futuro precisa levar em conta o manejo nutricional e, em especial o ciclo do nitrogênio. A eficiência da produção de cana-de-açúcar Brasileira é atualmente de 44%, correspondendo a um *yield-gap* explorável médio nacional de 41 t ha^{-1}.

Palavras-chave: simulação estocástica, incerteza, mudanças climáticas, Monte Carlo, calibração

ABSTRACT

BRAZILIAN SUGARCANE YIELD-GAP: CURRENT STATUS AND FUTURE SCENARIOS BASED ON MULTIMODEL SIMULATIONS

By 2050, world population will increase by approximately 30%. These projections imply the need to increase agricultural production, which represents a great challenge for the Earth´s sustainability. By identifying the best regions for increasing yield and crop efficiency can be done through yield-gap analysis. It is well known the future climate projections and their impacts on agriculture contain a number of uncertainties. In agriculture, process-based crop modeling is now scientifically accepted as tools for generating scenarios based on future climate projections. Recent studies found lower uncertainties in simulations using three or more crop models in parallel. There are several sugarcane models described in the literature, but only two are actually available to end users. This paper presents a new stochastic crop model for sugarcane, using Monte Carlo method with correlated random variables, and automatic-calibration based on GLUE method. This model was used in conjunction with APSIM-Sugar and DSSAT/CANEGRO, and the three were capable of simulating the phenology, leaf area index and stalk fresh mass for nine sets of experimental data collected around Brazil. The SAMUCA model was capable to quantify the uncertainty associated with the genetic parameters and would be able to do so for input variables such as climate or soil. Simulations of stalk fresh mass generated by the three models for future climate scenarios revealed it is likely that sugarcane yield will slightly increase in the future due the climate conditions. However the APSIM-Sugar model, the only one simulating trash blanket decomposition and nitrogen cycle simulated yields decreasing for most of the locations and scenarios evaluated. This, in turn, leads to the question that crop adaptation studies might deal with nutritional management and, in particular, the nitrogen cycle. The Brazilian sugarcane production efficiency is currently around 44%, corresponding to an exploitable yield-gap of 41 t ha^{-1}.

Keywords: stochastic simulation, uncertainty, climate change, Monte Carlo, calibration

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Origem, migração e centros de diversidade genética das cana-de-açúcar classificadas como nobres. Θ Provável sítio de origem da *Saccharum officinarum*, através da hibridização natural da *S. robustum*, entre 8000 e 15000 anos a.C. * Centros de diversidade que se desenvolveram ao longo da trajetória de migração. A porção sombreada indica a faixa aproximada que formava a área contínua de terra ligando os continentes asiático e australiano. Fonte: Alexander (1973). 20

Figura 2 - Árvore genealógica da variedade Havaiana H 49-5. Genitores masculinos aparecem acima e femininos abaixo. Linhas pontilhadas significam áreas de incerteza. Fonte: Alexander (1973) 22

Figura 3 - Distribuição espacial das usinas sucroalcooleiras e de biodiesel no Brasil no ano de 2010. 23

Figura 4 - Distribuição espacial das áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região Centro-Sul - safra 2008/2009. Fonte: Silva et al., 2009..... 26

Figura 5 - Áreas aptas ao cultiva da cana-de-açúcar no Brasil de acordo com o Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar. (Fonte: Manzatto et al., 2009)..... 28

Figura 6 - Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar. Modificado de Doorembos & Kassan (1979) e Gasho & Shih (1983)..... 29

Figura 7 - Representação esquemática das fases do perfilhamento da cana-de-açúcar. Adaptado de Bezuidenhout et. al. (2003). 30

Figura 8 - Representação de um planta jovem de cana-de-açúcar mostrando dois tipos de raízes: conjunto de raízes originárias dos primórdios radiculares presentes no colmo utilizado como semente, e raízes originárias dos primórdios radiculares presentes nas brotações primárias e secundárias. Adaptado de van Dillewijn (1952) 31

Figura 9 - Taxa de respiração de manutenção, em relação à temperatura, de folhas e ramos inteiros de sorgo (dados de McCree, 1983, 1988) e dependência térmica da taxa de respiração no escuro de folhas, ponteiros e colmo de cana-de-açúcar (dados de Glover, 1973). Adaptado de Allison et al., 2007 35

Figura 10 - Relação entre número de noites com temperatura abaixo de 18ºC no período indutivo e intensidade do florescimento (em porcentagem)..... 39

Figura 11 - Representação esquemática da concentração de glucose e sacarose em colmos de cana-de-açúcar com o avanço da idade e a posição dos entrenós. Sacarose está representada em linhas sólidas. No eixo das abscissas, a esquerda representa a base da planta. No eixo das ordenadas, a idade é crescente de baixo para cima. Adaptado de Alexander (1973). 42

Figura 12 - Relação entre umidade e teor de fibras no colmo para vários membros do gênero *Saccharum*. Adaptado de Bull & Glasziou (1963) por Alexander (1973) 44

Figura 13 - Variação relativa da taxa fotossintética em função da concentração de CO2 atmosférico, como considerado no modelo DSSAT/CERES-Maize (e também no modelo DSSAT/CANEGRO) (cículos azuis) e medidas realizada em variedades de cana-de-açúcar em condições de campo (círculos vermelhos) por Marchiori (2010)..... 47

Figura 14 - Diferentes níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes (a). Produtividade potencial (Yp) de culturas sem limitação hídrica (Yw para culturas de sequeiro) e seus respectivos fatores determinantes é determinada pela radiação solar, regime térmico e duração do ciclo de cultivo. O yield-gap representa a diferença entre a produtividade explorável (70% a 80% de Yp ou Yw) e a produtividade real (Ya). Adaptado de van Ittersun et al. (2013) 58

Figura 15 - Representação esquemática da relação entre modelagem empírica e mecanística (Adaptado de THORNLEY e JOHNSON, 2000) 60

Figura 16 - 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).66

Figura 17 - Representação esquemática dos componentes e modo de operação do sistema APSIM. Fonte: Keating *et al*., (2003)..... 69

Figura 18 - Representação esquemática do modelo DSSAT/CANEGRO, ilustrando inserção dentro do sistema DSSAT (adaptado de SINGELS et al., 2008). 73

Figura 19 - Descrição do modulo Sugar do APSIM. Fonte: Adaptado de APSIM-SUGAR Wiki, 2012 81

Figura 20 - Mapeamento global das zonas climáticas homogêneas, com base na soma térmica acumulada, índice de aridez e sazonalidade. Áreas de mesma cor indicam condições no meio físico homogêneas. Adaptado de van Wart et al. (2013)..... 85

Figura 21 - Localização dos experimentos de campo usando a variedade RB867515, utilizados para calibração dos modelos de simulação APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO e SAMUCA 89

Figura 22 - Localização dos pontos de simulação com os modelos DSSAT/CANEGRO, APSIM-Sugar e SAMUCA. 94

Figura 23 - Distribuição espacial dos pontos de simulação selecionados e distribuição das zonas climáticas homogêneas segundo van Wart et al. (2013). 95

Figura 24 – Representação esquemática dos cenários climáticos futuros utilizados para a simulação com os três modelos de cana-de-açúcar. A2 e B1 representam cenários de emissões. E, I e P representam os cenários climáticos futuros gerados com os modelos GFdl 2.o, Ipsl cm4 e Ukmo Hadcm3, respectivamente..... 98

Figura 25 - Representação esquemática do algoritmo de perfilhamento da cultura utilizado no modelo SAMUCA. 106

Figura 26 - a) taxa de produção de folhas em função da temperatura; e b) tamanho da folha em função do número de ordem da folha, medido na variedade SP83-2847. 107

Figura 27 - Representação esquemática do algoritmo de desenvolvimento foliar utilizado no modelo de Marin e Jones (2014), em que LN é a área foliar e MLA é a área média de cada folha..... 107

Figura 28 - Variação temporal da massa da massa seca e partição entre folhas, colmos e raízes de uma cultura de cana-planta instalada em Piracicaba, SP com a variedade SP83-2847. Fonte: Marin et al. (2011). 112

Figura 29 - Variação do Brix entre internódios (representados pelos pontos) e dentro de cada internódio, decrescendo com a idade do internódio (da esquerda para direita). Adaptado de van Dillewijn (1952) e Alexander (1973) 113

Figura 30 - Resultado do algoritmo de Acklam (2014) para a geração de números aleatórios independentes com distribuição normal 122

Figura 31 – Valores observados simulados de modo determinístico de população de plantas (plantas m^{-2}) para nove experimento com a variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18. Linhas representam a simulação e os pontos as observações de campo. 128

Figura 32 – Valores observados (pontos) e simulados (linhas) de modo determinístico de índice de área foliar (LAI) para nove experimentos com a variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18 130

Figura 33 – Valores simulados (linhas) de modo determinístico com o modelo SAMUCA e observados experimentalmente (pontos) de massa fresca do colmo para a variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18 132

Figura 34 – Valores simulados (linhas) de modo determinístico pelo modelo SAMUCA e observados experimentalmente (pontos) de teor de sacarose no caldo da variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18 133

Figura 35 – Comparação entre valores simulados com o modelo SAMUCA e medidos experimentalmente de (A) Massa Fresca de Colmos, (B) teor de sacarose no caldo (POL, %), (C) Índice de área foliar (LAI), e D) população de plantas 134

Figura 36 - Simulação estocástica da massa de colmos, para 3000 realizações do modelo SAMUCA assumindo parâmetros com distribuição normal, média igual aos valores dos parâmetros otimizados da Tabela 18 e coeficiente de variação de 30% em relação a média das observações. A área hachurada representa o valor do desvio padrão em relação à média 136

Figura 37 - Massa seca de colmos (t/ha) simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e APSIM-Sugar (linha pontilhada) usando os parâmetros da variedade NCo376 para diferentes ambientes do Brasil. Os triângulos vermelhos são os dados experimentais referentes a variedade RB867515 observados em cada um dos ambientes..... 139

Figura 38 - Índice de área foliar simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e pelo modelo APSIM-Sugar (linha pontilhada) utilizando os parâmetros da variedade NCo376 para diferentes ambientes no Brasil. Os triângulos vermelhos são os dados experimentais referentes a variedade RB867515 observados em cada um dos ambientes. LAI é o índice de área foliar. 140

Figura 39 - Representação esquemática dos algoritmos de perfilhamento e área foliar do modelo DSSAT/CANEGRO para as variedades NCo376 (a) e RB867515 (b). 143

Figura 40 - Representação esquemática dos algoritmos de perfilhamento e área foliar do modelo APSIM-Sugar para as variedades NCo376 (a) e RB867515 (b). 143

Figura 41 - Massa fresca de colmos (MFC, t ha^{-1}) simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e APSIM-Sugar (linha pontilhada) após a calibração com dados da variedade RB86-7515 cultivada em diferentes ambientes no Brasil. Os triângulos vermelhos são dados experimentais da variedade RB867515 observada em cada sítio e DAP é dias após o plantio..... 147

Figura 42 - Índice de área foliar (LAI) simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e APSIM-Sugar (linha pontilhada) após a calibração com dados da variedade RB86-7515 cultivada em diferentes ambientes no Brasil. Os triângulos vermelhos são dados experimentais da variedade RB867515 observados em cada sítio e DAP é dias após o plantio 148

Figura 43 – Massa fresca de colmo (MFC, A) e índice de área foliar (LAI, B) simulados e observados em 8 experimentos com a variedade RB86-7515 utilizando os modelos DSSAT/CANEGRO, APSIM-Sugar e SAMUCA, e a média multimodelos 152

Figura 44 - Variação espacial da produtividade real de cana-de-açúcar entre 2006 e 2009, gerada a partir de dados fornecidos pelo IBGE. 166

Figura 45 - Variação espacial da produtividade real de cana-de-açúcar em três safras agrícolas e média entre as safras 2010 e 2012, geradas a partir de dados da produção agrícola municipal do IBGE 167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Respostas [(1)] de crescimento (G) e fotossíntese (P_N) em algumas espécies expostas ao atmosfera enriquecida em CO_2 46

Tabela 2 - Resposta da cultura da cana-de-açúcar à elevação da [CO_2] para 720 ppm para a fotossíntese, biomassa, condutividade foliar à difusão de vapor (gs), transpiração e produtividade de água (Prod.Água)..... 48

Tabela 3 - Modelos de pesquisa e modelos aplicados: comparação das principais diferenças (Adaptado de THORNLEY e JOHNSON, 2000) 61

Tabela 4 - Componentes e parâmetros gerais do módulo de solos do modelo APSIM-Sugar 70

Tabela 5 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições 75

Tabela 6 - Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições..... 76

Tabela 7 - Parâmetros de variedades do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições. 77

Tabela 8 - Categorias e descrição dos arquivos INI utilizados pelo modelo APSIM-Sugar 82

Tabela 9 - 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 e SAMUCA..... 90

Tabela 10 - Estações meteorológicas com suas respectivas latitude, longitude e altitude 93

Tabela 11 - Classificação da zona climática de cada ponto de simulação selecionado e área de cana-de-açúcar cultivada representada por cada uma das zonas climáticas. 95

Tabela 12 – Descrição do manejo da cultura e classificação do solo predominante por município selecionado para as simulações 96

Tabela 13 - Média anual atual e variações introduzidas por cada modelo de circulação geral da atmosfera utilizado para a geração dos cenários climáticos futuros..... 99

Tabela 14 - Variáveis de estado do modelo SAMUCA, descrições, unidades e categorias. 102

Tabela 15 - Composição química e equivalente em glicose para a produção de cada composto, considerando a planta de cana-de-açúcar. 103

Tabela 16 - Parâmetros do modelo SAMUCA específicos para cada variedade, descrições, unidades e faixa de variação utilizados no processo de otimização com o GLUE..... 105

Tabela 17 - Matriz de correlação do modelo gerada com base no método GLUE. Valores com asterisco indicam coeficiente de correlação significativo a 5% de probabilidade. Significância calculada com base em 3000 simulações estocásticas (n=3000) com base na estatística $rcrit = 1 - \alpha n - 1$, sendo $r_{crít}$ o valor limite para significância do coeficiente de correlação, n é o número de dados considerados e α é o nível de significância desejado 125

Tabela 18 – Valores otimizados para a variedade RB867515 com base em dados de 9 experimentos de campo 127

Tabela 19 – Indicadores estatísticos das predições do modelo SAMUCA para a variedade RB86-7515 para massa fresca de colmos, teor de sacarose no caldo (POL), índice de área foliar (LAI) e população de plantas (POP)..... 127

Tabela 20 – Parâmetros ajustados para a variedade RB867515 para o modelo DSSAT/CANEGRO. Os parâmetros da variedade NCo376 fornecidos na distribuição do modelo DSSAT/CANEGRO são também apresentados para comparação 145

Tabela 21 – Parâmetros calibrados para a variedade RB867515 no modelo APSIM-Sugar. Os valores dos parâmetros da variedade NCo376 fornecidos pelo modelo APSIM são também apresentados para comparação 145

Tabela 22 - Indicadores de concordância estatística das simulações produzidas pelos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO para as variáveis massa fresca de colmos (MFC, t/ha) e índice de área foliar (LAI) em relação aos dados observados 151

Tabela 23 - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmos atingível produzidas pelos modelos APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO e SAMUCA, com relação à área representada por 9 zonas climáticas homogêneas do Brasil, e variação da produtividade em 6 cenários climáticos futuros em relação ao clima atual 159

Tabela 24 - Média das simulações de massa fresca de colmos com o modelo APSIM-Sugar para 9 locais no Brasil e 7 cenários climáticos (1 atual + 6 futuros) 160

Tabela 25 - Média das simulações de massa fresca de colmos com o modelo DSSAT/CANEGRO para 9 locais no Brasil e 7 cenários climáticos (1 atual + 6 futuros) 161

Tabela 26 - Média e desvio padrão das simulações de massa fresca de colmos com o modelo SAMUCA para 9 locais no Brasil e 7 cenários climáticos (1 atual + 6 futuros) 162

Tabela 27 - Variação relativa das simulações geradas por três modelos para o clima atual para massa fresca de colmos para 9 locais no Brasil e 6 cenários climáticos futuros. + indica variação positiva, - indica variação negativa em relação ao clima atual. O sinal a esquerda representa o modelo SAMUCA, o sinal da direita representa o modelo APSIM-Sugar e o sinal da posição intermediária refere-se ao modelo DSSAT/CANEGRO 163

Tabela 28 - Variação dos índices de estresse por deficiência de nitrogênio e deficiência hídrica no modelo APSIM-Sugar para nove locais no Brasil em sete cenários climáticos (um atual + seis futuros) 164

Tabela 29 - Produtividade real e atingível, eficiência da produção e *yield-gap* explorável da cana-de-açúcar em nove regiões brasileiras e valores ponderados para o Brasil. São apresentados os valores calculados para o cenário atual e para 6 cenários climáticos futuros 168

Tabela 30 - Fatores que comumente afetam a perda de produtividade nos canaviais brasileiros 171

1 INTRODUÇÃO

Até 2050, a população mundial aumentará em aproximadamente 30%, e a maior parte desse adicional de 2 bilhões de pessoas viverão em cidades de países em desenvolvimento. Essas projeções implicam na necessidade de elevar a produção agrícola em níveis significativos, o que representa um grande desafio tanto para a sustentabilidade do planeta como para a capacidade produtiva dos ecossistemas aquáticos e terrestres. Os produtores agrícolas são os principais agentes desse desafio e, se forem capazes de supera-lo, certamente alterarão de modo expressivo a superfície da Terra nas próximas décadas.

Assim, é fácil concluir que nas próximas décadas cada hectare arável precisará ter produtividades maiores que as atuais. No Brasil, os setores com elevada demanda por terra serão (e já tem sido) os mais pressionados pela disputa no uso do solo, e o setor canavieiro está entre eles. Dada a necessidade de intensificação da agricultura, a identificação das regiões com os melhores potenciais de incremento da eficiência produtiva é importante pelas seguintes razões: 1) a análise da eficiência da produção agrícola fornece subsídios para identificar os principais fatores limitantes à produtividade; 2) por permitir priorização de recursos para a pesquisa, desenvolvimento e intervenção; 3) por permitir a avaliação do impacto das mudanças climáticas e cenários agrícolas futuros nas culturas e no uso do solo; e 4) os resultados deste tipo de análise são dados de entrada para modelos econômicos de equilíbrio geral e parcial, ferramentas utilizadas para projeções futuras de segurança alimentar e uso da terra.

A identificação das regiões com os melhores potenciais de incremento da eficiência produtiva pode ser feita pela diferença (ou a razão) entre a produtividade atual, observada em condições operacionais, e a produtividade potencial (Yp) (ou produtividade atingível limitada apenas por deficiência hídrica - Yw). A aplicação do conceito da eficiência de produção agrícola para o setor sucroenergético brasileiro pode fundamentar análises estratégicas sobre as trajetórias de custos e preços futuros de açúcar, etanol e energia, da demanda e custo por novas áreas, competição com outras atividades pelo uso do solo, e a projeção de cenários agrícolas futuros para a cana-de-açúcar brasileira, buscando-se antever como as mudanças mais prováveis nas diferentes regiões do país devem alterar o cenário atual.

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, utiliza-se 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 na agricultura é pelo uso de modelos de crescimento de plantas (MCP), baseados em processos fisiológicos e físicos que ocorrem nas culturas (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.

No entanto, apesar da robustos, o uso desse tipo de modelo carrega consigo uma série de incertezas. A comunidade de modeladores do clima, por exemplo, tem atacado o problema da incerteza[1] utilizando agrupamentos (do inglês, *ensembles)* de modelos de circulação geral da atmosfera. Os MCP's, contudo, são ainda utilizados com uma abordagem determinística, sem contar com uma análise probabilística adequada a despeito das incertezas associadas em seus algoritmos, dados de entrada e parâmetros. Também, a opção para enfrentar essa limitação, é o uso de um conjunto de MCP´s em paralelo, adequadamente calibrados, em analogia aos *ensembles* dos modelos climáticos.

Há vários MCP´s para cana-de-açúcar, mas apenas dois (APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO) estão efetivamente disponíveis para usuários finais. No Brasil, a expertise em modelagem de cana-de-açúcar baseada em processos é ainda pequena, sendo mais comum as simulações com modelos desenvolvidos no exterior. Estudos recentes indicam que pelo menos três MCP´s precisam ser empregados para redução das incertezas aos níveis próximos daqueles obtidos nos dados experimentais. Oferecer um terceiro modelo, adaptado as condições brasileiras, foi um dos motivadores deste trabalho.

[1] Qualquer desvio em relação a um valor ideal obtido a partir de um conhecimento determinístico supostamente completo sobre um sistema.

2 OBJETIVOS

De modo geral, este trabalho busca contribuir para a compreensão do setor canavieiro do Brasil através da quantificação da eficiência de produção agrícola nas principais regiões produtoras do país.

Especificamente, esse trabalho tem por objetivos:

- Desenvolver, descrever, implementar, avaliar e aplicar um modelo para simulação da produtividade de cana-de-açúcar, estruturado sob uma base estocástica, em diferentes regiões brasileiras;
- Calibrar e avaliar os modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO para diferentes regiões do Brasil;
- Utilizar a abordagem multimodelos para a simulação da produtividade atingível da cana-de-açúcar brasileira;
- Estimar a produtividade atingível atual e da eficiência atual de produção da cana-de-açúcar brasileira, com base na abordagem multimodelos;
- Projetar cenários futuros de produtividade de colmos e eficiência produtiva com base em mudanças climáticas, com base na abordagem multimodelos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A cultura da cana-de-açúcar: da origem ao Brasil

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*.) é originária do Sudeste Asiático, especificamente da região da Nova Guiné e Indonésia (MOZAMBANI et al., 2006; JAMES, 2004), sendo até 1980 classificada taxonomicamente como pertencente à família das gramíneas, o que foi ajustado por Cronquist (1981) como pertencente à família *Poaceae*.

A cana-de-açúcar cultivada no Brasil é um híbrido das espécies *Saccharum officinarum*; *Saccharum barberi; Saccharum robustum; Saccharum spontaneum; Saccharum sinensis; Saccharum edule*. A *Saccharum officinarum* é utilizada como base para o melhoramento genético no país, devido à capacidade de acumular altos níveis de sacarose no colmo; entretanto, possui baixa resistência a doenças. Normalmente, a espécie *Saccharum spontaneum* é utilizada como repositório de genes de resistência, vigor, perfilhamento e capacidade de rebrota para as novas variedades (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

Lineu (1753) descreveu duas espécies de cana-de-açúcar: *Saccharum officinarum* e *Saccharum spicatum,* as quais, atualmente, são classificadas como *S. officinarum, S. spontaneum, S. sinensis, S. barberi e S. robustum*, pertencentes à família *Poacea.*

Entre os pesquisadores, há consenso de que a cana-de-açúcar tenha se originado e desenvolvido entre o sudeste asiático e o norte da Oceania como resultado de uma combinação fortuita de eventos naturais (van Dillewijn, 1952). Há, contudo, alguns poucos relatos de que a cana tenha se originado no ocidente, mas isso provavelmente deve-se a um engano histórico decorrente da imprecisão dos escritores da época ao utilizar o termo “origem” como sendo um ponto de distribuição numa dada região (muito provavelmente um porto onde atracavam os navios com carregamento de mudas de cana-de-açúcar) e não como um centro de dispersão genética.

Dentre os estudiosos, Artschwager e Brandes (1958) propuseram a hipótese de que a cana-de-açúcar seja originária de uma forma primitiva de *Saccharum spontaneum* do sudeste da Ásia e então tenha se espalhado para o Sul em direção à Austrália ao longo do período Cretáceo, quando os dois continentes ainda estavam unidos por terra. Celarier (1956), adicionalmente, sugere que a cana tenha origem genética baseada no *Miscanthus* e no *Erianthus*.

Sobre a espécie *Saccharum officinarum*, em especial, a hipótese mais aceita é de que ela foi historicamente selecionada pelo homem para cultivo como espécie “de jardim”, tendo sido adaptada como espécie hortícola. Esse processo histórico de “domesticação” é atribuído principalmente aos povos ancestrais da região onde atualmente encontra-se a Nova Guiné (Figura 1) e a Malásia, utilizando como critério tácito de seleção o sabor do caldo (quanto mais doce melhor), menor teor de fibra (facilitando o consumo *in natura*), rebrota e crescimento vigorosos após a colheita e a capacidade de sobrevivência das plantas após longos períodos para seu transporte entre as ilhas da Oceania e sudeste da Ásia.

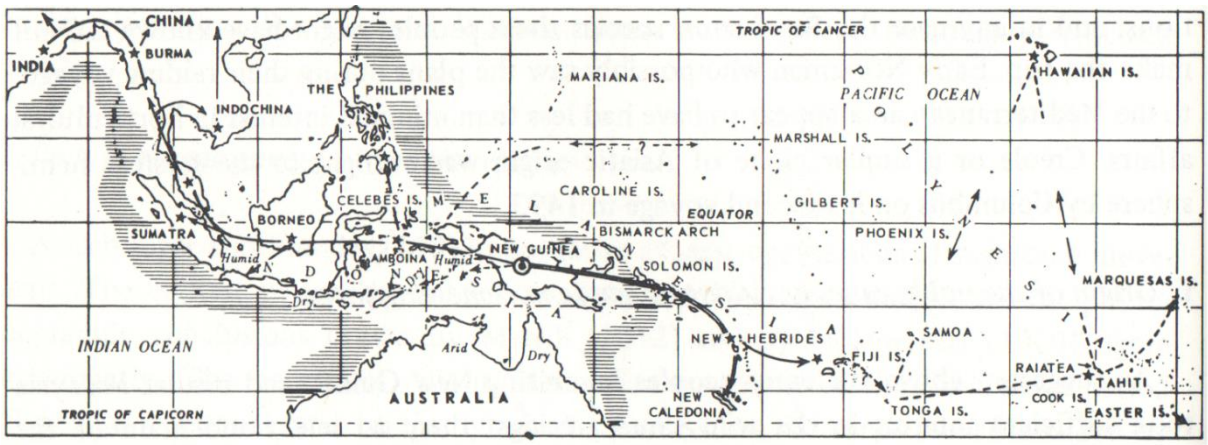


Figura 1 - Origem, migração e centros de diversidade genética das cana-de-açúcar classificadas como nobres. Θ provável sítio de origem da *Saccharum officinarum*, através da hibridização natural da *S. robustum*, entre 8000 e 15000 anos a.C. * Centros de diversidade que se desenvolveram ao longo da trajetória de migração. A porção sombreada indica a faixa aproximada que formava a área contínua de terra ligando os continentes asiático e australiano. Fonte: Alexander (1973).

O resultado desse processo (que continua até hoje) é a formação de uma espécie de cana-de-açúcar classificada no grupo das “canas nobres” pelos taxonomistas e que, em comparação com as demais espécies do gênero *Saccharum*, tem maior teor de sacarose, não é amilácea, é menos fibrosa e tem colmo mais grosso que as chamadas “canas não nobres” (Alexander, 1973). Além disso, essa espécie também se tornou dependente do homem para sua propagação sendo raramente capazes de manter-se por si em ambiente natural sem interferência humana. Associando as características da *Saccharum officinarum* com o vigor da *Saccharum robustum* e a boa resistência a doenças da *Saccharum spontaneum* tem-se a essência das canas comerciais contemporâneas. Uma das consequências desse processo natural de seleção é a hipótese levantada por Bull & Glasziou (1963) e Alexander (1973) quanto à relação entre o potencial de acúmulo de sacarose e as linhagens historicamente mais “domesticadas” pelo homem dentro da

espécie *Saccharum officinarum*, em comparação com a menor tendência de acúmulo nas linhagens mais fibrosas e pouco pressionadas geneticamente pelo homem ao longo da história.

O gênero *Saccharum* tem sido objeto de estudos há várias décadas, mas a similaridade morfogênica, a fertilidade cruzada, a intensa propagação vegetativa e o alto poliploidismo têm tornado mais difícil o trabalho dos botânicos e melhoristas na classificação e acesso a materiais genéticos ancestrais. Na tentativa de descrever a origem dos híbridos comerciais de cana-de-açúcar, Deerr (1911) sumarizou a história das variedades mais importantes cultivadas nas principais regiões canavieiras do mundo naquela época, coletando e sistematizando dados das principais variedades através do contato com grupos produtores da Jamaica, Louisiana, Demerara, Java. Levando em conta características morfológicas, uso e centros de origem, ele agrupou as variedades da época em 26 principais grupos, dentre os quais os mais importantes são: *Otaheite, Cheribon, Indian, Javanese, New Guinea, Pacific Island, Hawaiian* e *Brazilian*. Estes agrupamentos, segundo Jeswiet (1929) tiveram confirmação com o advento dos cruzamentos controlados de cana-de-açúcar a partir de 1880, em Java. Esta tecnologia, por sua vez, foi desenvolvida como consequência de um ataque fitopatológico intenso sobre a variedade Black Cheribon, a principal da ilha de Java na época. Então, ao encontrarem variedades que haviam resistido ao ataque da doença, os melhoristas passaram a estudar meios de cruzá-las de modo a conferir alguma resistência à Black Cheribon. As primeiras tentativas de cruzamento entre *S. officinarum* e *Erianthus arundinaceus* com *S. spontaneum* falharam, mas forneceram os subsídios para um grande sucesso nessa prática, com cruzamentos bem-sucedidos. Como exemplo desse processo de hibridação bem-sucedido, a Figura 2 ilustra a árvore genealógica da variedade H49-5, considerada uma variedade relativamente moderna e superior do Havaí, indicando que, das 4 espécies que contribuem geneticamente para sua constituição (*S. officinarum, S. sinensis, S. spontaneum, S. robustum*), *S. officinarum* predomina largamente.

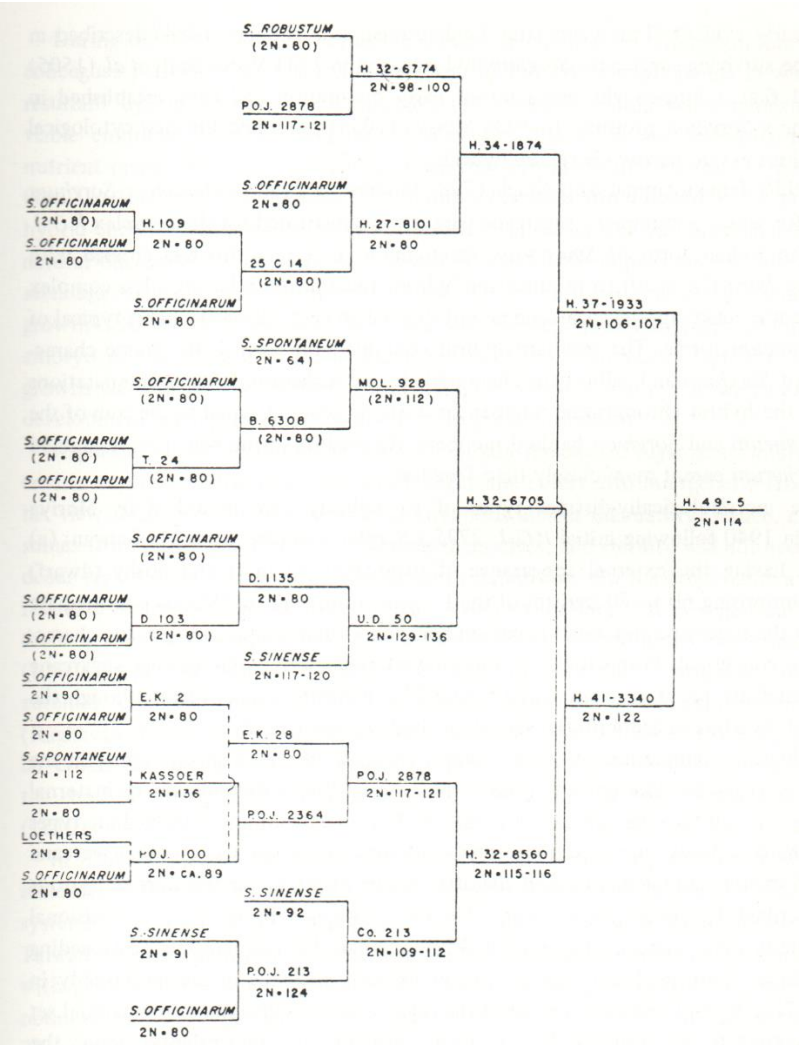


Figura 2 - Árvore genealógica da variedade Havaiana H 49-5. Genitores masculinos aparecem acima e femininos abaixo. Linhas pontilhadas significam áreas de incerteza. Fonte: Alexander (1973)

No Brasil, a cana-de-açúcar chegou logo após o descobrimento do país, para quebrar o monopólio Francês no suprimento mundial de açúcar, oriundo das colônias caribenhas (Canabrava, 2005). A cultura ganhou importância econômica mais expressiva a partir da segunda metade do século XVI, quando os engenhos do nordeste brasileiro passaram a operar em Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Paraíba. No século XVII, a produção de cana-de-açúcar expandiu- se para o Pará e Amazonas (onde os engenhos orientaram-se para a produção de cachaça), chegando em seguida ao Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Neste período, a cultura atendia perfeitamente à estratégia de Portugal, associando a ocupação intensa da colônia e a produção de um item altamente lucrativo para a metrópole na Europa (Canabrava, 2005).

No século XIX, a expansão dos polos produtores de açúcar pelo mundo reduziu a importância do Brasil no mercado mundial, comprometendo assim a viabilidade econômica da

atividade do país. Neste período, São Paulo e Rio de Janeiro firmaram-se como polos fornecedores para as regiões Sul e Sudeste. Em 1933, foi criado o Instituto de Açúcar e Álcool (IAA), com a finalidade de regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura. Em 1973, com a primeira crise do petróleo, o Brasil iniciou o Programa Nacional do Álcool - Proálcool, com o objetivo de inserir o etanol na matriz energética brasileira e, em 1979, teve início a produção de veículos movidos a etanol no Brasil. Poucos anos depois, o baixo preço do produto atraiu a classe média e, em 1985, 96% dos veículos fabricados no país eram movidos a etanol. Porém, na segunda metade da década de 80, houve escassez de crédito para os produtores de cana-de-açúcar, diminuição nos preços pagos aos produtores ao mesmo tempo em que os preços do açúcar tornaram-se muito atrativos no mercado internacional, culminando na escassez de etanol no mercado interno e comprometimento da credibilidade do setor perante o consumidor final (Borges et al., 1988). Desde o início da década passada, o Brasil tem se destacado pelo grande potencial para agricultura de energia a partir de biocombustíveis, com 596 usinas sucroalcooleiras operando em 2010 (Figura 3). 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 entrar em processo de recuperação judicial (Folha de São Paulo, 2014) ou mesmo o fechamento definitivo (Oliveira, 2012).

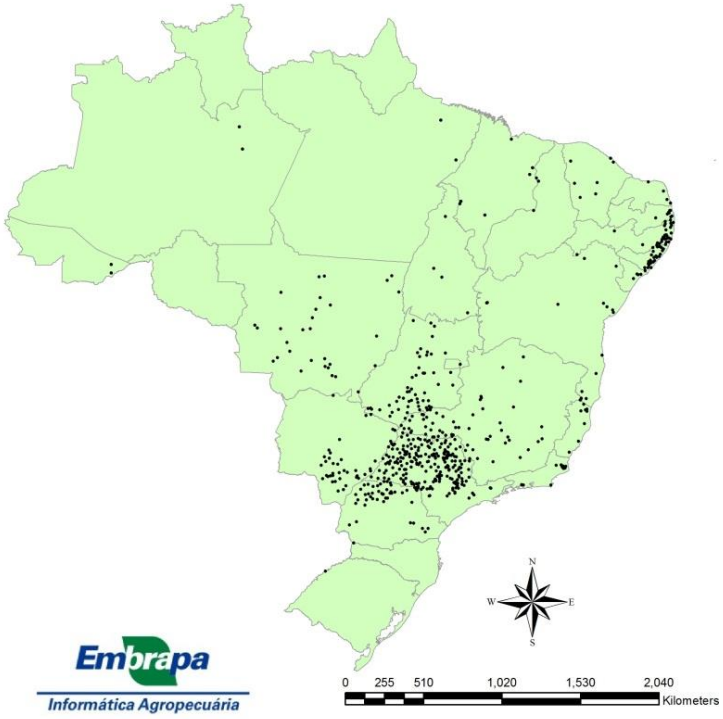


Figura 3 - Distribuição espacial das usinas sucroalcooleiras e de biodiesel no Brasil no ano de 2010.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2014) a área de cana-de-açúcar no Brasil cresceu 19% em Goiás, 32% em Mato Grosso do Sul, 42% no Tocantins e 26% no Paraná entre 2006 e 2009. Em São Paulo, que responde atualmente por 52,7% da área plantada e 58,2% da produção nacional de cana de açúcar, houve avanço de 11% no mesmo período (Figura 4).

No final do século XV e início do XVI, na Europa, o açúcar proveniente da cana era tão valorizado quanto o ouro. As limitações climáticas impedem seu cultivo no continente europeu e, àquela época, a demanda pelo produto era muitas vezes superior à capacidade produtiva no mundo, o que fez desse um negócio muito rentável, principalmente para países que possuíam o monopólio comercial em regiões aptas ao cultivo da cana, como era o caso de Portugal dominando as Ilhas de Açores, a Ilha da Madeira e o Brasil (UNICA, 2012). A partir da introdução da cana-de-açúcar em território brasileiro, consideram-se os três séculos subsequentes como o “Ciclo da Creoula”, devido ao predomínio desta variedade no período. Posteriormente, esta foi substituída pela variedade “Caiana”, com maiores teores de açúcar e mais produtiva (BARBOSA, 2005).

Com o início do melhoramento genético da cana-de-açúcar no final do século XIX e início do século XX, o Brasil passou a importar rotineiramente variedades de outros países, mais produtivas e com maiores teores de sacarose. Entretanto, neste período, o controle fitossanitário e o quarentenário não eram realizados. Consequentemente, os canaviais brasileiros foram acometidos por muitos problemas relacionados à infestação de pragas e doenças como foi o caso do mosaico e do carvão. Com a crise do início do século XX, os produtores e governantes foram obrigados a criar centros experimentais e instituições de pesquisa na área de cana-de-açúcar, para o melhoramento genético e controle fitossanitário, de acordo com as necessidades locais (CESNIK e MIOCQUE, 2004).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil ganhou destaque em meados da década de 1970, quando o governo criou o programa Proálcool, em 1975. Este visava ao incentivo a qualquer insumo capaz de substituir o petróleo, numa tentativa de minimizar a dependência externa aos combustíveis fósseis e ao elevado preço do barril na época (SZMRECSÁNYI e MOREIRA, 1991). A partir daí a produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar aumentou significativamente, passando de 600 milhões de litros em 1975 para 3,4 bilhões de litros em 1976 (BORGES et al., 1988). Após quatro décadas da criação dos programas de incentivo à produção de etanol, o Brasil ocupa o primeiro lugar no mercado mundial de produção de cana-de-açúcar, com 50% da produção mundial (NEVES et al., 2009).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil tem aumentado desde o início do século XXI com a implantação da cultura em novos locais, impulsionada principalmente pelo consumo de etanol no mercado interno (MARIN et al., 2011). Para a safra 2013/14, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento, expandiu-se em 3,7% em relação à 2012/13, num acréscimo de 314 mil hectares especialmente na região centro-sul. A área cultivada em 2013 totalizou 8.799.150 ha no país e São Paulo continua sendo o maior produtor com 51,3% do total cultivado, alcançando 331 milhões de toneladas safra 2012/2013 para 363 milhões de toneladas na safra 2013/14 (CONAB, 2014).

O programa de incentivo à produção de etanol ganhou destaque entre os países emergentes como modelo de energia renovável e, consequentemente, aumentou o interesse de investimentos internos e externos na sua produção (GOLDEMBERG, 2007). Dentre os principais destinos das exportações brasileiras de etanol em 2010 estão a Coréia do Sul com 19,9% do volume exportado, seguido dos Estados Unidos e Japão, com participações de 13,9% e 13,8%, respectivamente. Com relação ao açúcar, em 2010, os principais destinos das exportações foram Rússia, com 12,5% do volume exportado, seguido da Índia e Irã, com participação de 8,3% e 5,7%, respectivamente (SECEX, 2010). No caso do açúcar, o Brasil ocupa mais de 40% do mercado internacional. A demanda externa tem impulsionado sua expansão, devido ao crescimento da população mundial e ao aumento do consumo em países em desenvolvimento, particularmente na Ásia, em face ao crescimento da renda per capita e o processo de êxodo rural nesses países. Mais recentemente, a quebra de safra em países produtores, representou incentivo adicional para o produto no mercado externo, afetando o mercado interno de etanol.

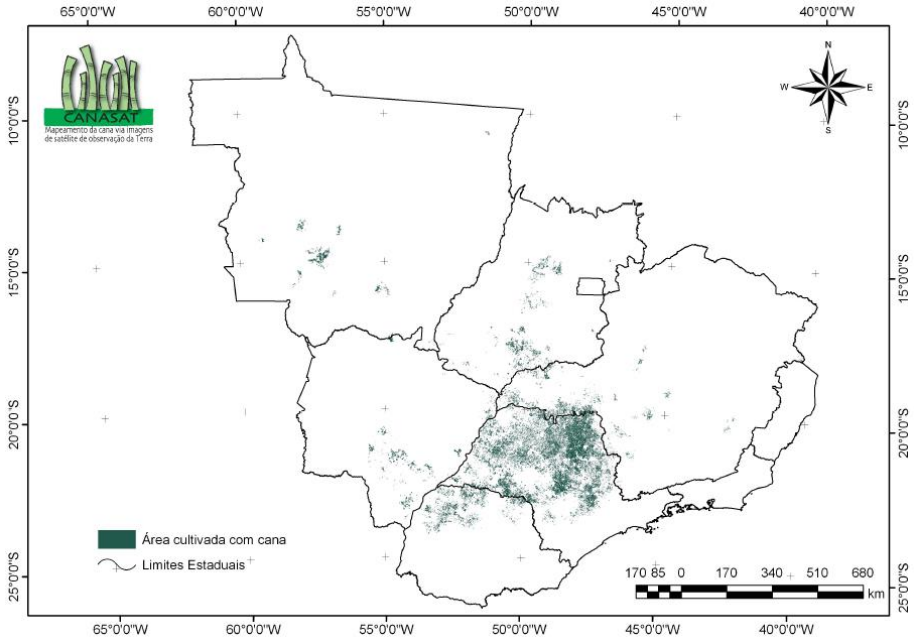


Figura 4 - Distribuição espacial das áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região Centro-Sul - safra 2008/2009. Fonte: Silva et al., 2009.

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, pouco abaixo dos Estados Unidos, que utiliza o milho para sua produção. O rendimento da cana-de-açúcar é determinado pela massa fresca dos colmos entregues à indústria de processamento e o seu respectivo teor de sacarose. Atualmente, após triturar os colmos da cana e extrair o suco, o bagaço é queimado na própria indústria para a produção de vapor e, consequentemente, obtêm-se energia elétrica. As condições pedoclimáticas e a larga experiência acumulada na produção de álcool combustível colocam o Brasil em posição privilegiada em relação aos demais países produtores. Durante a safra 2011/2012, 571 milhões de toneladas de cana-de-açúcar colhidas produziram aproximadamente 36,9 milhões de toneladas de açúcar e cerca de 22,8 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2011). Além de seu uso comercial para açúcar, etanol e eletricidade nas usinas, a cultura é amplamente utilizada por pequenos agricultores em todo o país como alimento para animais ou como matéria-prima para a cachaça artesanal e açúcar mascavo.

Para os países que são altamente dependentes dos recursos naturais, como o Brasil, os impactos de eventos climáticos extremos podem ter uma importância econômica e social que superam de longe as suas probabilidades de ocorrência aparente (Thornton et al., 2009). Esses impactos sobre a agricultura têm uma importância especial para o Brasil, uma vez que quase 30% do produto interno bruto brasileiro está relacionado ao agronegócio (Barros, 2009). Apesar desses números expressivos, há alguns anos o setor atravessa uma difícil crise, cujos três principais fatores foram descritos por Bressan Filho (2009) e permanecem atuais: 1) a crescente

necessidade de capital financeiro para a formação de estoques de etanol e garantia de oferta do produto na entressafra; 2) a baixa taxa de remuneração da atividade alcooleira desde a 2007/2008 e, 3) a ausência de mecanismos comerciais para interferir na formação das margens de comercialização e na competitividade do etanol frente a gasolina. Assim, considerando que os preços atuais do etanol não são remuneradores, é razoável supor que a tendência de expansão da área de cana observada na última década não seja mantida, com possibilidade de reversão da capacidade instalada no Brasil em virtude do grande número de usinas em recuperação judicial ou em processos de fechamento.

Em 2009, a Embrapa e parceiros publicaram o resultado de um estudo (Manzatto et al., 2009) encomendado pelo Governo Federal sobre a indicação das melhores áreas para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, conciliando as áreas com melhor potencial produtivo com critérios de preservação ambiental e de regulação da mudança de uso do solo. Neste estudo (Figura 5), foram identificados cerca de 66 milhões de hectares aptos à produção de cana no Brasil, com bom potencial de clima e solo, declividade menor que 12%, em áreas atualmente cultivadas com pastagens e fora dos biomas Amazônico e Pantanal e da bacia do Alto Paraguai. Sob o ponto de vista político, esse estudo também indica que há excelente potencial para a expansão da cultura no país (ainda que se saiba que apenas uma pequena fração desse total serão efetivamente ocupados com a cultura) especialmente no Cerrado brasileiro, que a despeito das necessidades específicas de adaptação de manejo da cultura (especialmente quanto a água e genótipos), tem excelente condições para o cultivo da cultura.

Assim, ainda que as condições comerciais para a expansão do negócio 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.

Figura 5 - Áreas aptas ao cultiva da cana-de-açúcar no Brasil de acordo com o Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar. (Fonte: Manzatto et al., 2009).

3.2 A cultura da cana-de-açúcar: breve descrição morfofisiológica

3.2.1 Fenologia

Machado (1981), com base no padrão de acúmulo de matéria seca ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, 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. Segundo Doorembos e Kassan (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 6). Pode-se, portanto, notar a correspondência entre as duas

abordagens, sendo que o segundo sistema consiste apenas na subdivisão da fase de rápido crescimento em duas etapas. Tais fases, contudo, não são simples de serem identificadas no campo, e a duração de cada fase é bastante variável em função da época de plantio ou corte, temperatura do ar e disponibilidade água no solo. Assim, apesar de didático, a associação de fases fenológicas da cana-de-açúcar a períodos cronológicos fixos deve ser evitada, pois além da dependência em relação ao regime térmico da localidade, a fenologia da cana também responde à disponibilidade de água e nutrientes e à característica genética das variedades (Figura 6). Na sequência deste capítulo, faz-se um apanhado geral sobre os principais fases e eventos pelos quais a cultura passa ao longo de seu ciclo, buscando associa-los ao regime térmico, a radiação solar e à disponibilidade hídrica.

Eventos	Germinação e Emergência	Perfilhamento e Estabelecimento	Elongação do colmo; Crescimento Intenso; Início do Acúmulo de Sacarose	Intenso acúmulo de sacarose
Fase	1) Emergência	2) Estabelecimento	3) Desenvolvimento da Cultura	4) Maturação
Duração	150 a 250 ºC d	600 a 700 ºC d	1400 a 1700 ºC d	900 a 1200 ºC d

Figura 6 - Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar. Modificado de Doorembos & Kassan (1979) e Gasho & Shih (1983)

Uma abordagem para descrição do ciclo fenológico da cana-de-açúcar foi proposta por Bezuidenhout et al. (2003), com a divisão do ciclo em 5 fases (Figura 7): 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. Tal trabalho teve foco na fase de perfilhamento e mais detalhes sobre essa abordagem serão fornecidos mais adiante. Esta abordagem, vale destacar, é a mais indicada para representar a cultura da cana-de-açúcar.

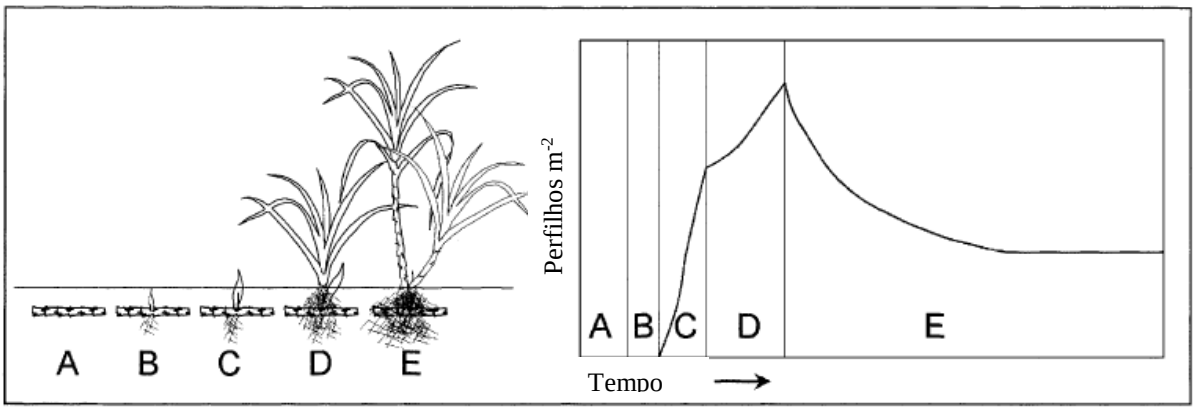


Figura 7 - Representação esquemática das fases do perfilhamento da cana-de-açúcar. Adaptado de Bezuidenhout et. al. (2003).

3.2.1.1 Germinação e emergência

Ao longo de vários séculos acreditou-se que a cana-de-açúcar não produzia sementes, sendo, portanto, reproduzida apenas vegetativamente. Historicamente, uma série de circunstâncias contribuíram para que esse equívoco se propagasse no tempo, dentre elas o fato de que algumas variedades cultivadas no continente americano ao longo de 2,5 séculos permanecerem sendo macho-estéreis e, portanto, sem produzirem sementes (van Dillewijn, 1952). Provavelmente embasado em observações de cultivos de cana-de-açúcar no ocidente, Wray (1848) contribuiu para que esse engano se mantivesse, afirmando categoricamente que a cana não produzia sementes viáveis. Candolle (1883), prosseguindo no equívoco, afirmou não ter conhecimento de nenhum especialista em cana-de-açúcar que houvesse reportado ou ouvido de alguém sobre sementes viáveis de cana-de-açúcar. Tais autores, provavelmente, foram traídos pelas dificuldades de comunicação do século 19, uma vez que Parris (1859) (apud van Dillewijn, 1952) em Barbados, e Alphen (1862) em Java, já haviam reportado sobre a possibilidade de produção e germinação de sementes de cana-de-açúcar produzidas em condições naturais.

Na prática, contudo, a cana de açúcar é geralmente propagada vegetativamente utilizando-se frações dos colmos adultos (toletes), contendo pelo menos uma gema viável. Neste caso, a germinação consiste no desenvolvimento de órgãos já presentes de modo

embrionário na gema, como os primórdios foliares e de raízes. Ao longo da circunferência do nó do tolete, há também 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 8).

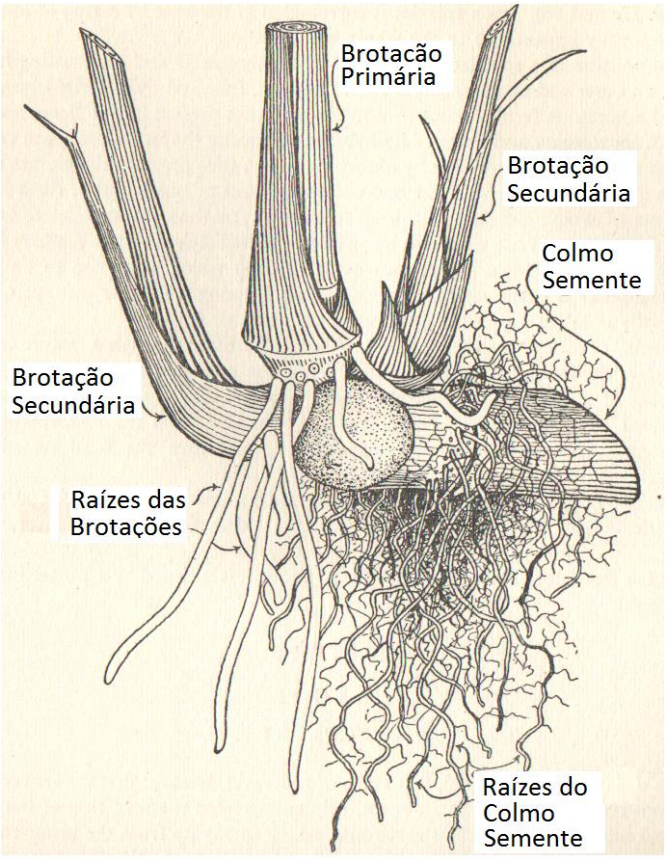


Figura 8 - Representação de uma planta jovem de cana-de-açúcar mostrando dois tipos de raízes: conjunto de raízes originárias dos primórdios radiculares presentes no colmo utilizado como semente, e raízes originárias dos primórdios radiculares presentes nas brotações primárias e secundárias. Adaptado 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 injuria (por exemplo após a ocorrência de geadas ou o ataque de brocas ou o florescimento) e esse mecanismo de dominância é quebrado, esse bloqueio deixa de existir, havendo estimulo para a brotação lateral do colmo.

A temperatura do ar controla a germinação ao regular as reações bioquímicas que ocorrem na semente ou na gema. Verret (1927) encontrou que a germinação de tolete de cana

ocorreu numa faixa de temperatura entre 19ºC e 43 ˚C, sendo uma faixa ótima entre 32 e 37ºC. De modo geral, ambientes mais quentes encurtam o período de tempo compreendido entre a germinação e a emergência da cultura, o que pode resultar em maior produtividade uma vez que o ciclo produtivo da cultura se torna mais longo e 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, da sanidade e das reservas energéticas dos toletes utilizados no processo de propagação vegetativa (PARANHOS, 1987).

A emergência é um evento que segue à germinação, e que se dá quando as folhas atingem a superfície do solo e passam a ser visíveis. Marin et al. (2011) e Marin et al. (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 ºC·d. As variedades brasileiras de cana-de-açúcar normalmente emergem após cerca de 400 ºC d (Marin et al., 2012), o que pode representa cerca de 20 dias após o plantio, nas épocas mais quentes do ano do centro-sul brasileiro. Singels et al. (2008) sugerem que uma importante variedade sul-africana (NCo376) de cana-de-açúcar necessite cerca de 1050 ºC·d para que os colmos consigam atingir a superfície do solo e, ainda, outros 600 ºC·d até atingir o pico do perfilhamento. A diferença quanto à exigência térmica para a emergência explica em grande parte as diferenças na capacidade produtiva observada entre materiais genéticos brasileiros e sul-africanos (Suguitani, 2006), preponderando sobre a diferença quanto à eficiência de uso da radiação nas variedades.

3.2.1.2 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 de uma mesma planta, a partir da parte subterrânea da planta (toletes ou colmos anteriormente formados), com intensidade variável em função da espécie, variedade e manejo (Suguitani, 2006). van Dillewijn (1952) aponta a temperatura do ar como uma variável determinante do processo fisiológico do perfilhamento, sendo este favorecido na faixa dos 30 ºC, destacando a importância da época de plantio como fator determinante para a formação de população adequada de plantas.

Um dos poucos trabalhos realizados no sentido de se modelar mecanísticamente o processo do perfilhamento foi feito por Beizuidenhout et al. (2003). Segundo os autores, seria possível desenvolver um algoritmo para predição do padrão de perfilhamento das variedades levando-se em conta a radiação incidente, a arquitetura da copa e a temperatura do ar. Neste algoritmo, o cômputo da taxa de perfilhamento teria início com a fase de pré-germinação, que se inicia após o plantio ou logo após a colheita, com o desenvolvimento das gemas dormentes. Subsequentemente, tem-se a fase de pré-emergência, quando se observa o crescimento radicular intenso (van Dillewijn, 1952) e com crescimento na taxa de 0,80 $mm \cdot {}^{o}C^{-1} \cdot d^{-1}$ para temperatura base de 9ºC (Keating et. al. 1999).

A fase de emergência dos perfilhos primários é considerada como a fase inicial do perfilhamento. Nesta, observa-se taxa de emergência constante dos perfilhos primários e a necessidade de 170 ºC·d (temperatura base 9ºC) (Beizuidenhout et al., 2003). Esse período termal tem conceito análogo ao do filocrono, representando o intervalo de tempo térmico para a emergência de dois perfilhos. No Brasil, existem poucos estudos sobre essa característica das variedades brasileiras e as poucas tentativas de modelagem da cana-de-açúcar ainda se valem de conhecimento produzido sobre as variedades australianas e sul-africanas (Marin & Jones, 2014).

Na fase de emergência dos perfilhos secundários, Beizuidenhout et al. (2002) propõem ainda duas subfases: a primeira é a de perfilhamento abundante e a segunda denominada de fase de declínio. A subfase de perfilhamento abundante é favorecida pela alta temperatura, enquanto a subfase de declínio é determinada principalmente pela competição por radiação solar, levando ao alongamento dos colmos. Por fim, na fase de senescência tem-se a morte dos perfilhos jovens e com poucas folhas verdes, com estabilização da população de plantas até a maturação do canavial.

A interceptação de radiação solar é fator determinante para as fases do perfilhamento da cultura, o que torna evidente a importância do espaçamento de 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.

A radiação solar é fundamental importância neste processo, tanto pela sua intensidade como pela sua duração. 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 do colmo diminui, sinalizando a planta que a área está suficiente 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 em decorrência da 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 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.

3.2.1.3. 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 a 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 ainda ocorre a assimilação de carboidratos, resultando em ganho de massa seca (van Dillewijn, 1952). Durante a fase de crescimento, a sacarose produzida

acumula-se prioritariamente nos internódios basais dos colmos mais velhos, com concentrações progressivamente menores à medida que se aproxima do ápice. A síntese de sacarose é realizada nas folhas e transportada até o colmo, onde é armazenada nos vacúolos do parênquima após uma série de processos fisiológicos (Machado, 1981). Ainda segundo Machado (1981), o processo de crescimento compete com o acúmulo da sacarose, de modo que sob condições adequadas, durante a fase de crescimento, o acúmulo de sacarose é mínimo mesmo nos internódios aptos ao acúmulo. No entanto, em fases subsequentes, quando as condições passam a restringir o desenvolvimento vegetativo, estimula-se o acúmulo de sacarose, caracterizando o início da fase de maturação.

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 (Figura 9). A taxa de produção de folhas, segundo eles, aumenta menos com a temperatura do que em outras espécies tropicais similares. Isso, por sua vez, leva a uma taxa de perfilhamento relativamente menor e a um atraso no alongamento do colmo. Consequentemente, há certo "tempo perdido" até que o estímulo provocado pelo alongamento do colmo resulte em aumento na taxa de acúmulo de matéria seca.

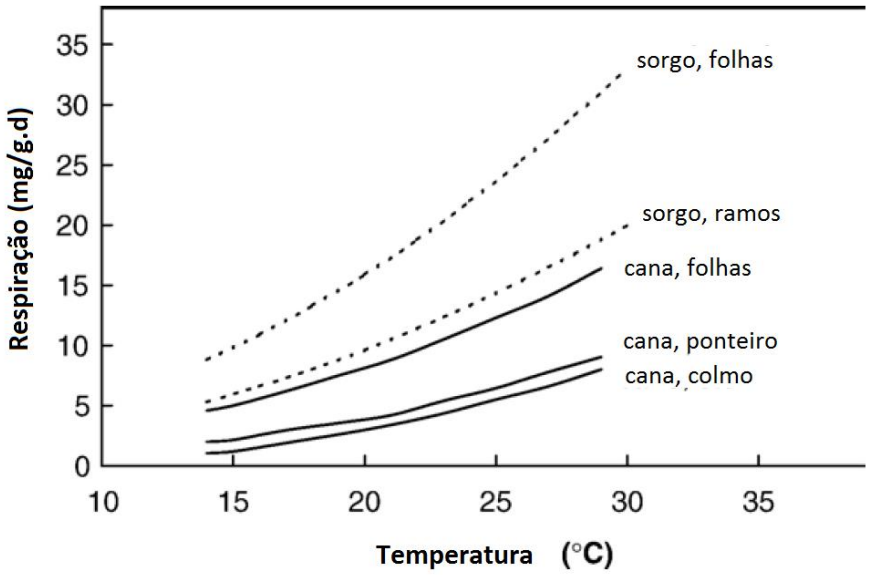


Figura 9 - Taxa de respiração de manutenção, em relação à temperatura, de folhas e ramos inteiros de sorgo (dados de McCree, 1983, 1988) e dependência térmica da taxa de respiração no escuro de folhas, ponteiros e colmo de cana-de-açúcar (dados de Glover, 1973). Adaptado de Allison et al., 2007.

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 também 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 e Pammenter, 2002).

Allison et al. (2007) também avaliaram a taxa de respiração [respiração no escuro (*dark respiration)* e respiração de manutenção] verificando que são relativamente menores que as observadas em outras espécies C4 tropicais similares. Com isso, como tanto o desenvolvimento (expresso pela taxa de produção de folhas), como a respiração (que é uma medida do metabolismo da planta) são menos sensíveis à temperatura na cana do que em outras C4 de morfologia semelhante (Figura 9), pode haver desvantagens e benefícios decorrentes desses atributos no que se refere à produtividade da cultura. Considerando o longo período de melhoramento genético intensivo para produção de sacarose, pode-se perguntar por que essa limitação para a produtividade resultante de uma baixa resposta do crescimento à temperatura e decréscimo da taxa de crescimento na fase final da cultura não foram atacadas pelos melhoristas? No entanto, a baixa resposta da respiração de manutenção à temperatura é benefica para a produtividade da cana. Durante o período de crescimento, a fração caule na biomassa da parte aérea aumenta entre quatro ou cinco vezes até a colheita, sendo que desta fração, entre 55% e 60% constitui-se de material não-estrutural. Com essa grande fração de tecidos exigindo energia, a taxa de respiração de manutenção pode vir a ter uma influência considerável na quantidade de assimilados disponíveis para o crescimento da biomassa. Além disso, a síntese de compostos estruturais e o armazenamento de carhidratos não estruturais podem aparentemente competir por assimilados e, portanto uma diminuição do crescimento estrutural da haste durante a fase tardia de crescimento lento pode conduzir a um maior potencial de armazenamento de sacarose. No germoplasma disponível para os melhoristas, o desenvolvimento e a respiração podem ter tido respostas semelhantes (baixas) à temperatura. A seleção que pode ter aumentado a resposta da temperatura de desenvolvimento (e, assim diminuído o “tempo perdido” na fase inicial da cultura) também poderia ter aumentado a resposta da respiração à temperatura. Assim, a vantagem decorrente da diminuição do “tempo perdido” inicial poderia ter sido mais do que compensada pela desvantagem de aumento no consumo de fotoassimilados por causa de uma maior taxa de respiração, dada a elevada fração de tecidos não estruturais na planta adulta. Desse modo, segundo Allison et al. (2007), o padrão

atual de crescimento das canas atuais parece estar próximo do "ideal" no que concerne a maximizacao do rendimento de sacarose, equilibrando o lento crescimento com um menor consumo de assimilados na fase final do ciclo.

3.2.1.4. Florescimento

Quando o objetivo é a produção de grande massa de colmos ricos em sacarose, normalmente inclui-se o evento do 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. Ao contrário das culturas onde o produto colhido é fruto do processo reprodutivo da cultura, na 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”.

Em programas de melhoramento genético, contudo, o florescimento é necessário para a produção de novas progênies (Moore, 1987) e, em muitos casos, precisa ser induzido artificialmente, utilizando-se câmaras climatizadas para obtenção das condições exigidas para desencadear o processo.

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

Há divergências quanto à classificação da cana como planta de dias curtos ou de dias longos. MANGELSDORF (1958), por exemplo, admite que as mudanças do meristema apical para transformar-se em inflorescência ocorrem durante os dias curtos, enquanto CLEMENTS & AWADA (1965) postulam que a cana tem comportamento intermediário quanto a sensibilidade ao fotoperíodo, uma vez que em seus experimentos nos quais o período do escuro foi fixado em 11 horas e 32 minutos, ocorreu florescimento com alta intensidade. O aumento deste período em 26 minutos reduziu a intensidade do florescimento e a elevação de 34 minutos praticamente inibiu a emissão de inflorescências. Em um segundo experimento, CLEMENTS

& AWADA (1965) verificaram que o período escuro de 11 horas e 30 minutos foi também suficiente para promover o florescimento da cana-de-açúcar, o que corrobora a tese de que a cana deveria ser enquadrada como espécie intermediária, e não de dias curtos. Na Flórida, por exemplo, há relatos de que iniciação floral da cana em casas de vegetação pode ser obtida com 12 horas e 30 minutos de fotoperíodo e temperatura relativamente estável em torno de 24 °C, havendo a emissão da inflorescência cerca de 2 a 3 semanas após a iniciação floral. Assim, é possível generalizar que as melhores condições para o florescimento acontecem nas regiões equatoriais do globo, onde o fotoperíodo gira em torno de 12 horas durante boa parte do ano e há pequena amplitude térmica. Com isso, nesta região, o florescimento poderia ser induzido em qualquer época do ano. Em latitudes maiores, contudo, o florescimento é sazonal, ocorrendo principalmente no outono, quando o fotoperíodo está decrescendo, isto é, quando as plantas estão concluindo o período vegetativo. Aparentemente, há também necessidade de um período de crescimento vegetativo vigoroso, antes do período de indução, pois para a formação da panícula há utilização de açúcares armazenados anteriormente, com consequente chochamento da parte superior do colmo. Tais condições ocorrem no outono, inviabilizando o florescimento na primavera.

Assim, uma regra quase geral que pode ser depreendida é que no hemisfério sul o estímulo e a diferenciação meristemática para a formação da flor ocorrerão nos meses de fevereiro, março e abril, havendo florescimento nos meses de abril, maio e junho. Já no hemisfério norte, a diferenciação ocorreria em agosto, setembro e outubro, com a consequente floração de outubro a janeiro (Rodrigues, 1995).

A ocorrência de florescimento, segundo Coleman (1963) é também dependente das condições de umidade do solo, fotoperíodo e temperatura do ar. Neste sentido, Pereira et al. (1983) estabeleceram que para a variedade NA56-79, o florescimento pode ser previsto pela contagem do número de dias com temperatura mínimas acima de 18ºC e máximas abaixo de 31ºC, no período que vai de 25 de fevereiro até 20 de março, como segue:

$$IF = 1{,}263 - 0{,}06764 \cdot X_1 - 0{,}02296 \cdot X_2 \qquad (1)$$

em que: IF é um indicador da probabilidade de ocorrer o florescimento, sendo que para IF=0, há 50% de probabilidade do florescimento ocorrer; para IF<0 o florescimento deve ocorrer e, para IF>0, não haverá florescimento; X1 é o número de noites com temperatura mínima acima

de 18ºC durante o período indutivo; X2 é o número de dias com temperatura máxima abaixo de 31ºC durante o período indutivo.

Em média, os anos com florescimento apresentaram 18 noites com temperatura mínima maior ou igual a 18 °C e 21 dias com temperatura máxima menor ou igual a 31 °C; os anos sem florescimento apresentaram 7 noites e 13 dias, respectivamente.

O trabalho de Coleman (1963) permite também estimar a intensidade do florescimento em canaviais (Figura 10). Assim como os demais eventos fisiológicos da cultura, o florescimento também sofre influência de um complexo de fatores, envolvendo também a radiação solar, a maturidade da cultura e a fertilidade do solo.

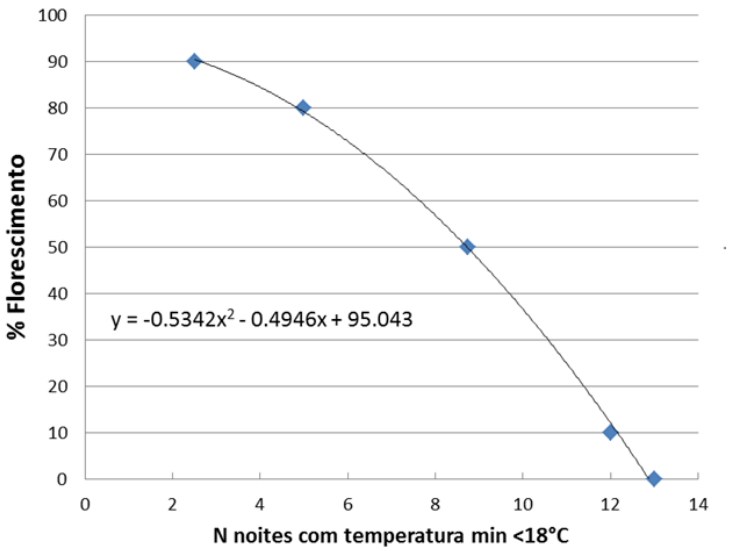


Figura 10 - Relação entre número de noites com temperatura abaixo de 18ºC no período indutivo e intensidade do florescimento (em porcentagem)

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 realçam que a temperatura noturna tem maior importância no florescimento, mormente 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. A existência de um limite superior de temperatura sugere que a diferença entre as temperaturas extremas, durante o ciclo indutivo, também tem efeito sobre o florescimento. Em geral, o florescimento é induzido por pequenas diferenças entre temperatura máxima e mínima, desde que temperatura mínima seja maior ou igual a 18°C. Sobre isso, pode-se estabelecer que: a) nos anos sem florescimento, a diferença média de temperatura variou entre 10°C e 14°C; b) a diferença de temperatura variou entre 3,4 e 16,4°C nos anos com florescimento, e entre 6,2 e 22,2°C nos anos sem florescimento; e c) os anos com florescimento apresentaram cerca de 90% dos dias com diferenças menores que 13°C (ou seja, a diferença entre 31°C e 18°C), contra 60% nos anos sem florescimento.

Outro aspecto a ser abordado trata da ocorrência de seca durante o período da indução do florescimento como inibidor desse processo. Evidentemente, a amplitude térmica diminui em períodos chuvosos e o efeito da chuva foi discutido por PEREIRA et al. (1983), apontando que anos com florescimento tinham cerca de 200 mm de chuva em 10 dias, contra 65 mm em 6 dias, nos anos sem florescimento. Nesse sentido, uma técnica de sucesso utilizada em canaviais irrigados do Havaí é a suspensão da irrigação entre 10 de agosto a 20 de setembro, a fim de se provocar estresse hídrico na planta e evitar o florescimento. A cana-de-açúcar apresenta uma idade cronológica e fisiológica em que ela se encontra apta a receber o estímulo para a floração. Essa idade varia de 4 a 5 meses para cana planta, e, de 3 a 4 meses para cana soca. Um indicativo prático é o desenvolvimento da cana, ou seja, ela estará apta a receber o estímulo para a floração quando apresentar colmos com 4 a 5 entrenós visíveis.

Normalmente, atribui-se ao florescimento perda de massa de colmos e queda no teor de sacarose. STEHLE (1955) observou grande variabilidade em experimentos, embora tenha constatado que anos com alto nível de florescimento, o teor de sacarose, o brix, e a pureza do caldo foram menores que em anos sem florescimento. LOPES-HERNANDEZ (1965) (apud Rodrigues, 1985) observou que o efeito do florescimento se manifesta nos seis entrenós superiores e que no sétimo entrenó e inferiores a concentração de sacarose sofre pouca influência do florescimento. Nos seis entrenós superiores ocorreu diminuição de 17% na quantidade de caldo.

3.2.1.5 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 chamada fase de

maturação. 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 alongamento 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 no 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 da temperatura e a diminuição das precipitações, até seca total no meio do ano, são as determinantes neste processo.

Após alcançar o ponto de máximo de acúmulo de sacarose, o atraso na colheita do canavial provoca queda no seu rendimento industrial, o que exige um planejamento operacional adequado da 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.

A maturação da cana-de-açúcar pode ser considerada sob três diferentes pontos de vista: botânico, fisiológico e econômico. Botanicamente, a cana-de-açúcar está madura após a emissão de flores e formação de sementes que possam dar origem a novas plantas. No seu ciclo, normalmente a cana-de-açúcar atinge a maturação botânica antes de atingir a fisiológica. Fisiologicamente, a maturação é alcançada quando os colmos atingem o seu potencial de máximo armazenamento de sacarose, conceito que se aproxima do critério econômico, em que se considera a cana madura, ou em condições de ser industrializada, quando esta atinge um teor de sacarose acima de um valor mínimo pré-estabelecido (Deuber, 1988).

Clements (1962) descreveu o amadurecimento de cana como sendo a senescência fisiológica da planta, que ocorre entre as fases de crescimento e morte. Também colocaram que, geralmente, o amadurecimento é representado pelo processo de acúmulo de sacarose nos colmos de cana (Legendre, 1975), que ocorre a partir dos entrenós basais até o ápice, até se chegar 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 reservatório 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 prognostico da concentração de sacarose em função das condições ambientais.

Para as variedades brasileiras, a formação dos entrenós ocorre a partir de 90 ºC·d (temperatura base de 10ºC) na fase inicial do cultivo, passando a ser emitidos em intervalos mais longos conforme a cultura se desenvolve (Marin & Jones, 2014). Nas variedades sul-africanas, esse intervalo chaga à 169 ºC·d (Singels et al, 2008) enquanto que as variedades brasileiras raramente passam de 130 ºC·d (Marin et al., 2011; Marin et al. 2012). Durante o crescimento, o teor de sacarose é sempre maior em entrenós basais (mais velhos) e mais baixa no topo dos colmos, onde a presença de folhas verdes, o maior teor de fibra e a altas concentrações de hexoses resultam em baixos níveis de sacarose (Figura 11) (Alexander, 1973). A medida que os entrenós imaturos se desenvolvem, as taxas de crescimento tendem para zero quando os entrenós estão totalmente amadurecidos (Glasziou, 1960; Glasziou, 1961). Esta representação do processo de acúmulo de sacarose foi utilizada por Marin & Jones (2014) e também no presente trabalho para modelar o teor de sacarose no colmo da cana-de-açúcar.

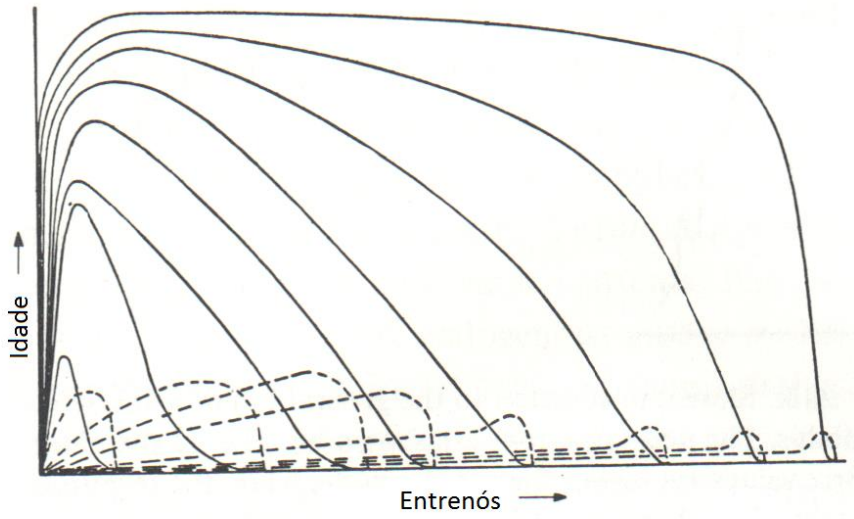


Figura 11 - Representação esquemática da concentração de glucose e sacarose em colmos de cana-de-açúcar com o avanço da idade e a posição dos entrenós. Sacarose está representada em linhas sólidas. No eixo das abscissas, a esquerda representa a base da planta. No eixo das ordenadas, a idade é crescente de baixo para cima. Adaptado de Alexander (1973).

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. O APSIM-Sugar (Keating et al, 1999; O'Leary, 2000), por exemplo, estima o teor de água com o material

estrutural do colmo e sua idade. Assim sabe-se que para cada grama de colmo produzida certo teor de água é acumulado, variando de acordo com a idade. O teor de água também se relaciona com o acúmulo de sacarose, diminuindo ao passo que a sacarose acumulada aumenta. Havendo bom suplemento de água, o acumulo de água no colmo também pode ser relacionado com a variação da temperatura do ar (Martiné et al., 1999).

De acordo com Alexander (1973), o conteúdo de água no colmo tem forte relação com o acúmulo de sacarose no colmo e um número de estudos foram realizados sobre o conteúdo de sacarose e o teor de água no colmo. Um aspecto fisiológico destacado por ele como crucial para o entendimento da relação entre esses dois constituintes do material vegetal está no fato da água ser essencial no colmo para manter a pressão de turgescência e a circulação normal nesse tecido enquanto a planta sintetiza e acumula açúcares. Segundo ele, o conhecimento mecanístico do papel da água no armazenamento de sacarose ainda é relativamente pequeno a despeito da importância desse processo fisiológico para o sistema de produção da cana-de-açúcar. Nesse campo, dois fatos onde já se obteve algum conhecimento são: a) a quantidade de água que de fato atua nas reações bioquímicas é muito pequena e, b) é praticamente impossível isolar a água e toma-la como variável de fato controlável no colmo para fins de experimentação.

Vale destacar, contudo, que no estudo de Bull & Glasziou (1963) identificou-se uma relação mais forte da umidade do colmo com o teor de fibra da espécie do que propriamente com a concentração de sacarose (Figura 12), o que sugere que na cana-de-açúcar os efeitos da alta pressão osmótica no colmo não impedem a continuidade do processo de acúmulo de sacarose.

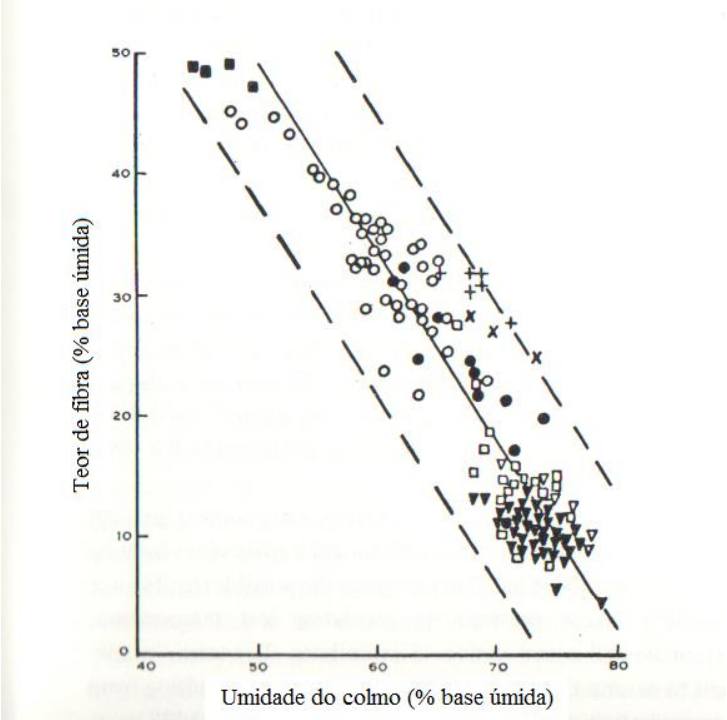


Figura 12 - Relação entre umidade e teor de fibras no colmo para vários membros do gênero *Saccharum*. Adaptado de Bull & Glasziou (1963) por Alexander (1973)

3.3 Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar

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 contêm 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).

O IPCC apresentou no Quarto Relatório de Avaliação (AR4, Trenberth et al., 2007) as estimativas recentes de aumento de temperatura, que estão na faixa de 1,8-3,6ºC e de aumento na concentração de CO_2 atmosférico ([CO_2]), podendo chegar a 720 ppm em 2090-2099, dependendo do cenário de emissões de gases de efeito de estufa considerado nos modelos climáticos (Trenberth et al., 2007). 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 & 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.

A cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo C4, 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 C4 fechar parcialmente os estômatos, reduzindo a condutância estomática e a transpiração quando submetidas a elevadas concentrações de CO_2.

Há pouco tempo atrás, acreditava-se que as plantas C4 não responderiam a incrementos na [CO_2], em acordo com os estudos de Ottman et al. (2001) para sorgo, Leakey et al. (2006) para milho e Maherali et al. (2002) para uma gramínea de ciclo C4 nativa do Texas, Estados Unidos. Contudo, estudos em cana-de-açúcar publicados por Ziska & Bunce (1997), Vu et al. (2006), Souza et al. (2008) e Vu & Allen Jr (2009a) reportaram incrementos de fotossíntese e acúmulo de biomassa expressivos em resposta a elevação na [CO_2] mesmo em plantas sem estresse hídrico e/ou nutricional, e conduzidas sob diferentes desenhos experimentais e condições climáticas. Por exemplo, Souza et al. (2008) e Vu & Allen Jr (2009a) reportaram incremento de 30% na fotossíntese e de 40% na produção de biomassa em plantas crescendo em câmaras de topo-aberto com [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 a discussão em torno desses trabalhos ainda seja calorosa na comunidade científica, parece razoável aceitar que a [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. Essa resposta positiva e significativa em relação a [CO_2] elevada sugere que o sítio de carboxilação da Rubisco não é de fato saturada com CO_2 como se esperava teoricamente. Este fato, por sua vez, pode estar relacionado com a baixa disponibilidade de CO_2 na bainha vascular e dificuldade no transporte de moléculas de quarto carbonos do mesofilo até as células da bainha vascular. Esta inferência se baseia principalmente em publicações dando evidencia da resposta da cana-de-açúcar a [CO_2] elevada mesmo quando a planta não enfrenta qualquer tipo de estresse (Tabela 1). Neste sentido, vale destacar o estudo de Marchiori (2010) mostrando respostas significativas de curto prazo na fotossíntese em relação a [CO_2] elevada em 3

diferentes variedades de cana-de-açúcar em condições de campo, com incrementos entre 27% e 37% para a [CO_2] subindo de 380 ppm para 600 ppm. Ainda, de acordo com Ghannoum et al. (2000), duas possíveis explicações para esse expressivo ganho de performance da cana-de-açúcar sob atmosfera modificada são: (i) aumento na taxa fotossintética decorrente da elevação na concentração intercelular de CO_2; e (ii) melhoria nas relações hídricas da copa e elevação da temperatura foliar devido à redução na condutância estomática. Os dados experimentais de Marchiori (2010), por exemplo, confirmam um aumento expressivo na taxa fotossintética da cana-de-açúcar cultivada sob [CO_2] elevada (Figura 13).

Tabela 1 - Respostas [(1)] de crescimento (G) e fotossíntese (P_N) em algumas espécies expostas à atmosfera enriquecida em CO_2

Espécie	Exposição de CO_2		G	P_N	Referência
	Tempo	ppm			
B. ischaemum	2 anos	550	n.a.	+	Anderson et al. (2001)
P. conjugatum	90 dias	710	-	-	Ziska et al. (1991)
F. trinervia			+	+	
P. miliaceum	31-40 dias	700	=	+	Ziska et al. (1999)
Pannicum maximum			=	+	
Sorghum bicolor	60 dias	700	n.a.	-	Watling et al. (2000)
S. bicolor	60 dias	570	=	+	Cousins et al. (2001)
S. bicolor	79 dias	570	-	n.a.	Derner et al. (2003)
Saccharum spp.	1 ano	720	+	+	De Souza et al. (2008)
S. officinarum	70 dias	720	+	=	Vu et al. (2006)
	120 dias	720	n.a.	+	Vu & Allen Jr. (2009a)
	90 dias	720	+	=	Vu & Allen Jr. (2009b)
Zea mays	30 dias	1100	+	+	Maroco et al. (1999)
	56 dias	720	-	-	Prins et al. (2011)
Sete gramíneas C4	180 dias	660	+	+	Wand et al. (1999)

[(1)] '+' significa aumento; '-' significa redução; '=' significa sem resposta; e 'n.a.' significa não disponível. Extraída de Marin et al. (2014).

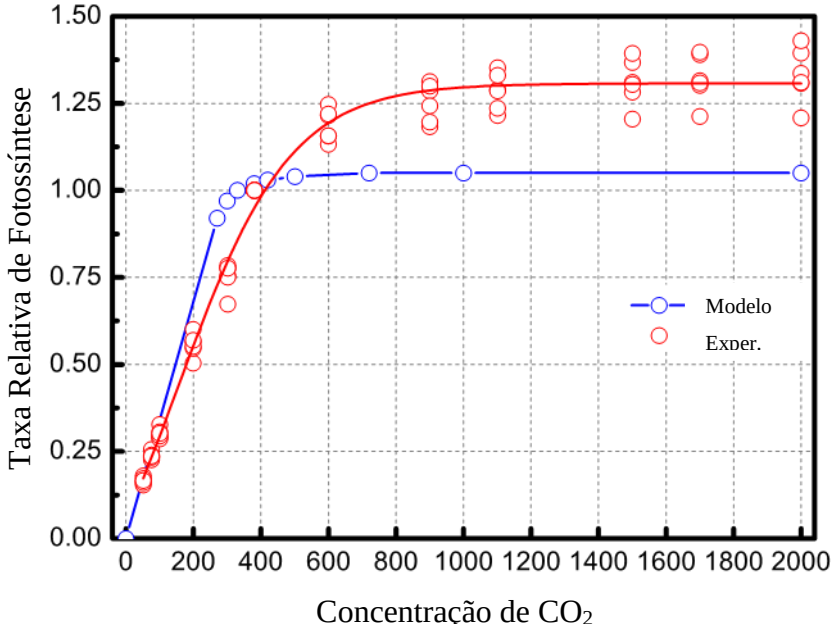


Figura 13 - Variação relativa da taxa fotossintética em função da concentração de CO2 atmosférico, como considerado no modelo DSSAT/CERES-Maize (e também no modelo DSSAT/CANEGRO) (cículos azuis) e medidas realizada em variedades de cana-de-açúcar em condições de campo (círculos vermelhos) por Marchiori (2010)

As respostas de espécies C4 ao aumento na [CO_2] atmosférica 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 dessas 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). 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, consequentemente, 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.

No entanto, conforme Tabela 2, o aumento significativo na fotossíntese e produção de biomassa, mesmo sob condições irrigadas e sem restrição nutricional foram relatadas por alguns autores em cana-de-açúcar (Vu et al., 2006; Souza et al., 2008 e Vu & Allen Jr., 2009). Eles reportaram um aumento de 30% na fotossíntese e 40% na biomassa produzida para plantas que cresceram em [CO_2] = 720 ppm, em câmaras de topo aberto e também uma redução na condutância estomática e transpiração de mais de 30%.

No experimento de Vu et al. (2006), em que nas concentrações de 720 ppm de CO_2, foram incluídos tratamentos com temperatura do ar elevada combinada com a elevação da [CO_2], observando-se aumentos ainda maiores de massa seca do colmo (+84%) e de caldo (+124%), em comparação com o tratamento em que [CO_2] foi elevada mantendo-se a temperatura constante, a cana-de-açúcar apresentou redução de até 51% na condutância estomática e 39% na transpiração, resultando em 31% mais área foliar e 50% em produtividade. Apesar das possíveis diferenças que podem ser esperadas em condições de campo, os resultados de Souza et al. (2008) e Vu & Allen Jr (2009) indicam que a fertilização de CO_2 tem efeito pronunciado sobre a produção de cana. Assim, menores valores de condutância estomática ajudariam a reduzir o fluxo de seiva e aumentariam o potencial de água no xilema, levando a uma melhoria no status hídrico da planta (Owensby et al., 1997).

Tabela 2 - Resposta da cultura da cana-de-açúcar à elevação da [CO_2] para 720 ppm para a fotossíntese, biomassa, condutividade foliar à difusão de vapor (gs), transpiração e produtividade de água (Prod. Água)

Referências	Fotossíntese	Biomassa	gs	Transpiração	Prod. Água
Vu et al. (2006)	+8-17%	+37%	-51%	-39%	+26-52%
Souza et al. (2008)	+30%	+40%	-37%	-32%	+62%
Vu & Allen Jr. (2009)	+26%	+12-71%	-34%	-25%	+35%

Como o aumento na [CO_2] atmosférica, eleva-se o gradiente que comanda a difusão de CO_2 da atmosfera para o cloroplasto. Com isso, pode-se esperar maiores taxas de fotossíntese para uma mesma condutância estomática. Em paralelo, mantendo-se o mesmo déficit de pressão de vapor nos sítios de evaporação estomáticos, tem-se redução na taxa de transpiração. Com isso, em última análise, a elevação na [CO_2] melhoraria a eficiência do uso da água, reduzindo

os períodos de esgotamento da umidade do solo e amenizando o período de estresse durante a estação seca (Leakey, 2009). No entanto, destaca-se que o fechamento dos estômatos, geralmente observado quando a [CO_2] é elevada, pode estar associado com menor perda de calor latente e consequente elevação na temperatura foliar (Kimball & Bernacchi, 2006).

Allen et al. (1985) sintetizou uma relação matemática relacionando a [CO_2] com o aumento da resistência estomática de milho doce, tendo como base o trabalho de Rogers et al. (1983). Estes dados resultaram em na seguinte relação empírica:

$$r_s = \left(3.28 \cdot 10^{-2} - 5.49 \cdot 10^{-5} \cdot [CO_2] + 2.96 \cdot 10^{-8} \cdot [CO_2]^2\right)^{-1} \quad (2)$$

em que: rs é a resistência foliar à difusão de vapor d'água (s m^{-1}), e [CO_2] é a concentração de CO_2 expresso em mmol mol^{-1}

A Eq. 2 fornece estimativas de resistência estomática de 62 e 135 m s^{-1}para [CO_2] de 380 e 880 mmol mol^{-1}, respectivamente. Apesar da Eq. 2 ter sido derivada a partir de dados coletados no milho doce, esses valores são similares aos observados em cana-de-açúcar cultivadas em ambientes enriquecido com CO_2 por Venkataramana et al. (1986), Grantz & Meinzer (1990), Souza et al. (2008) e Vu & Allen Jr. (2009) e dão boa indicação sobre uma abordagem viável para a modelagem desse processo em cana-de-açúcar.

A elevação da [CO_2] em plantas C4 tem como consequência o aumento na 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 a 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 a 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 do [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 confidência às simulações desta natureza.

Por outro lado, a relevância das diferenças espécies-dependentes na aclimatação fotossintética a [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, pode-se considerar os dois modelos atualmente mais utilizados no mundo quanto ao modo como as respostas a elevação do [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 de transpiração (TUE) e da eficiência de uso da radiação (RUE) por valores modificadores ("TUE e RUE CO_2 modifiers"), como utilizado por Howden et al. (2007), Webster et al. (2009) e Biggs et al. (2013):

$$\text{TUE-}CO_2\text{-modifier} = 0{,}0008 \cdot [CO_2] \tag{3}$$

$$\text{RUE-}CO_2\text{-modifier} = \left(\frac{1}{350} \cdot 0{,}05\right) \cdot [CO_2] + 0{,}95 \tag{4}$$

em que: TUE-CO_2-modifier é um fator modificador da produtividade de água pela transpiração e RUE-CO_2-modifier é um fator modificador da "eficiência" de uso da radiação solar.

O modelo DSSAT/CANEGRO, por sua vez, computa uma baixa resposta direta da fotossíntese (Figura 13) e uma resposta mais pronunciada da transpiração em relação a [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 (Eq. 2 discutida acima). O modelo DSSAT/CANEGRO DC também utiliza um fator de ajuste para a evapotranspiração de referência derivado de razão teórica entre a 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 a fotossíntese, o modelo DSSAT/CANEGRO calcula o incremento diário de biomassa (PG, g m^{-2} d^{-1}) baseada na abordagem da eficiência de uso da radiação (Singels & Bezuidenhout, 2003) e um algoritmo para computar a fertilização decorrente da [CO_2] elevada (Singels et al. 2013), como segue:

$$P_G = FI \cdot PAR \cdot RUE \cdot R_{PG} \quad (5)$$

em que FI é a fração de interceptação da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (PAR, MJ m^{-2}) e RUE é a eficiência de uso da radiação (g MJ^{-1}). O valor padrão para P_G em $[CO_2]$=330 ppm é então ajustado pelo fator de ajuste (R_{PG}) que depende da $[CO_2]$. O valor de R_{GP} é calculado pela interpolação de um conjunto de pontos coordenados. Cada um desses pontos é definido no arquivo de espécies do Sistema DSSAT e uma função derivada do milho (extraída do código-fonte da versão de 2011 do DSSAT v 4.5), como mostra a linha azul na Figura 13.

3.4 Cenários de expansão da cana-de-açúcar no Brasil à luz da ciência climática e fisiológica

Os resultados do Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (Manzatto et al., 2009) (Figura 5) mostraram a disponibilidade de 66 10^6 ha de áreas aptas à expansão do cultivo com cana de açúcar, sendo 19,3 10^6 ha foram considerados com alto potencial produtivo, 41,6 10^6 ha como médio e 5 10^6 ha como de baixo potencial para o cultivo. A região Centro Oeste apresenta o maior percentual de terras aptas à expansão do cultivo com cana-de-açúcar com 45% do total estimado, seguida pela Região Sudeste (34,5%), Sul (11,2%), Nordeste (7,6%) e pelo Estado do Tocantins, na Região Norte (1,7%).

Apesar da boa regularidade e elevados volumes de chuva na maior parte do Brasil durante o verão, o longo período de estiagem é limitador do acúmulo de biomassa por causa da baixa umidade do solo durante praticamente todo o outono e o inverno. Tal limitação hídrica acarreta o fechamento dos estômatos e, consequentemente, queda nas taxas de fotossíntese especialmente entre os meses de Abril e Novembro, compreendendo a fase final de crescimento vegetativo, a fase de maturação e o início do período de perfilhamento da cultura.

Considerando a reação da cana-de-açúcar à fertilização pelo CO_2 atmosférico elevado, esse quadro de estresse por deficiência hídrica poderia ser reduzido caso as projeções climáticas fossem confirmadas. Disso decorre que as áreas que hoje apresentam certa limitação à produção canavieira por causa do estresse hídrico devem ser mais beneficiadas que aquelas hoje ocupando regiões adequadas à produção de cana-de-açúcar quanto ao suprimento hídrico.

Tais informações são interessantes no presente contexto, uma vez que revelam a tendência de expansão da cana-de-açúcar para uma região onde o estresse hídrico relativamente maior é uma das principais limitações à obtenção de rendimentos elevados. Grande parte da

área para o cultivo futuro da cana-de-açúcar ocorrerá em áreas de pastagens degradadas, principalmente na região Centro-Oeste, onde é necessária a utilização da irrigação da cana-de-açúcar, tanto de salvamento como complementar, durante a estação seca, ou irrigação plena, sendo outro indicador do estresse hídrico enfrentado pela cultura no cerrado brasileiro (Manzatto et al., 2009). Em outras regiões produtoras do país, mesmo em solos arenosos do Oeste e do Pontal do Paranapanema no Estado de São Paulo, a implantação de sistemas de irrigação tem sido estudada e essa parece uma tendência a médio e longo prazo. Já na região Nordeste do Brasil, devido às condições climáticas, principalmente nos tabuleiros costeiros, é comum a utilização da irrigação complementar na cultura, o que evita o prejuízo com a morte de soqueiras e necessidade de renovação precoce do canavial (Farias et al., 2008). Assad et al. (2008) demonstraram que apesar de a cultura da cana-de-açúcar apresentar uma projeção de aumento de área apta ao cultivo, algumas regiões como o Centro-Oeste do Brasil poderiam tornar-se mais dependentes da irrigação complementar. Com base em Marin et al. (2012) e Singels et al. (2013), contudo, é possível inferir que o ganho em produtividade de água decorrente da elevação da [CO_2] poderia reduzir essa tendência ou mesmo revertê-la, tornando as condições de estresse hídrico na região Centro-Oeste mais favoráveis à produção de cana-de-açúcar mantendo-se as mesmas condições de uso de água para a irrigação.

Considerando também as projeções climáticas para o Brasil, observa-se tendência de redução no volume de chuvas durante o verão, estabilidade no inverno para a região Centro-Sul e redução no volume de chuvas no inverno e estabilidade no verão para a região Nordeste (Alves & Marengo, 2010). Associando-se tais cenários às projeções de aumento de temperatura, poder-se-ia esperar um impacto negativo sobre a produção de cana-de-açúcar. No entanto, quando se inclui o efeito da elevação da [CO_2] na cultura, o aumento da eficiência do uso da água pode compensar a queda na disponibilidade de água, mantendo a perspectiva de um cenário mais positivo para a cana-de-açúcar cultivada no Cerrado do Brasil (Marin e Nassif, 2013). Nessa linha, é possível também inferir que mesmo no Sudeste do Brasil, nas regiões com ambientes de produção D e E nas áreas tradicionais de cultivo da cultura, haja melhor aproveitamento da água disponível e redução do estresse fisiológico durante os períodos de estiagem, tornando tais áreas mais aptas ao cultivo da cana-de-açúcar (Marin & Nassif, 2013).

3.5 Mudanças tecnológicas no sistema de produção

O impacto das mudanças climáticas vem sendo alvo de estudos para a 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 da 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 de 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, notadamente o bagaço. Esse 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 mencionar, uma tendência aparentemente pouco promissora sob o ponto de vista econômico no Brasil é a produção comercial de etanol celulósico, também conhecido como de segunda geração.

Tanto nas áreas de expansão canavieira como nas regiões tradicionais, a retirada da palhada para a produção do 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 (Thorburn et al., 2004; Thorburn et al., 2002; Vallis et al., 1996). No Brasil, o nível desse impacto vem sendo alvo de experimentos de campo, mas estudos baseados em modelos baseados 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 do 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 (Thorburn 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 a irrigação. Na região Nordeste do Brasil, tanto nos tabuleiros costeiros como no semiárido, as condições edafoclimáticas tornam necessário o uso da irrigação para elevar a produtividade e evitar prejuízos com a 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 ex. 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 das 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 emissões e contaminação de sub-superfície vem sendo supridas por trabalhos recentes (Carmo et al., 2012; Vale et al., 2013), mas o conhecimento especializado (“expertise”) em modelagem de tais processos ainda é 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 da palhada, balanço hídrico do solo, irrigação e mudança climática na simulação de cenários, tornando tais projeções mais próximas da aplicação prática.

Como abordado, os dois MCP´s mais robustos atualmente são o APSIM-Sugar (Keating et al., 2003) e o DSSAT/CANEGRO (Singels et al., 2008). Marin et al. (2011) e Nassif et al. (2012) avaliaram o modelo DSSAT/CANEGRO com foco no efeito nas propriedades físicas do solo, clima e irrigação. Algoritmos para nitrogênio e carbono no solo estão disponíveis no modelo DSSAT/CANEGRO, mas os testes estão ainda restritos aos sistemas de produção da África do Sul e não foram incorporados à versão disponível para usuários finais. Os dados de entrada do APSIM-Sugar são basicamente os mesmos do DSSAT/CANEGRO, mas há diferenças estruturais em relação ao modelo DSSAT/CANEGRO, além de uma extensa aplicação e avaliação do APSIM-Sugar 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 e palhada serão focadas apenas no modelo APSIM-Sugar.

3.6 Eficiência da produção agrícola

Até 2050, a população mundial aumentará em aproximadamente 30%, e a maior parte desse adicional de 2 bilhões de pessoas viverão em cidades de países em desenvolvimento (Godfray et al., 2010). Projeções recentes indicam que a produção agrícola precisará ser elevada em até 60% até 2050, caso as tendências de incremento de renda e consumo mantenham-se nos padrões atuais (Bruinsma, 2003; Lobell et al., 2009). Até cerca de uma década atrás, pouco se discutia sobre a necessidade de elevação da produtividade agrícola em escala global. Ao contrário, simulações com modelos computacionais de equilíbrio geral projetavam a manutenção ou mesmo a queda de preços agrícolas (van Ittersum et al., 2013). Atualmente, vê-se uma notável mudança dessa percepção, com um aparente consenso de que a manutenção do modelo agrícola atual pode acarretar em aumento dramático dos preços de alimentos, da pobreza e da fome no mundo.

Nas próximas décadas, portanto, cada hectare arável precisará ter produtividade expressivamente maior que aquelas observadas atualmente. No Brasil, os setores com elevada demanda por terra serão os mais pressionados pela disputa no uso do solo (Zafalon, 2013), e o setor canavieiro está entre eles. O negócio da cana-de-açúcar tem grande relevância socioeconômica no país por causa da elevada geração de empregos (Oliveira, 2011) e divisas na balança comercial (Ferreira et al., 2009), bem como por sua função estratégica na matriz alimentar e energética do país (Pereira et al., 2012). Também atrai atenção por sua histórica relevância política no país (Canabrava, 2005) e por ser o Brasil o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados.

Daí, também se depreende que algumas regiões do mundo têm potencial de incremento produtivo, em condições sustentáveis (Licker et al., 2010), maiores que outras, por causa das melhores condições de solo, clima e, em alguns casos, pelo acesso à irrigação. Dada a necessidade de intensificação da agricultura, a identificação das regiões com os melhores potenciais de incremento da eficiência produtiva é importante pelas seguintes razões: 1) a análise da eficiência da produção agrícola fornece subsídios para identificar os principais fatores (genéticos, manejo de solo, água e planta) limitantes à produtividade; 2) por permitir priorização de recursos para a pesquisa, desenvolvimento e intervenção; 3) por permitir a avaliação do impacto das mudanças climáticas e cenários agrícolas futuros nas culturas e no

uso do solo; e 4) os resultados deste tipo de análise são dados de entrada para modelos econômicos de equilíbrio geral e parcial, ferramentas utilizadas para projeções futuras de segurança alimentar e uso da terra.

Neste contexto, vale a pena relembrar as definições associadas à produtividade agrícola, que podem ser reunidas em três grandes grupos: produtividade potencial, produtividade atingível e produtividade real. De modo geral, a produtividade real é o termo mais familiar àqueles que estão envolvidos com o setor produtivo, uma vez que os dados comerciais ou mesmo as estatísticas oficiais de produtividade da cana-de-açúcar são valores que informam sobre a produtividade real (ou atual) de um talhão ou de uma região produtora. Por definição, produtividade real (Yr) é a produtividade alcançada de fato em condições operacionais de uma usina, no caso da cana-de-açúcar em talhões agrícolas comerciais. Para representar a variabilidade espaço-temporal observada em uma dada região, utiliza-se um valor médio (no tempo e no espaço), que representaria o padrão tecnológico adotado. A produtividade potencial (Yp) é definida com a aquela obtida por um genótipo adaptado sob condições ótimas de cultivo, sem qualquer fator limitante (água) ou redutores, (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento. Por fim, tem-se que a produtividade atingível (Yw) é aquela obtida por um genótipo adaptado sob condições reais de cultivo, sob influência desfavorável de um ou mais fatores limitantes (água) ou redutores, (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento.

Segundo van Ittersun et al. (2013), o termo produtividade potencial (Yp) refere-se à produtividade de uma variedade agrícola crescendo sem limitação quanto ao suprimento hídrico ou nutricional e sem qualquer limitação quanto ao estresse biótico causado por pragas e doenças (Evans, 1993; van Ittersum & Rabbinge, 1997). Quando este mesmo cultivo cresce sob condições em que pode atingir Yp, a taxa de crescimento da cultura é determinada apenas pela radiação solar, a temperatura, a concentração de CO_2 na atmosfera ([CO_2]) e as características genéticas que controlam a duração do ciclo do cultivo e a interceptação de radiação pela copa da planta (i.e. arquitetura da copa). Portanto, Yp é específico de cada local por causa do clima, mas não do solo, porque em teoria o solo pode ter suas propriedades corrigidas por técnicas adequadas de manejo. Portanto, em áreas com boas condições de solo, Yp é mais relevante como referência para sistemas irrigados ou sob climas úmidos com adequado suprimento hídrico durante a estação de cultivo. Para cultivos de sequeiro, contudo, a produtividade limitada por água (Yw), equivalente à produtividade potencial decrescida apenas pelo estresse hídrico, parece mais adequada como indicador de referência de produtividade (ou como *benchmark* regional). Nos cultivos parcialmente irrigados, tanto Yp como Yw podem servir como úteis valores de referência. Portanto, a definição de Yw é similar à de Yp, porém em Yw

a cultura sofre algum estresse por falta d'água e, portanto, é dependente do tipo de solo que afeta a sua capacidade de retenção de água, a profundidade do sistema radicular e da topografia do terreno, que influencia o *runoff*. Tanto Yp como Yw são calculados para as melhores datas de plantio/semeadura, densidade populacional e variedades.

A produtividade média comercial (Ya) é definida como aquela de fato obtida pelos produtores, representando a variabilidade no espaço e no tempo numa dada região geográfica. Ela é definida pela média das produtividades obtidas pelos produtores da região envolvendo as mais variadas práticas de manejo (datas de plantio/semeadura e colheita, variedades, densidade populacionais, manejo nutricional e proteção da cultura contra pragas e doenças). O número de anos utilizado para estimar Ya precisa levar em conta um período suficientemente longo para considerar a variabilidade climática sem, contudo, confundir efeitos temporais associados às tendências de produtividade decorrentes da melhoria tecnológica ou mudança no clima (van Ittersun et al., 2013).

A diferença[2] (ou a razão) entre a produtividade real (Ya)[3], observada em condições operacionais, e a produtividade potencial (Yp)[4] (ou produtividade atingível limitada apenas por deficiência hídrica - Yw[5]) é um robusto indicador quantitativo que tem sido utilizado nesse tipo de análise (Lobell et al., 2009). A aplicação do conceito da eficiência de produção agrícola para o setor sucroenergético brasileiro pode fundamentar análises estratégicas sobre as trajetórias de custos e preços futuros de açúcar, etanol e energia, da demanda e custo por novas áreas, além da competição com outras atividades pelo uso do solo.

Como tanto Yp e Yw são definidos pela espécie, a variedade, o clima e o solo (no caso de Yw), fatores altamente variáveis dentro e entre regiões. Contudo, é impossível para uma grande gama de produtores atingir a perfeição em termos de manejo de solo e da cultura para alcançar Yp e Yw, e geralmente tais valores não são os ótimos sob o ponto de vista econômico (Lobell et al., 2009). Além disso, como as produtividades reais tendem a se estabilizar num patamar quando atingem entre 70–80% de Yp ou Yw, o yield-gap explorável (YGE) é menor

---

[2] Também denominada de "yield-gap", na língua inglesa ou como déficit de produtividade, em português. Essa relação também pode ser denominada eficiência de produção agrícola, termo adaptado do conceito termodinâmico da eficiência, dada pela razão entre produtividade real e a produtividade potencial (Marin et al., 2008; Marin e Carvalho, 2012).

[3] Produtividade atual é definida de como a produtividade alcançada de fato em condições operacionais de uma usina, no caso da cana-de-açúcar, talhões agrícolas comerciais. Para representar a variabilidade espaço-temporal observada em uma dada região, utiliza-se um valor médio (no tempo e no espaço), que representaria o padrão tecnológico adotado.

[4] Produtividade potencial (Yp) é aquela obtida por um genótipo adaptado sob condições ótimas de cultivo, favoráveis sem qualquer fator limitante (água) ou redutores, (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento. A produtividade potencial será utilizada como valor de referência para sistemas irrigados.

[5] Produtividade atingível (Yp_w) é aquela obtida por um genótipo adaptado sob condições reais de cultivo, favoráveis sob influência limitação de um ou mais fatores limitantes (água) ou redutores, (pragas, doenças, nutrientes) ao seu crescimento. No contexto deste projeto, o fator limitante considerado será a água, e a produtividade atingível será utilizada como valor de referência para sistemas produtivos de sequeiro.

que o valor de yield-gap (Van Ittersum & Rabbinge, 1997). Uma representação esquemática desses valores é apresentada na Figura 14.

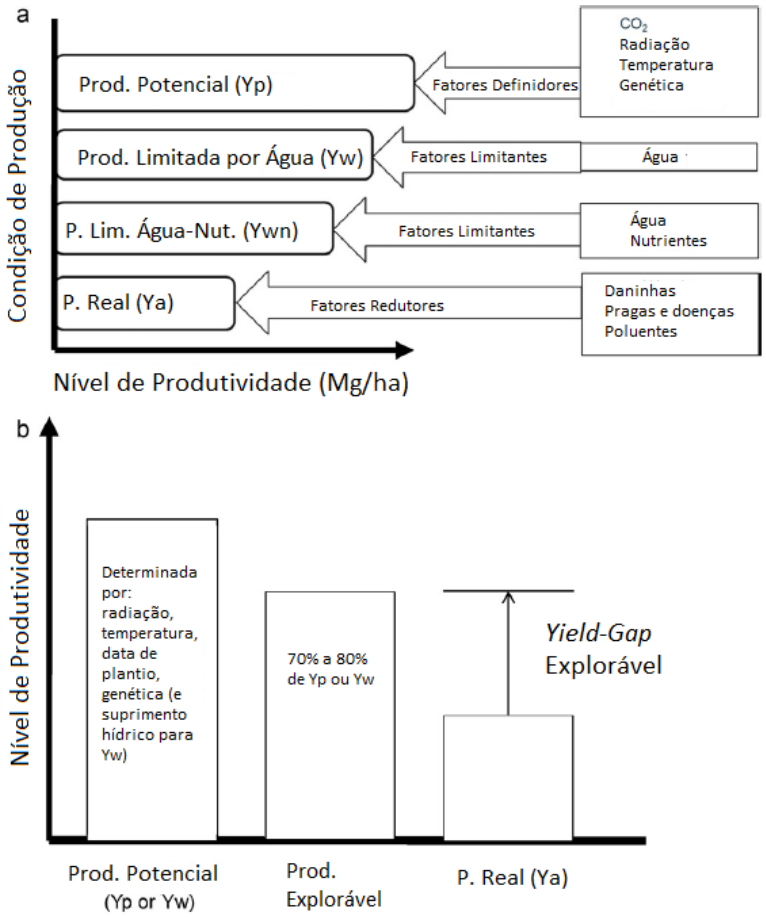


Figura 14 - Diferentes níveis de produção e seus respectivos fatores determinantes/limitantes (a). Produtividade potencial (Yp) de culturas sem limitação hídrica (Yw para culturas de sequeiro) e seus respectivos fatores determinantes é determinada pela radiação solar, regime térmico e duração do ciclo de cultivo. O yield-gap representa a diferença entre a produtividade explorável (70% a 80% de Yp ou Yw) e a produtividade real (Ya). Adaptado de van Ittersun et al. (2013)

A distribuição espacial desses fatores de produção nas diferentes regiões do Brasil também pode contribuir para indicar pontos de eventual tensão em contraste com áreas mais favoráveis para a expansão do setor. Essa abordagem pode ser ainda aplicada na projeção de cenários agrícolas futuros para a cana-de-açúcar brasileira, buscando-se antever como as mudanças mais prováveis (tanto em termos de clima como também no manejo dos canaviais) nas diferentes regiões do país devem alterar o cenário atual. Estimativas preliminares para o Estado de São Paulo indicam que os canaviais paulistas parecem atualmente render em torno de 50% de seu potencial produtivo (Marin et al., 2008; Marin & Carvalho, 2012). Contudo,

ainda não se sabe qual seria o nível de eficiência produtiva dos demais canaviais brasileiros, nem qual a eficiência agrícola dos canaviais (em termos médios e de variabilidade) projetada para as próximas décadas para o país.

Com base nesses dados, economistas podem encontrar bons subsídios para análises integradas do setor, a exemplo do que foi feito por Shikida et al. (2011) e Vian & Belik (2003), oferecendo base para a formulação de propostas de diretrizes de políticas públicas para o desenvolvimento econômico e regional. Outra aplicação dos dados sobre eficiência agrícola e projeções futuras ocorre em modelos computáveis de equilíbrio geral, que simulam o impacto de choques (neste caso, as possíveis variações de eficiência e produtividade ao longo do tempo) no setor agrícola e na economia de um país como um todo. Para dar suporte ao desenvolvimento e implementação de políticas relacionadas às mudanças no clima e na tecnologia, tais modelos poderiam prover ideias e perspectivas sobre os efeitos econômicos e sociais de choques nos padrões de produção no negócio da cana-de-açúcar (Wing, 2004). Com isso, tem-se, também, a possibilidade de análises mais amplas e úteis sobre os fatores econômicos e sociais a serem afetados por tais mudanças futuras e como decisões públicas e privadas poderiam amenizar danos ou otimizar ganhos oriundos de tais choques de produtividade.

3.7 Modelagem e simulação baseados em processos biofísicos da cultura da cana-de-açúcar

3.7.1. Conceitos e definições

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 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 mais 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., 1998a).

Conforme apresentado na Figura 15, o 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 dos dados. Os modelos mecanísticos, no entanto, têm uma rota relativamente mais longa, já que em 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 também 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.

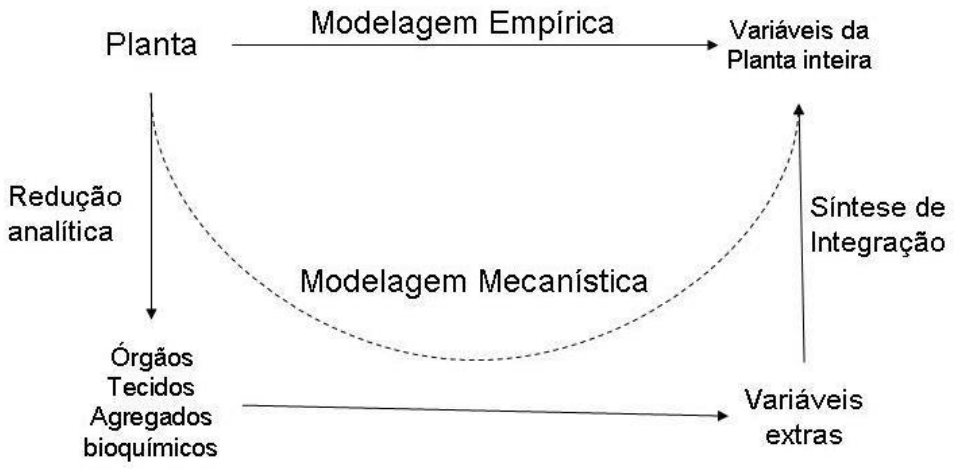


Figura 15 - Representação esquemática da relação entre modelagem empírica e mecanística (Adaptado de THORNLEY e JOHNSON, 2000)

Boote et al. (1996) classificaram três níveis de uso dos modelos de simulação de culturas: modelos utilizados em pesquisas, modelos para uso em análises tecnológicas sobre o manejo dos cultivos e modelos para suporte à política de planejamento agrícola. Cada um deles envolve uma escala espaço-temporal, um nível de detalhamento dos processos modelados e um nível de compromisso com a aplicação operacional.

Thornley & Johnson (2000), por sua vez, classificam os modelos em dois grupos principais: os de aplicação em pesquisas e os de aplicação prática (Tabela 3). Os modelos aplicados em pesquisa, por serem mais detalhados, baseados em processos e possuírem um maior número de parâmetros, tendem a apresentar respostas mais próximas da realidade. Já os modelos de aplicação prática, por serem mais simples e baseados em equações empíricas,

resultam em aproximações mais superficiais, tendo aplicações específicas para os pontos nos quais foram calibrados e maior dificuldade para extrapolação e condições de contorno mais limitadas. Atualmente, dada a boa disponibilidade de dados de entrada e mesmo o domínio relativamente avançado nas técnicas de simulação, tem-se cada vez mais utilizado os modelos de simulação inicialmente classificados como "pesquisa" em aplicações práticas, elevando a qualidade das predições e da tomada de decisão.

Tabela 3 - Modelos de pesquisa e modelos aplicados: comparação das principais diferenças (Adaptado de THORNLEY e JOHNSON, 2000)

Características	**Pesquisa**	**Aplicação Prática**
Hipóteses	Especulativa	Bem aceito
Conexões com dados observados	Tênue (geralmente)	Bom
Precisão das previsões	Variável	Bom
Escopo/Alcance	Amplo	Limitado
Complexidade	Complexo	Simples
Modelo	Mecanístico	Empírico

A modelagem de sistemas agrícolas baseada em processos biofísicos, isto é, realizada por modelos mecanísticos, apresenta diversas aplicações, sendo algumas delas descritas por Lisson et al. (2005) como: a) impacto do plantio e da colheita sobre a produtividade da cana-de-açúcar, onde os dados podem ser analisados para tomada da decisão mais adequada sobre melhor época de plantio e colheita; b) benchmarking dos limites de produção, potenciais e atingíveis, onde o conhecimento dos limites de produção permite o estudo da produtividade potencial em diferentes regiões; c) melhoria da eficiência do uso da água; d) previsão de produtividade. Em Liu & Bull (2001), por exemplo, tem-se um bom exemplo sobre a descrição do processo de simulação mecanística da acumulação de biomassa e sacarose na cana-de-açúcar.

Em resumo, 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 verbal escrita, ou ainda como um complexo conjunto de equações para ser utilizada na descrição numérica de um dado sistema. No contexto deste trabalho, pode-se definir modelos de culturas como um simulador dinâmico do crescimento de um cultivo por meio de integração numérica de seus processos biofísicos constituintes com a ajuda de computadores, sendo,

portanto, uma técnica para a construção de uma “cópia” relativamente transparente da cultura no campo (Sinclair & Seligman, 1996).

Modelo pode, também, ser definido como um conjunto de algoritmos organizados que descrevem um sistema. Segundo Soler (2004), um modelo simula uma cultura pela estimativa do crescimento de seus componentes como folhas, raízes e caule. Assim, um modelo de crescimento de cultura não somente estima a biomassa total, mas também inclui mais informações quantitativas sobre a maioria dos processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento vegetal. Monteith (1996) definiu que modelos de simulação de cultura são como um conjunto de equações relacionadas a processos biofísicos para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura a partir de coeficientes genéticos e de variáveis ambientais, permitindo analisar diversos componentes da produção.

O entendimento básico e a consideração dos processos biofísicos-chave para a cultura, e as interações com outros processos no sistema de produção agrícola são os fundamentos para a modelagem de culturas agrícolas. Baseado nesses princípios vários sistemas de suporte à decisão podem ser construídos como ferramenta de suporte a gestão de um setor da agricultura. Exemplos de aplicações são: a seleção de genótipos ou locais para instalação de novas áreas produtivas; avaliação estratégica das melhores formas de manejo de cultivos; investimentos em infraestrutura e decisões de marketing (Lisson et al., 2005).

A necessidade por sistemas dessa natureza emergiu principalmente no início da década de 1990 como uma consequência da aplicação da análise sistêmica ao setor agrícola. Isso, por sua vez, foi viabilizado principalmente pelo aumento na necessidade de informações para a tomada de decisão no setor como decorrência do aumento nas pressões sociais e políticas envolvendo o uso da terra, da água e outros recursos naturais (Jones et al., 2003). Com isso, a geração de novos dados através do pensamento tradicional da pesquisa agrícola e sua publicação não eram suficientes para atender essa demanda. Experimentos agronômicos tradicionais são conduzidos em parcelas experimentais definidas no espaço e no tempo, tornando, portanto, os resultados derivados específicos no espaço e no tempo, demandantes de tempo e de grande montante de recursos financeiros. Neste sentido, McCown et al. (1996) afirmam que entre as muitas mudanças que se observaram na agricultura e nas instituições de pesquisa do mundo ocidental, destaca-se um aumento considerável no reconhecimento de que a análise sistêmica é necessária para atingir os ousados objetivos trazidos pela complexidades, incertezas e conflitos dos sistemas de produção agrícola contemporâneos.

Em geral, modelos de culturas agrícolas podem ser classificados com base no modo como eles descrevem dados observados em termos das leis biofísicas ou apenas utilizando

relações matemáticas sem qualquer relação com leis da física (Dourado-Neto et al., 1998b), como as leis termodinâmicas de conservação da energia, com o conhecimento fisiológico sobre a cultura, ou mesmo por qualquer outro conhecimento disponível sobre a estrutura do sistema. Estes últimos são chamados modelos empíricos, enquanto que aqueles em que os modeladores tentam reconstruir uma descrição do comportamento do sistema baseado em submodelos descrevendo os processos biofísicos da cultura e se possível até os níveis hierárquicos mais baixos de organização. Modelagem de culturas baseada em processos é chamada de "*hard science"* na língua inglesa e segue a tradicional abordagem reducionista que tem sido bem sucedida nas ciências físicas, fisiologia vegetal e bioquímica (Thornley & Johnson, 1990). Nas ciências agrícolas é comum denominar-se os modelos de culturas como uma abreviação para os modelos mecanísticos de culturas baseados em processos biofísicos, para enfatizar que essa abordagem da modelagem considera processos fisiológicos e físicos controlando o desenvolvimento da espécie e sua relação com o ambiente e fatores de manejo da cultura.

Utilizando modelos de cultura pode-se analisar e manipular um dado sistema produtivo com muito mais facilidade e rapidez do que seria possível considerando toda a complexidade do sistema real. Ao longo do século 20, houve um desenvolvimento científico sem precedentes em decorrência de uma mistura dos métodos de indução e dedução. A indução parte das observações específicas para leis gerais, enquanto que a dedução parte de princípios gerais para realizar predições específicas. Desde a década de 1960, modelos baseados em processos têm sido desenvolvidos e refinados passo a passo guiados por resultados experimentais que preenchiam pouco a pouco pequenas lacunas no conhecimento em oposição aos grandes e onerosos experimentos (Overman & Scholtz III, 2002).

Essa pequena história sobre modelagem também se aplica aos modelos dedicados à cultura da cana-de-açúcar, os quais foram baseados principalmente em alguns poucos artigos publicados descrevendo os modelos para milho e outras culturas. Atualmente, há vários modelos dedicados para a cana-de-açúcar: AUSCANE (Jones et al. 1989), 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) e Marin e Jones (2014). Este é na verdade um pequeno número de modelos disponíveis para uma cultura com a importância da cana-de-açúcar (e.g. Asseng et al. 2013 analisou 27 para a cultura do trigo) e, além disso, apenas dois modelos estão de fato disponíveis e são efetivamente suportados por suas respectivas instituições: APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO.

Uma das formas cientificamente aceitas para a análise de impactos das mudanças climáticas na agricultura é o uso de modelos de crescimento de plantas (MCP), baseados em processos biofísicos que ocorrem em culturas (do inglês, *process based crop model*) (Rosenzweig et al., 2013), que são 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 escalas mundial (Rosenzweig & Parry, 1994), nacional (Adams et al., 1990) e regional (Marin et al,, 2012). No entanto, apesar da importância desses modelos, uma das incertezas nas projeções agrícolas futuras decorre, também, dos próprios modelos.

A comunidade de modeladores do clima tem atacado o problema da incerteza[6] utilizando agrupamentos (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 uma análise probabilística adequada a despeito das incertezas associadas em seus algoritmos, dados de entrada e parâmetros (Rötter et al., 2011). A opção para enfrentar essa limitação, é o uso de um conjunto de MCP´s em paralelo, adequadamente calibrados, em analogia aos *ensembles* dos modelos climáticos. Por exemplo, em trigo (Rötter et al., 2012) e cevada (Palosuo et al., 2011), foram utilizados nove diferentes MCP´s para as simulações de efeitos da mudança no clima nessas culturas na Europa. Uma conclusão interessante dos trabalhos foi que nenhum dos modelos mostrou-se superior para todos os locais testados e que a média das predições de todos os modelos mostrou-se a mais adequada para as simulações de produtividade. 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 a nível suficientemente baixo.

Merece destaque o fato de o trabalho de Asseng et al. (2013) ter sido publicado em periódico de altíssimo impacto (Nature Climate Change) por se revelar uma verdadeira ruptura nas limitações previamente atribuídas ao uso dos MCP´s em larga escala. Até poucos anos atrás, por tratarem de processos biofísicos relativamente detalhados do sistema de produção agrícola, tais modelos eram considerados como dedicados à simulação de pequenas parcelas, sem possibilidade de extrapolação para grandes áreas. 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.

---

[6] Qualquer desvio em relação a um valor ideal obtido a partir de um conhecimento determinístico supostamente completo sobre um sistema.

O estado da arte no estudo dos MCP´s, contudo, aponta que a próxima fronteira nessa linha de pesquisa é a incorporação da simulação estocástica nesse contexto, permitindo assim conhecer como a incerteza dos dados de entrada se propaga nas variáveis de saída do modelo. Além disso, uma necessidade importante no âmbito da abordagem estocástica é considerar a correlação entre as variáveis consideradas aleatórias durante o processo de simulação, permitindo assim projetar as incertezas dos parâmetros e/ou dados de entrada no resultado final das simulações de modo biofisicamente coerente e evitando incluir incertezas não pertencentes a condição de contorno do sistema simulado (Baigorria & Jones, 2010). Neste sentido, considerando o argumento de Sinclair & Seligman (1996) sobre a importância do desenvolvimento dos próprios modelos para grupos de cientistas, permitindo aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos envolvidos no processo de simulação e sobre as incertezas inerentes ao uso de modelos, essa abordagem estocástica seria uma oportunidade para o Brasil.

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

O Sistema de Suporte à Decisão e Transferência de Agrotecnologia (DSSAT do inglês *Decision Suport 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 e vem sendo utilizado nos últimos 30 anos por usuários de todo mundo. O DSSAT contém também uma coleção de programas independentes (Figura 15) para organização dos dados de clima, solo, observações de campo, condições experimentais e informações genotípicas (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., 2003). James & Cutforth (1996) descrevem 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 em um local.

Cada modelo é estruturado utilizando abordagem modular, como descrito por Jones et al. (2001) Suas características mais importantes são: a separação dos módulos por linhas disciplinares; definição clara das interfaces para cada módulo; permite que componentes individuais possam ser inseridos ou retirados com pouco impacto no programa principal;

facilitação na documentação e manutenção dos códigos; permite que programações em diferentes linguagens possam ser ligados; permite uma fácil integração de diferentes tipos de aplicações; aceita para evolução do programa a integração de outros componentes como pecuária e consórcio de culturas; facilita a cooperação entre diferentes grupos de modelos onde cada um pode ser concentrado em módulos específicos.

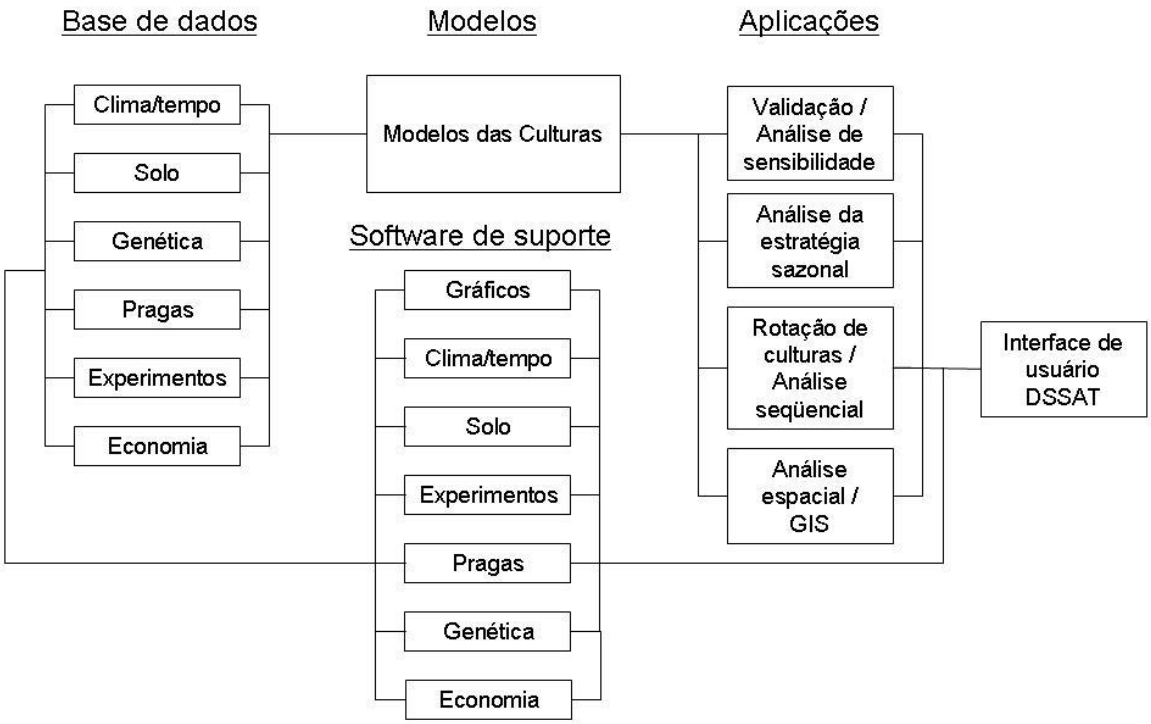


Figura 16 - Representação esquemática da base de dados, aplicação, e componentes de software e seus usos com modelos de culturas para aplicações no sistema DSSAT (adaptado de JONES et al., 2003).

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, contudo, ele já conta uma abordagem que simula o balanço hídrico de modo bidimensional, considerando efeitos de 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 & Taylor (1972), que exige somente dados de radiação solar e temperatura, descrito por Jones & Ritchie (1991). O método de Penman-FAO (DOORENBOS & PRUITT, 1977) 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/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS et al., 2008), sendo baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES e 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.

3.7.3 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 predizer 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 do efeito do manejo da palhada na cultura (Marin et al., 2013; Costa et al., 2014), da irrigação e de doses de nitrogênio (Thorburn et al. 2012). Os fatores avaliados são respostas ao clima, 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 17.

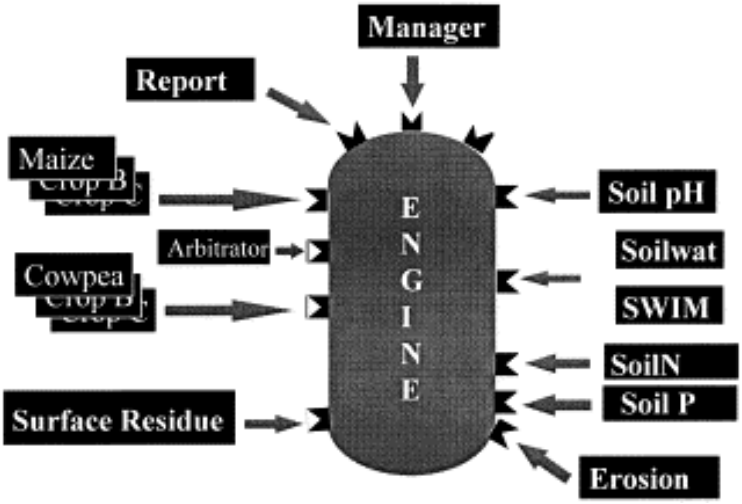


Figura 17 - Representação esquemática dos componentes e modo de operação do sistema APSIM. Fonte: Keating *et al*., (2003)

O APSIM inclui 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 representação dos solos que podem ser alterados de acordo com o local de interesse, como descritos na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 - Componentes e parâmetros gerais do módulo de solos do modelo APSIM-Sugar

Parâmetros e Componente do Módulo de Solos	**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
	BD – Bulk Density – Densidade global do solo
SOIL – WATER	AirDry –Representando a umidade residual.
	LL15 – Ponto de murcha permanente (15 bar).
	DUL – Capacidade de campo (0,1 bar)
	SAT – Conteúdo de água saturado
SOIL – WATER	Sugar LL – Limite inferior de extração de água no solo para cana-de-açúcar
	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), indicando algum impedimento físico-químico em alguma camada solo.
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/dia), que influencia o fluxo lateral.
Cona	Coeficiente de evaporação
CnCov	Superfície limiar da cobertura
CNRed	Diminuição do número da curva
CN	Curve number
ANALYSIS	Pedregosidade, textura, coloração de Munsell.
	EC – Condutividade elétrica (dS/m)
	pH, Cl, B
	CEC – (Cation Exchange Capacity) = (CTC)
	Ca, Mg, K
	Na e ESP (porcentagem trocável de sódio - %)
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 húmicos).
ANALYSIS	Mn – manganês, Al – alumínio, areia, silte, argila (%)
	NO3 – nitrato
	NH_4 – amônio
	SW – água inicial no solo (mm/mm)

Adaptado de APSIM-SUGAR Wiki, 2012 por Costa (2013).

3.7.4 Modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar

Para a indústria sucroalcooleira, os modelos de simulação têm aplicações para diversas questões sobre a produção de cana-de-açúcar no que diz respeito a sua bioquímica, agronomia, fisiologia e manejo de pragas, processos de moagem e danos ambientais (O'LEARY, 2000). Modelos de simulação do crescimento da cana-de-açúcar poderiam simular diferentes cenários e otimizar recursos financeiros e humanos, através do direcionamento de pesquisas do setor, além de aumentar o entendimento dos processos envolvidos no crescimento e produtividade. No Brasil, o uso de modelos de simulação de crescimento ainda não é rotina, devido à relativa complexidade deste tipo de modelagem, a falta de confiança das organizações neste tipo de ferramenta e a deficiência técnica na formação da mão-obra para trabalhar com este tipo de tecnologia. No exterior, essa realidade é diferente e este tipo de tecnologia é utilizada operacionalmente por corporações interessadas em monitorar o efeito do clima e do manejo na agricultura.

No Brasil, as iniciativas no sentido de desenvolver e aplicar modelos com base biofísica foram feitas por Ometto (1974) e Machado (1981). Mais recentemente, Marin & Jones (2014) propuseram uma abordagem para simulação do crescimento da cana-de-açúcar com base em processos biofísicos. No mundo, há vários MCP´s para cana-de-açúcar (Liu & Kingston, 1995; Jones et al., 1988; Inman-Bamber, 1991; Singels et al., 2008; Keating et al., 1999; Martiné, 2003; Villegas et al., 2005), mas apenas dois (APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO) estão efetivamente disponíveis para usuários finais. Por esta razão, estes modelos são atualmente os mais utilizados em todo o mundo e, apesar de terem atualmente estrutura bem diversa, foram ambos desenvolvidos com base no modelo CERES-Maize da família DSSAT.

Desde 2010, o projeto AgMIP busca liderar as ações sobre os impactos do clima futuro na produção agrícola mundial como subsidio às decisões do IPCC, e uma das bases desse projeto é o uso de vários modelos na forma de *ensembles*. Com isso, torna-se importante discutir outros modelos disponíveis e pode-se até mesmo encontrar justificativa para o desenvolvimento de novos modelos.

Um outro modelo desenvolvido na Austrália é o QCANE (LIU e KINGSTON, 1995). É um tipo de modelo que evoluiu de forma mecanicista com ênfase na fotossíntese, respiração e partição dos fotoassimilados. Nele, todo fotoassimilado produzido diariamente é dividido em biomassa estrutural e em sacarose nas diferentes partes da planta. Este modelo tem por característica a simulação do uso da sacarose pela planta podendo ser utilizada como carbono estrutural ou na respiração de manutenção. A fotossíntese diária total é determinada pela

radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura, calibrada pelos dados experimentais locais. Segundo O'Leary (2000), um conceito interessante do modelo QCANE é que a área foliar é determinada a partir dos fotoassimilados particionados, diferentemente do que é feito no modelo DSSAT/CANEGRO.

Liu e Kingston (1995) avaliaram o desempenho dos modelos QCANE, APSIM e CANEGRO, demonstrando que o primeiro apresentou os menores erros na simulação da biomassa. Em algumas situações, o erro de QCANE era menor que a metade do erro do APSIM-Sugar na biomassa. As mudanças sazonais na biomassa seguiram muito próximas aos dados observados em outros estudos da validação com os dados australianos e havaianos (O'LEARY, 2000).

O primeiro modelo de cana a ser distribuído mundialmente foi o australiano AUSCANE (JONES et al., 1989), concebido a partir do sistema EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) para oferecer suporte no estudo de problemas de erosão do solo, produtividade da cultura e aspectos econômicos. O AUSCANE, porém, foi considerado fraco nos aspectos biológicos da cana-de-açúcar e composto por códigos desestruturados, justificando inclusive a iniciativa que deu origem ao modelo APSIM-Sugar (O'LEARY, 2000).

Villegas et al. (2005) desenvolveram o modelo CASUPRO dentro da plataforma DSSAT, com o objetivo de obter um modelo dinâmico, mecanístico (baseado em processos simplificados do solo e da planta), com estrutura modular, simulação de processos de balanço de carbono – água – nitrogênio, aplicáveis a diferentes condições e inserido no DSSAT. A principal ênfase do modelo é a simulação da massa de colmos e teor de sacarose. A simulação da produtividade econômica consistiu em incorporar a radiação solar, temperatura e fotoperíodo como os fatores que determinam a produção. Ainda, o modelo CASUPRO inclui características das variedades de cana-de-açúcar, como a estrutura do caule e folhas, a população de colmos, a capacidade de produção de biomassa e sacarose e estádios fenológicos como a floração e maturação.

Em 1995, o CIRAD desenvolveu o modelo se simulação de cana-de-açúcar MOSICAS (MARTINE, 2003), o qual permite a partir de parâmetros de entrada, como dados meteorológicos, de solo, da planta e variedades, da cultura e seu manejo, calcular diariamente variáveis ambientais e de crescimento da cultura. Segundo Suguitani (2006) o modelo é denominado modelo explanatório, que analisa o sistema como um todo, além dos processos separadamente, descrevendo-os quantitativamente.

3.7.4.1 DSSAT/CANEGRO

Sendo um dos modelos utilizados neste trabalho, o modelo DSSAT/CANEGRO tem aqui algum detalhamento adicional. Ele 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 Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT versão 3.1) (INMAN-BAMBER e 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 18 observa-se um resumo esquemático de como o DSSAT/CANEGRO se encaixa no quadro do DSSAT. Um dos primeiros processos do modelo teve por objetivo definir a melhor época de colheita para a África do Sul e simular o efeito do estresse hídrico e da irrigação na cultura, pois grande parte do cultivo de cana na África do Sul tem a água como fator limitante (INMAN-BAMBER, 1991).

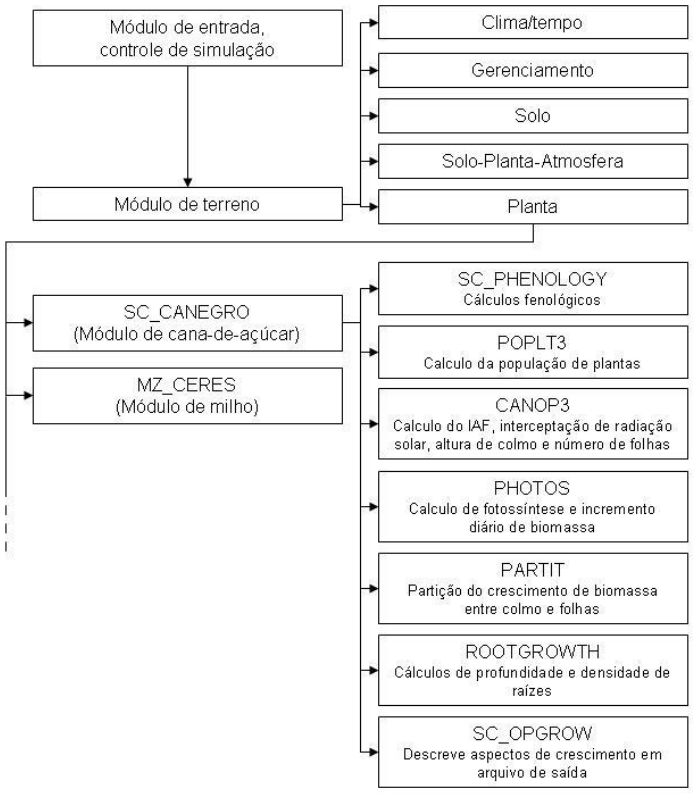


Figura 18 - Representação esquemática do modelo DSSAT/CANEGRO, ilustrando inserção dentro do sistema DSSAT (adaptado de SINGELS et al., 2008).

Singels et al. (2008) apresentam as principais características do DSSAT/CANEGRO, baseando-se em descrições fisiológicas do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar incluindo a fenologia, desenvolvimento do dossel, perfilhamento, acúmulo e partição de biomassa, crescimento de raízes, estresse hídrico e acamamento da cultura. O modelo requer como dados de entrada: parâmetros de solo (capacidade de campo, ponto de murcha e profundidade do solo), variáveis meteorológicas (radiação solar, temperaturas do ar máximas e mínimas e precipitação), parâmetros genéticos da espécie/variedade e informações sobre o manejo a ser simulado. Dados de umidade relativa e velocidade do vento podem também ser inseridos, porém não são essenciais (JONES et al., 2003). Esses conjuntos de dados/parâmetros são subdivididos em três tipos: ecótipos com 31 parâmetros (Tabela 6), 20 parâmetros de variedades (Tabela 7) e 23 de espécie (Tabela 5), porém somente os parâmetros de ecótipos e variedades devem ser ajustados pelo usuário do modelo (SINGELS et al., 2008).

Tabela 5 - Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
Tbasephotos	ºC	Temperatura base para fotossíntese
Critsw		Limiar de estresse hídrico para impacto prolongado de estresse na fotossíntese
HuRecover	GD	Graus-dia requerido para total recuperação da fotossíntese após estresse hídrico severo
RespQ10		Aumento da fração na taxa de respiração por 10°C de aumento na temperatura (coeficiente Q10)
RespGcf		Fração da fotossíntese bruta perdida na respiração para o crescimento
PCB		Coeficiente de partição: coeficiente de extinção da fração de incremento de massa seca, alocada para a biomassa acima do solo
Max_rootpf		Fração da partição máxima do incremento da massa diária às raízes
FTCON		Resposta à temperatura do parâmetro de forma
SURCON		Parâmetro de partição de sacarose que determina o tempo de resposta de mudanças na partição entre sacarose e fibra devido a mudanças ambientais
RTcmpg	cm g^{-1}	Comprimento radicular por massa de raiz
Wrk		Coeficiente de densidade de comprimento radicular por profundidade
RLVmin	cm cm^{-3}	Densidade de comprimento radicular mínimo nas camadas do solo
SenesF	Nº folhas	Número de folhas senescentes por broto por 100 dias de estresse
Reset	mm	Chuva requerida para recompor o contador de dias de estresse
Percoeff		Fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo
CHTCoeff	cm cm^{-1}	Coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas
Hillpar1		Função empírica do parâmetro de forma
EORATIO		Relação da evapotranspiração de um dossel completamente formado e sem restrições hídricas de cana-de-açúcar comparado com a evapotranspiração de referência da grama (Kc da FAO-56)
RWUEP1		Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual a evaporação e fotossíntese são limitadas
RWUEP2		Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual o crescimento é limitado
RWUMX	cm^3 água cm^{-1} raiz	Absorção máxima de água por unidade de comprimento da raiz
LG_RATING		Pontuação de acamamento quando a cultura está totalmente acamada
LG_CRIT_WIND	km dia^{-1}	Limite do vento para o acamamento

Tabela 6 - Parâmetros de ecótipos do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
DELTTMAX	t^{-1}	Variação máxima do teor de sacarose por unidade de variação da massa do colmo na seção imatura do caule
SWDF2AMP		Sensibilidade de partição da sacarose ao estresse hídrico
CS_CNREDUC		Redução máxima da fração do dossel devido ao estresse hídrico
CS_CNPERIOD	dias	Período de estresse hídrico requerido para ter o maior efeito na redução do dossel
Tthalfa	GD m^{-1}	Graus-dia necessário para o dossel ajustar-se à metade do espaçamento entre-linhas
dPERdT	mm h^{-1} $ºC^{-1}$	Mudança na taxa de crescimento da planta por unidade de temperatura efetiva
EXTCFN		Máximo coeficiente de extinção de radiação do dossel
EXTCFST		Mínimo coeficiente de extinção de radiação do dossel
LFNMXEXT	nº folhas	Número de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas) onde ocorre a máxima extinção da radiação
AREAMX_CF(1)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máxima área foliar ($y=cf_1+cf_2*x+cf_3*x^2$) (CF1)
AREAMX_CF(2)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máxima área foliar (CF2)
AREAMX_CF(3)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máxima área foliar (CF3)
WIDCOR		Parâmetro que influencia a largura das folhas
WMAX_CF(1)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(2)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(3)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
LMAX_CF(1)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(2)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(3)		Parâmetro de variedade para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
MAXLFLENGTH	cm	Máximo comprimento absoluto de folha
MAXLFWIDTH	cm	Máxima largura absoluta de folha
POPCF(1)		Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF(2)		Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY		Fração de perfilhos sobre a população madura (com 1600 ºCd), que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	ºC	Temperatura base para emergência e início da alongamento do colmo
TTBASELFEX	ºC	Temperatura base para fenologia de folha
TTBASEPOP	ºC	Temperatura base para fenologia de colmos
TBASEPER	ºC	Temperatura base para extensão da planta
LG_AMRANGE	t ha^{-1}	Variação na massa da parte aérea do início ao final do acamamento
LG_GP_REDUC		Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total, como fração
LG_FI_REDUC		Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Tabela 7 - Parâmetros de variedades do modelo DSSAT/CANEGRO e suas descrições.

Parâmetro	Unidade	Descrição
PARCEmax	g MJ^{-1}	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR
APFMX	t t^{-1}	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuído a massa seca da parte aérea7.
STKPFMAX	t t^{-1} base massa seca	Fração do incremento diário de massa seca aérea destinada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura
SUCA	t t^{-1}	Parâmetro de partição de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo
TBFT	ºC	Partição de sacarose: temperatura em que a partição de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo
T*thalfo*	GD	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento
T*base*	GD	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	nº folhas	Número máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este número.
MXLFAREA	cm^2	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o número de folhas MXLFARNO (cm^2)
MXLFARNO	nº folhas	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
Pl1	GD	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas abaixo do Pswitch)
Pl2	GD	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas acima do Pswitch)
PSWITCH		Número da folha em que há mudança no filocrono
MAX_POP	colmos m^{-2}	População de perfilhos máxima
POPTT16	colmos m^{-2}	População de colmos após 1600 graus-dia
TTPLNTEM	GD	Graus-dia para emergência da cana-planta
TTRATNEM	GD	Graus-dia para emergência da soqueira
CHUPIBASE	GD	Graus-dia para o início do crescimento do colmo
TT_POPGROWTH	GD	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento
LG_AMBASE	t ha^{-1}	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o início do acamamento

Os parâmetros de variedades, ecótipos e espécies pretendem juntos representar as características genéticas da cultura em diferentes níveis de especificidade. Os dados de variedades são considerados como as características de cada variedade de cana-de-açúcar, enquanto que os parâmetros de ecótipos, também representando estas características, apresentam-se mais estáveis. Os parâmetros de espécie representam as características da própria espécie, descritas em relação à fotossíntese, respiração, partição, crescimento de raízes e resposta da cultura ao acamamento e estresse hídrico (SINGELS et al, 2008).

O modelo DSSAT/CANEGRO simula a emergência do perfilhamento primário é simulada quando um período específico de tempo térmico foi acumulado a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM), o início do crescimento de colmos é simulado quando um período específico de exigência térmica (CHUPIBASE) é atingido a partir do perfilhamento primário. O pico de perfilhamento ocorre após um período de tempo térmico acumulado desde a emergência, através do parâmetro TT_POPGROWTH. Na modelagem, a fase de perfilhamento dura desde a emergência dos primeiros perfilhos até o pico de perfilhamento, enquanto que o crescimento dos colmos ocorre desde o início do crescimento até a colheita. A fase de senescência de perfilhos é modelada após o pico de perfilhamento até a colheita. No DSSAT/CANEGRO o florescimento não é modelado.

No desenvolvimento da cultura, o DSSAT/CANEGRO utiliza um método de índice de área foliar derivado do desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos baseado no tempo térmico. Este método simula o desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos, onde a área foliar de cada perfilho é extrapolada para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual pelo número de perfilhos por unidade de área.

O crescimento da planta é calculado através da taxa de expansão da planta (PER, cm d^{-1}), que pode ser calculada pelos parâmetros de ecótipos através da Eq. 6. Os valores aumentam para as folhas subsequentes até o número específico de folhas (MXLARNO) e a máxima área da lâmina foliar é estipulada pelo parâmetro MXLFAREA.

$$PER = SWDF2 \cdot dPERdT \cdot MAX\left(0., TMEAN - TBASEPER\right) \cdot \frac{24}{10} \qquad (6)$$

em que: PER é a taxa de expansão da planta (cm d^{-1}), SWDF2 é o fator de estresse hídrico para expansão da planta (adimensional), dPERdT é a taxa de extensão da planta sem estresse hídrico (mm $^{o}C^{-1}$ h^{-1}), TMEAN é a temperatura média diária (ºC) e TBASEPER é a temperatura base para extensão da planta (ºC).

A interceptação de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é calculada de acordo com a lei de Beer-Bouger, utilizando-se um valor fixo de coeficiente de extinção e os valores dinâmicos de índice de área foliar total para o cômputo da radiação interceptada e dos processos decorrentes, como a assimilação de carbono e a evapotranspiração. Esta última pode ser estimada pelo modelo de Penman-Monteith seguindo a parametrização FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

A densidade de população é simulada utilizando alguns parâmetros de ecótipos (POPCF1, POPCF2 e POPDECAY), que determinam a taxa de perfilhamento sem déficit hídrico e a senescência em função de tempo térmico, e alguns parâmetros de variedades (MAX_POP e POPTT16) que determinam o pico de população e sua estabilização. Estas simulações são diretamente afetadas pelo espaçamento de plantio e por estresse hídrico ocorrido na cultura (SINGELS et al., 2008).

Já o crescimento de colmo (SHGT) e dossel (CANHEIGHT) são simulados através das equações 7 e 8, respectivamente, descritas por Singels et al. (2008) utilizando parâmetros de espécies para seu cálculo.

$$SHGT = SHGT + \left(PER * dPERcoeff\right) \tag{7}$$

em que SHGT é a altura do colmo (cm), PER é a taxa de expansão da planta (cm dia^{-1}) e dPERcoeff é a fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo (adimensional).

$$CANHEIGHT = \frac{\left[SHGT + LMAX\left(LFN(1)\right) \cdot CHTCoeff\right]}{100} \tag{8}$$

em que CANHEIGHT é a altura do dossel (cm), SHGT é a altura do colmo (cm), LMAX(LFN(1)) é o comprimento da maior folha do primeiro grupo de perfilhos (cm) e CHTcoeff é o coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas (cm cm^{-1}).

O modelo DSSAT/CANEGRO também simula o acúmulo de biomassa e a partição de fotoassimilados, descritos por Singels & Bezuidenhout (2002) em que o modelo calcula o incremento diário na biomassa total utilizando a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e a eficiência de conversão (PARCE, g MJ^{-1}) de acordo com a Eq. 9, onde Rm é a taxa de respiração de manutenção. A eficiência de conversão da PAR e a respiração de manutenção são dependentes da temperatura.

$$\frac{dTOT}{dt} = \left(1 - \mathrm{Re}\, spGcf\right) \cdot \left(PARCE \cdot 10^{-6} \cdot IPAR - Rm \cdot TOT\right) \cdot SWDF1 \tag{9}$$

em que dTOT/dt é o incremento diário na biomassa total (t ha^{-1} dia^{-1}), RespGcf é o coeficiente de respiração para o crescimento (t t^{-1}), PARCE é a eficiência da conversão da radiação fotossinteticamente ativa (g MJ^{-1}), IPAR é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ ha^{-1}), Rm é a taxa de respiração de manutenção (adimensional), TOT é a biomassa total da cultura (t ha^{-1}) e SWDF1 é o nível de estresse hídrico da cultura (adimensional).

A partição dos fotoassimilados entre raízes e parte aérea é simulada por função não-linear da biomassa total, onde a máxima fração de incremento diário da biomassa destinada para a parte aérea é especificada no parâmetro de variedade APFMX (Singels et al., 2008). O crescimento radicular tem um algoritmo expresso em termos de extensão da profundidade de

raízes, bem como o aumento da massa radicular e do comprimento das raízes por camada de solo.

A simulação de estresse hídrico é realizada através do impacto da deficiência de água na regulagem dos diferentes processos da planta (assimilação de carbono, crescimento) por diferentes fatores de estresse hídrico ($SWDF_i$) (Singels & Bezuidenhout, 2002).

3.7.4.2 APSIM-Sugar

A Figura 19 descreve esquematicamente o módulo APSIM-Sugar (APSIM-SUGAR Wiki, 2012). Neste modelo, os processos variam de acordo com o estádio fenológico. Existem cinco categorias distintas controlando a simulação da cultura, envolvendo informações genotípicas e das variedades, dentro do APSIM- Sugar (Tabela 8). 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.

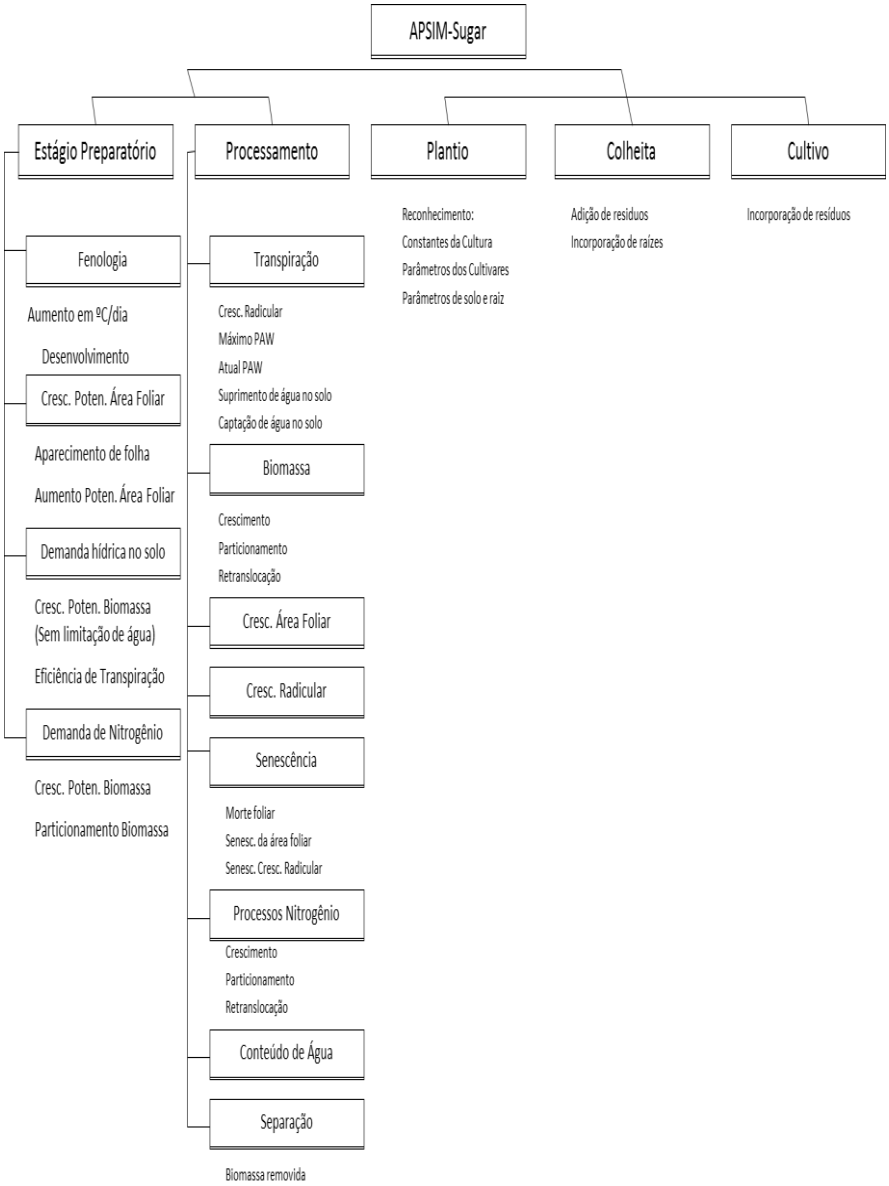


Figura 19 - Descrição do modulo Sugar do APSIM. Fonte: Adaptado de APSIM-SUGAR Wiki, 2012

Tabela 8 - Categorias e descrição dos arquivos INI utilizados pelo modelo APSIM-Sugar

Categorias	Descrição
Constants	Limites inferiores e superiores para os dados de clima e variáveis de solo.
Plant_crop	Parâmetros do crescimento e partição dos fotoassimilados; Fatores para temperaturas baixas e 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 partição 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 do uso da radiação (RUE) para computar a acumulação de biomassa seca da planta. Este parâmetro pode sofrer 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. A partição de matéria seca produzida em cada dia, portanto, é realizado em 5 compartimentos específicos: 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 repartida entre a folha e o meristema apical na proporção de 1,7/1,0 (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 se dá 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*), início do crescimento ao florescimento;
- (*Flowering – end crop*), florescimento até o fim da cultura.

Para brotação na cana-planta são necessários 350 ºC dia e para brotação na cana-soca, 100 ºC dia (temperatura base de 10ºC). O modelo assume que os brotos crescem até a superfície do solo numa taxa de 0,8 mm $ºC^{-1}$ d^{-1}. A necessidade térmica entre a emergência e o começo do crescimento do colmo é específico para cada variedade, podendo variar entre 1200 ºC d a 1800 ºC d para variedades australianas, mas ficando abaixo de 1200 ºC d para as variedades brasileiras (Marin et al., 2013). O modelo foi desenvolvido para incluir o florescimento como um estágio fenológico, entretanto, isto tem sido desativado 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), para emergência, as primeiras folhas necessitam de 80ºC d, enquanto que para a quadragésima folha são necessários 150 ºC d. Tais respostas são reproduzidas no modelo para cana soca e cana planta, através de interpolação linear (KEATING, et al. 1999). A variedades brasileiras normalmente emitem folhas com maior frequência (Marin et al., 2013).

O número de colmos aumenta rapidamente até atingir o pico durante os primeiros 1400 ºC 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 constate 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 um número de folhas definido

na calibração da variedade. 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 ºC, o índice de área foliar sofre redução de 10% por dia; caso a temperatura atinja -5ºC ocorre a falência total dos tecidos.

3.8 Extrapolação espacial das simulações com modelos de crescimento de plantas

Em estudos de simulação em que se pretende extrapolar espacialmente os resultados, uma importante tarefa é a delimitação do sistema a ser considerado sob o ponto de vista espacial. No caso deste estudo, a cana-de-açúcar brasileira será analisada a partir da escolha de áreas representativas para produção no Brasil, com base em análise dos fatores abióticos que regulam a conformação do sistema de produção. A hipótese implícita nessa atividade é que áreas homogêneas quanto ao clima e ao solo tendam a ter sistemas de produção e meio físico similares, permitindo a extrapolação de simulações pontuais para regiões mais amplas. Para tanto, uma das abordagens disponíveis é aquela derivada dos zoneamentos de aptidão agrícola, em que se determinam classes de aptidão para determinada cultura. Neste caso, o interesse não é classificar áreas, mas delimitar zonas dentro das quais seriam selecionados os pontos de simulação. Esse procedimento de identificação das áreas representativas também, em tese, delimitaria os limites para os quais as simulações poderiam ser extrapoladas, como utilizado por van Wart (2013) (Figura 20).

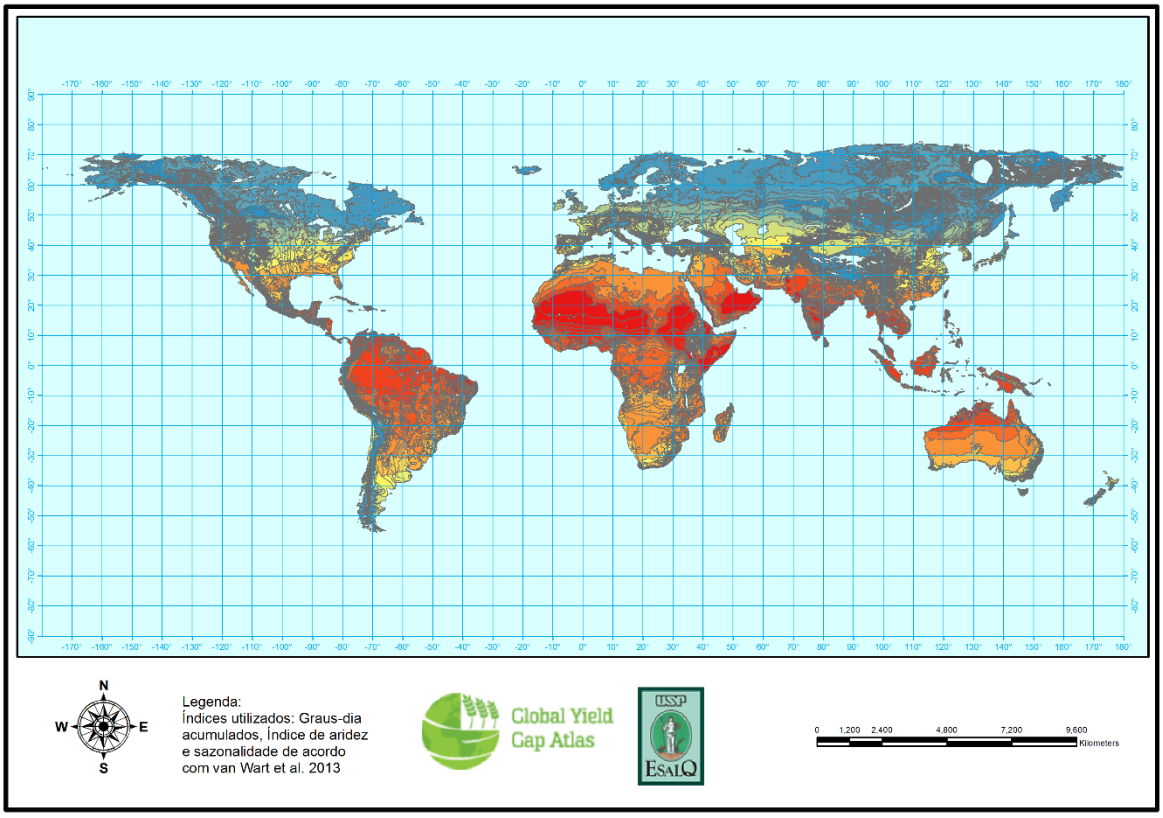


Figura 20 - Mapeamento global das zonas climáticas homogêneas, com base na soma térmica acumulada, índice de aridez e sazonalidade. Áreas de mesma cor indicam condições no meio físico homogêneas. Adaptado de van Wart et al. (2013).

Simulações de produtividade com modelos baseados em processos são localmente específicos por serem determinados pelas condições do tempo, manejo, duração do ciclo e propriedades do solo relacionadas à retenção de água e aos ciclos biogeoquímicos (especialmente carbono e nitrogênio).

Vale lembrar que uma opção aos modelos são os sítios experimentais, onde a cultura de interesse é cultivada de modo a representar as condições em que se pretende extrapolar. Numa recente comparação entre dados experimentais e simulações com modelos de crescimento, van Ittersum et al. (2013b) concluíram que simulações de longo prazo com séries de dados meteorológicos fornecem estimativas mais robustas de produtividade regional do que sítios experimentais, porque simulações consideram de modo mais adequado variações da temperatura do ar, radiação solar e chuva ao longo do tempo do que experimentos de curto prazo. No entanto, para atender a esses objetivos, MCP´s requerem dados regionais específicos quanto a datas de plantio/semeadura, colheita, variedades, população de plantas, solos e clima e tais informações nem sempre estão disponíveis para simulações em boa parte do mundo

(Ramirez-Villegas & Challinor, 2012). No Brasil, apesar de permanecerem aquém do ideal, já há disponibilidade de uma base de dados de clima e solo que permite expandir o uso dos MCP´s para simulações agrícolas tanto para propósitos acadêmicos quanto para objetivos operacionais. A obtenção de uma base de dados dessa natureza para um número muito grande de localidades, contudo, continua sendo custosa computacionalmente, demandando muito tempo para organização e checagem de bases de dados e, para algumas regiões do mundo, continua sendo simplesmente impossível. Este não é o caso do Brasil atualmente, mas há grande interesse prático no uso de métodos de passagem de escala para extrapolação (do inglês, *upscaling*), seguindo um protocolo consistente que permita ao mesmo tempo reduzir o número de pontos de simulação e estender sua cobertura espacial (van Wart et al.,2013).

Wood e Pardey (1998) e Padbury et al. (2002) figuram como trabalhos clássicos de distinção do espaço geográfico como método de extrapolação espacial baseada em dados de solo e clima e modelos de simulação. Uma região pode ser dividida em zonas agroclimáticas baseadas na homogeneidade das variáveis meteorológicas que têm maior influência no crescimento e desenvolvimento das culturas, enquanto as zonas agroecológicas são definidas como regiões geográficas que têm clima e solos similares para a agricultura (FAO, 1978). A metodologia proposta por van Wart et al. (2013) foi desenvolvida principalmente para definição do domínio agroclimático, tendo em vista o objetivo principal de extrapolar espacialmente simulações de produtividade potencial e atingível da escala regional para a escala global.

Como os MCP´s operam na escala local e sua operação demanda recursos computacionais relativamente grandes (em termos de custo e tempo de processamento), e porque não há dados de entrada cobrindo todo o território brasileiro, a extrapolação das simulações requer passagem de escala a partir de um número representativo de pontos distribuídos no espaço (o mínimo possível mantendo-se o compromisso com a representatividade espacial de cada simulação), segundo padrões técnicos reconhecidos cientificamente (Ewert et al., 2011; van Oijen et al., 2009). Neste sentido, vale destacar o trabalho de van Wart et al. (2013), que fez um excelente apanhado dos métodos disponíveis para este fim e apontou um sistema para ser aplicado em escala global e que pode ser aplicada no Brasil.

Como discutido na seção 3.3, vale lembrar que Yp, Yw, Ya e Yg precisam ser estimados para uma unidade geográfica e um período de tempo definidos. Eles podem ser quantificados de modo individual para produtores específicos para um dado ano, ou para grandes áreas e período mais longos, para levar em conta a variação espacial e temporal utilizando métodos adequados de passagem de escala (*upscaling)* (Ewert et al., 2011). E uma vez que as mudanças

no clima podem afetar Yp, Yw, Ya e Yg, por meio de mudanças no regime térmico e de disponibilidade de água ou mesmo por adaptações dos produtores em termos de datas de plantio e variedades utilizados e, também (no caso de Ya e Yg), indiretamente através de efeitos sobre a prevalência ou severidade de pragas e doenças e, seguindo van Ittersun et al. (2013), este estudo foca na quantificação de valores atuais de vários níveis de produtividade por duas razões. Primeiro por que os valores mais atuais fornecem a base para a identificação das causas dos limitantes de produtividade e a magnitude do incremento potencial. Segundo, porque estimativas acuradas dos valores de Yp e Yw são essenciais para referenciar os efeitos das mudanças climáticas na produtividade e na segurança alimentar futuras.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Análise e calibração dos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar para a cana-de-açúcar brasileira

Utilizou-se também outros dois modelos cientificamente consagrados para simulação da cultura da cana-de-açúcar: DSSAT/CANEGRO (DC) e APSIM-Sugar (AS). Para calibrá-los, ambos os modelos foram inicialmente analisados tomando-se por base seu desempenho em relação a variedade NCo376, uma vez que ambos possuem calibrações consistentes para esta variedade em suas distribuições padrão. Essa etapa foi incluída no trabalho de modo a permitir uma comparação estrutural entre os modelos, oferecendo ao leitor uma visão mais profunda sobre o modo de funcionamento de ambos e suas principais diferenças. Outra razão é que os coeficientes genéticos da variedade NCo376 foram desenvolvidos com base num conjunto robusto de dados experimentais, assumindo-se aqui que este seria um ponto de início razoavelmente consistente para avaliar as diferenças estruturais entre os modelos e desenvolver uma calibração para uma variedade representativa do Brasil.

Assim, para ambos os modelos, os parâmetros tamanho e número de folhas, filocrono, partição e perfilhamento foram ajustados em relação aos dados experimentais coletados em diversas regiões do Brasil para a variedade RB86-7515, cultivada em cerca de 27% (ou 1,7 Mha) da área de cana do Brasil em 2012 (PMGCA, 2012). A calibração foi feita de modo manual em ambos os modelos por ajuste visual entre as curvas simuladas e os pontos de observações de campo, buscando-se minimizar a raiz do erro médio quadrado (RMSE) e o erro médio absoluto (EMA) e maximizar a eficiência da modelagem (Eff) (Wallach et al., 2006), o coeficiente de correlação (r) e o índice (d) de Wilmott (Wilmott, 1981) para massa fresca de colmos (SFM) e índice de área foliar (LAI). Para ambos os modelos, o processo de calibração seguiu uma sequência começando pelo ajuste da fenologia da cultura, da população de plantas, da estrutura da copa dos experimentos irrigados, estrutura da copa dos experimentos de sequeiro e finalmente pela partição de biomassa e parâmetros relacionados à produção de biomassa.

4.2 Dados de campo utilizados para a calibração dos modelos

Os modelos AS, DC e SAMUCA foram calibrados usando dados de 7 experimentos com a variedade RB867515 coletados em seis diferentes regiões do Brasil (Figura 21). Dois desses 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 tinham cinco diferentes tipos edafoclimáticos representativos das distintas zonas de produção de cana do Brasil (Tabela 9). 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 21 - Localização dos experimentos de campo usando a variedade RB867515, utilizados para calibração dos modelos de simulação APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO e SAMUCA

Tabela 9 - 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 e SAMUCA

Sítio	Localização	Datas de plantio e colheita	Clima[7]	Tratamento hídrico	Tipo de solo	Prof. Máx. do Sistema Radicular
1	União/PI, 4°51'S, 42°52‘W, 68 m asml	29/9/2007 e 16/6/2008	27°C, 1500 mm, Aw	Irrigado e sequeiro	Plintossolo (Oxisol)*	125 cm
2	Coruripe/AL, 10°07'S, 36°10‘W, 16 m asml	11/8/2007 e 15/11/2008	24,4 °C, 1400 mm, As´	2 níveis de irrigação parcial	Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	40 cm
3	Coruripe/AL, 10°07'S, 36°10‘W, 16 m asml	16/8/2005 e 15/9/2006	21,6ºC, 1400 mm, As´	Sequeiro	Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	40 cm
4	Aparecida do /MS, 20º05S, 51º18’W, 335 m asml	1/7/2006 e 8/9/2007	23,5ºC, 1560 mm, Aw	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400 cm
5	Colina/SP, 20°25’S, 48°19’W, 590 m asml	10/2/2004 e 1/12/2005	22,8ºC, 1363 mm, Cwa	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400 cm
6	Olimpia/SP, 20°26’S, 48°32’W, 500 m asml	10/2/2004 e 1/12/2005	23,3ºC, 1349 mm, Cwa	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400 cm
7	Piracicaba/SP 22°41’S, 47°38’W, 540 m asml	16/10/2012 e 15/6/2013	22,4ºC 1280 mm, Cwa	Irrigado	Argissolo Vermelho (Typic Hapludults)*	400 cm

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

Nos três modelos, a simulação da dinâmica da água no solo requer informações referentes ao limite inferior de retenção de água (LWL) (similar ao conceito de ponto de murcha permanente), limite superior drenado (UWL) (similar a capacidade de campo) e umidade volumétrica de saturação (SWL). Como os parâmetros hídricos do solo não foram medidos em Olímpia, Colina e Aparecida do Taboado, os valores de umidade do solo a -10 kPa (UWL), a -1500 kPa (LWL) e na saturação (SWL) foram estimados utilizando funções de pedotransferência (PTF; Tomasella *et al.*, 2000) em conjunto com o método de estimativa de micro e macroporosidade do solo estabelecido por Stolf, Thurler, Bacchi e Reichardt (2011). Os dados de entrada para as PTF´s foram obtidas com o Dr. Ronaldo Rezende[8] (Coruripe, AL, comunicação pessoal); Tasso Jr. (2007); Andrade Jr. *et al.* (2012); Silva (2007) e Santos (2008). Para o experimento de Piracicaba, os parâmetros hídricos do solo foram obtidos a partir de medidas de laboratório em amostras indeformadas. Para o modelo SAMUCA, a dinâmica da água é simulada de modo diferente em relação aos outros dois, como detalhado no capítulo 5,

[7] Respectivamente: temperatura media annual, chuva total anual, classificação de Koeppen

[8] Embrapa Tabuleiros Costeiros

mas ele também requer informações sobre LWL, UWL e SWL, que foram estimadas do mesmo modo para os locais em que tais parâmetros não foram medidos.

O modelo AS é o único dentre os três empregados aqui que simula a redistribuição de solutos tais como nitrato e ureia, mas esse aspecto não foi avaliado neste estudo uma vez que o estresse por deficiência de nitrogênio não ocorreu nos experimentos analisados como consequência de adubações nitrogenadas adequadas. Contudo, na segunda parte do trabalho, quando se aplicou os três modelos para simular o impacto das mudanças no clima na produtividade e na eficiência da produção da cana-de-açúcar, esse componente foi simulado admitindo-se adubações com Ureia em dosagens comerciais, como descrito mais à frente. O modelo AS também é capaz de simular o efeito dos resíduos culturais sobre o desenvolvimento da cultura, balanço de água e carbono. Como os demais modelos ainda não contam com essa sofisticação, simulou-se aqui o crescimento da cana em solo exposto, que foi a condição padrão na maioria dos experimentos aqui analisados.

O modelo DC, no algoritmo de solos, requer um fator de exploração radicular (RGF), que dá ideia sobre a distribuição vertical das raízes no perfil e é variável entre 1 (solo favorável às raízes) até 0 (solo desfavorável). O modelo SAMUCA vale-se de uma abordagem similar para descrever o bulbo radicular da cultura. Assumindo-se que a distribuição radicular da cana-de-açúcar segue padrão similar ao exponencial (Ball-Coelho *et al.*, 1992; Laclau & Laclau, 2009) valores de RGF foram estimados com base na abordagem proposta por Jones & Ritchie (1991), usando a constante de geotropismo igual a 2. Boa parte dos locais tinha pH do solo oscilando entre 5,5 e 6,5 e como o modelo AS leva em conta os valores de pH na simulação, ajustou-se todos os valores para 7,0 para evitar que o modelo estimasse algum estresse indesejável por limitação de nitrogênio decorrente do baixo pH (Marin et al., 2013).

Os dados meteorológicos necessários aos três modelos incluem radiação solar global, temperatura máxima e mínima, e chuva. Umidade relativa e velocidade do vento podem ser úteis para os modelos AS e DC quando disponíveis, por permitirem a estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. Para a versão atual do modelo SAMUCA essas variáveis não são utilizadas. Para os sítios 1, 2, 3 e 7, a temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar foram coletados por estações meteorológicas automáticas (EMA) instaladas próximas aos experimentos. Para o sítio 4, a temperatura do ar e a radiação solar foram coletadas por EMA instaladas a cerca de 15km do sítio experimental. O terreno plano da região tende a minimizar o erro decorrente dessa distância. Os sítios 5 e 6 estão distantes aproximadamente 30 km um do outro em relevo plano e uma EMA instalada em

posição intermediária foi utilizada para medida dos dados de radiação solar e temperatura. A chuva foi medida localmente em cada experimento. Para todos os locais, nos dias com dados faltantes de radiação solar, eles foram estimados com base no método de Bristow & Campbell (1984) (Eq. 10), que se mostrou o mais eficiente dentre os testados por Conceição & Marin (2007) e por Marin e Carvalho (2012) para diferentes regiões do Brasil. Dados faltantes de temperatura e chuva foram preenchidos utilizando o programa WGEN (Richardson & Wright, 1984), bem como dados de estações próximas quando disponível.

$$Qg = A \cdot \left\{1 - e^{\left[-B\cdot(Tmax-Tmin)^{C}\right]}\right\} \tag{10}$$

em que: Qg é a radiação global ($MJ \cdot d^{-1}\ m^{-2}$), A é o coeficiente empírico de valor 0,7 (adimensional), B é o coeficiente empírico (adimensional), C é o coeficiente empírico de valor 2,4 (adimensional), Tmax é a temperatura máxima do dia (°C) e Tmin é a temperatura mínima do dia (°C).

Para os sítios 1 e 3, dados detalhados sobre o crescimento da cultura foram coletados regularmente a cada 4-5 semanas ao longo do ciclo, abrangendo as seguintes variáveis: índice de área foliar (LAI), população, massa seca da parte aérea e dos colmos, massa e número de folhas verdes. No sítio 7, as mesmas variáveis foram medidas, incluindo-se também dados de massa fresca dos colmos e parte aérea, além do teor de sacarose no caldo (POL). No sítio 3, mediu-se LAI, população, perfilhamento, POL e a massa dos colmos entre 3 e 7 vezes ao longo do ciclo e intervalos irregulares. Para o sítio 4, a população de plantas, massa de colmo e altura das plantas foram coletadas 3 vezes ao longo do ciclo, enquanto que o POL foi coletado 9 vezes a partir do meio do ciclo até a colheita. Para os sítios 5 e 6, a população de plantas, massa de colmos e altura das plantas foram coletadas apenas uma vez ao longo do ciclo, enquanto que o POL foi medido 13 vezes a partir do meio ciclo até a colheita.

4.3 Simulação das produtividades potencial e atingível da cana-de-açúcar

Após a calibração, foram simuladas com os três modelos dados de produtividade potencial e atingível da cana-de-açúcar para estimativa da eficiência da produção. Para tanto, utilizou-se séries de dados meteorológicos obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia

(INMET) num total de 9 estações meteorológicas (Tabela 10). Cada série consistia de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, e radiação solar global.

A seleção dessas estações levou em conta o estudo de van Wart (2013) indicando as regiões com maior representatividade na produção de cana-de-açúcar no Brasil, cobrindo as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil (Figura 22). Os dados das 9 estações foram consistidos e tiveram suas falhas preenchidas com programa WGEN (Richardson e Wright, 1984), bem como dados de estações próximas, quando disponível. Todas as séries foram uniformizadas para ter início em 1 de janeiro de 1980 e final em 31 de dezembro de 2010, com o intuito de padronizar o período das séries históricas e facilitar a configuração dos modelos para as simulações. Essa seleção baseou-se na representatividade de cada ponto de simulação em relação à sua respectiva zona climática homogênea. Avaliando-se a qualidade e a distribuição espacial das séries meteorológicas disponíveis no país, buscou-se identificar o menor número de pontos possíveis que representariam a maior área produtora de cana-de-açúcar no Brasil. Nesse processo, utilizou-se dados de área colhida de cana na escala municipal segundo o banco de dados de produção agrícola municipal do IBGE na safra 2011/2012. Associando-se um arquivo *shapefile* com a distribuição dos pontos ao mapa de zonas climáticas homogêneas produzido por van Wart et al. (2013) (Figura 22), identificou-se que esses 9 pontos representariam aproximadamente 87% da área produtora de cana no país (Tabela 11).

Tabela 10 - Estações meteorológicas com suas respectivas latitude, longitude e altitude

	Estação	Estado	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Brasília	DF	-15,78	-47,93	1159,5
2	Catanduva	SP	-21,11	-48,93	570,0
3	Diamantino	MT	-14,40	-56,45	286,3
4	Maceió	AL	-9,66	-35,70	64,5
5	Paranaíba	MS	-19,75	-51,18	331,2
6	Pres.Prudente	SP	-22,11	-51,38	435,5
7	Rio Verde	GO	-17,80	-50,91	774,6
8	Uberaba	MG	-19,73	-47,95	737,0
9	Votuporanga	SP	-20,41	-49,98	502,5

Quanto à configuração dos solos predominantes em cada região, para cada local selecionado fez-se uma análise regional com base nos mapas e perfis de solo provenientes do PROJETO RADAMBRASIL (1973-1986), na escala 1:250.000, utilizando-se o programa ArcGIS 9.3/ArcMap®. Com o uso da ferramenta “buffer”, estabeleceu-se raio de 100 km em torno de cada um dos pontos que foram então cruzados com o mapa de solos para posterior

cruzamento com os elementos do mapa de solo. Com base nesse procedimento, pôde-se identificar e quantificar quais os solos ocorrem no entorno de cada ponto, selecionando-se então o solo mais representativo de cada ponto. Após essa seleção, buscou-se no banco de dados de perfis de solos da Embrapa (http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/) aqueles que permitissem representar cada um dos solos predominantes nos três modelos de simulação, coletando-se dados de perfis de solos com a mesma classificação e oriundos de análises realizadas proximamente ao ponto de simulação selecionado. Para os perfis que não contavam com os parâmetros físico-hídricos, utilizou-se as equações de pedotransferência e curvas de retenção para os solos brasileiros (TOMASELLA, HODNETT, ROSSATO, 2000; VAN GENUCHTEN, 1980) e o método de estimativa de micro e macroporosidade do solo estabelecido por Stolf et al. (2011).

Figura 22 - Localização dos pontos de simulação com os modelos DSSAT/CANEGRO, APSIM-Sugar e SAMUCA.

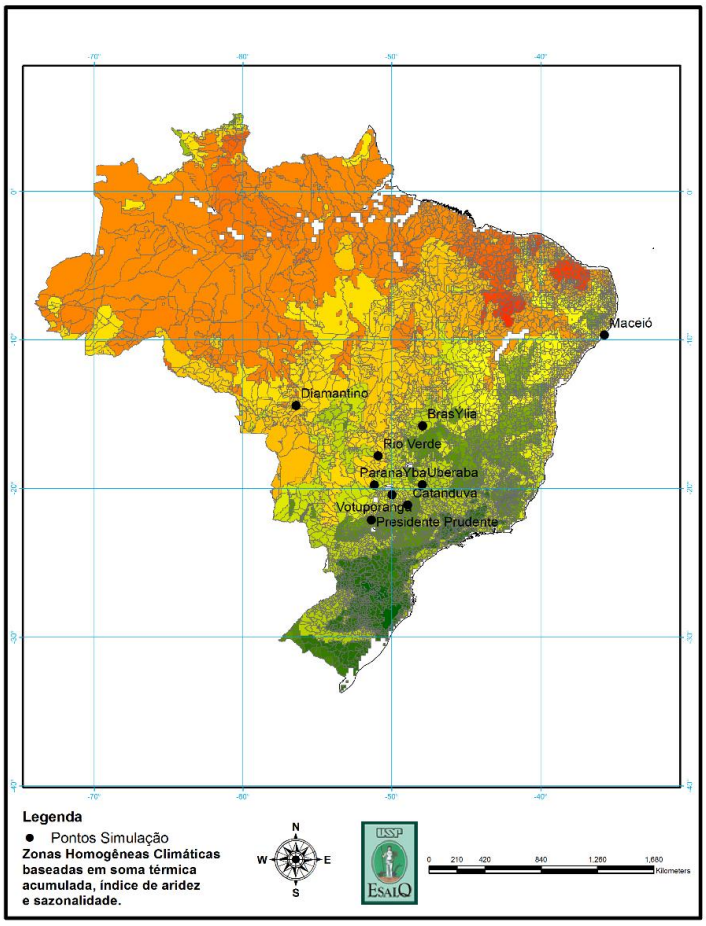


Figura 23 - Distribuição espacial dos pontos de simulação selecionados e distribuição das zonas climáticas homogêneas segundo van Wart et al. (2013).

Tabela 11 - Classificação da zona climática de cada ponto de simulação selecionado e área de cana-de-açúcar cultivada representada por cada uma das zonas climáticas.

Localização	UF	Lat. (°)	Long. (°)	Alt. (m)	Zonas Climáticas			Área de cana na zona climática (ha)
					Soma térmica	Aridez	Sazona-lidade	
Brasília	DF	-15,78	-47,93	1159,5	7	8	1	297832
Catanduva	SP	-21,11	-48,93	570	7	6	1	1728166
Diamantino	MT	-14,4	-56,45	286,3	9	7	1	292926
Maceió	AL	-9,66	-35,7	64,5	8	8	1	263993
Paranaíba	MS	-19,75	-51,18	331,2	8	6	1	972064
Pres. Prudente	SP	-22,11	-51,38	435,5	7	5	1	1051691
Rio Verde	GO	-17,8	-50,91	774,6	8	7	1	973901
Uberaba	MG	-19,73	-47,95	737	7	7	1	1695547
Votuporanga	SP	-20,41	-49,98	502,5	8	5	1	916611
Total								8192731
Total Brasil								9424615
Fração da área representada								86,9%

Para a configuração do manejo da cultura em cada local, foram simulados ciclos de cana-soca em duas épocas típicas de cada localidade (Tabela 12), no intuito de representar

condições diversas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar sem, contudo, aumentar em demasia o número de simulações. Os dados de adubação, irrigação, ocorrência de queimada, quantidade de gemas por metro linear, padrões de plantio e quantidade de cortes para a reforma do canavial, foram devidamente cadastrados de modo a representar canaviais comerciais crescendo sem limitações de ordem nutricional e com população de plantas considerada ideal. Detalhes sobre a configuração dos modelos para representação do manejo da cultura estão na Tabela 12. A produtividade atingível de cada localidade foi assumida como a média ponderada de cada data de colheita, calculada pela fração colhida em cada uma das datas simuladas (Tabela 12). Para o modelo AS, o efeito do nitrogênio foi simulado a partir de um manejo preconizando a aplicação de 100 kg·ha^{-1} de nitrogênio na forma de ureia, na profundidade de 0,075 m, oito semanas após o plantio/colheita da cultura em todas as simulações. De modo a melhor representar o ciclo do nitrogênio nos solos brasileiros, o modelo AS foi alterado quanto a taxa de desnitrificação, que passou para 0,001379 kg [solo]·mg^{-1} [C]·d^{-1} e a fração de perda de nitrificação na forma de desnitrificação para 0,2%, de acordo com Thorburn et al. (2010).

Tabela 12 – Descrição do manejo da cultura e classificação do solo predominante por município selecionado para as simulações

Estação	**Solo Predominante**	**Época**	**Início do ciclo**	**Idade de Colheita (meses)**	**Espaça-Mento (m)**	**Profund. Ef. Sist. Radicular (m)**	**Irrigação/ Sequeiro**[9]	Fração da área colhida (%)
Brasília	Lat. Verm. Escuro distrófico	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	I 90mm	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	I 90mm	50
Catanduva	Arg. Verm. Amarelo	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	S	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	S	50
Diamantino	Lat. Verm. Escuro distrófico	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	I 90mm	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	I 90mm	50
Maceió	Arg. Am. dist. fragipânico	Precoce	15/11	12	1,4	0,5	I 250 mm	50
		Tardia	15/4	12	1,4	0,5	I 250 mm	50
Paranaíba	Lat. Verm. Escuro álico	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	I 90mm	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	I 90mm	50
Pres. Prudente	Arg. Verm. Amarelo	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	I 90mm	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	I 90mm	50
Rio Verde	Lat. Verm. Escuro distrófico	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	S	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	S	50
Uberaba	Lat. Verm. Am. álico	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	I 90mm	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	I 90mm	50
Votuporanga	Arg. Verm. Amarelo	Precoce	15/5	12	1,4	1,5	S	50
		Tardia	15/11	12	1,4	1,5	S	50

[9] S representa sequeiro e I representa as simulações com irrigação, seguido da lâmina aplicada ao longo ao ciclo

4.4 Geração dos Cenários Climáticos Futuros

A linha de base das simulações foi constituída por uma série de 31 anos de dados diários, assumindo-se [CO_2] de 390 ppm de modo a representar o meio da série climática. As projeções climáticas futuras foram geradas pela equipe responsável pela parte climática do projeto AgMIP, a qual, por sua vez utilizou dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (*CMIP3*)* (Meehl et al., 2007). Detalhes dos três cenários climáticos gerados estão apresentados na Tabela 13. Dentre 15 opções disponibilizadas pelo projeto CMIP3, selecionou-se 3 modelos de circulação global (GCM) que melhor representavam a variabilidade esperada principalmente quanto ao volume de chuvas, mas representando também alguma diferença quanto a temperatura do ar e radiação solar, seguindo ao que foi utilizado por Singels et al. (2013) (Tabela 13).

Os GCM´s utilizados neste estudo foram: 1) *Gfdl 2.0, 2) Ipsl cm4, e 3) Ukmo Hadcm3*, adotando também a série entre 1980 a 2010 e gerando projeções futuras para o período entre 2040 a 2070, permitindo assim a comparação com a série da linha de base. Os cenários climáticos foram gerados com base no método Delta (Gleick, 1986; Wilby et al. 2004), no qual os dados diários observados foram ajustados com os desvios mensais de temperatura do ar (diferença entre a média mensal do GCM futuro e a série de linha de base) e a porcentagem de variação da chuva a cada mês. Dessa forma, produziu-se um cenário climático futuro que reflete as variações projetadas de variação de chuva e temperatura, bem como as alterações esperadas nos padrões sazonais. Não foram simuladas alterações na radiação solar. A caracterização climática resumida da linha de base e de um dos cenários futuros gerados por um dos GCM´s estão apresentadas, respectivamente, nos anexos A, B e C.

Com as séries históricas de cada estação modificada, os dados foram organizados em dois cenários de emissões (A2 e B1) e por modelo de circulação geral (E, I e P, Figura 24). Estes dados climáticos foram formatados e reorganizados no formato de arquivo de cada modelo (SAMUCA, APSIM e DSSAT) e então inseridos para simulação da produtividade com base em cenários futuros.

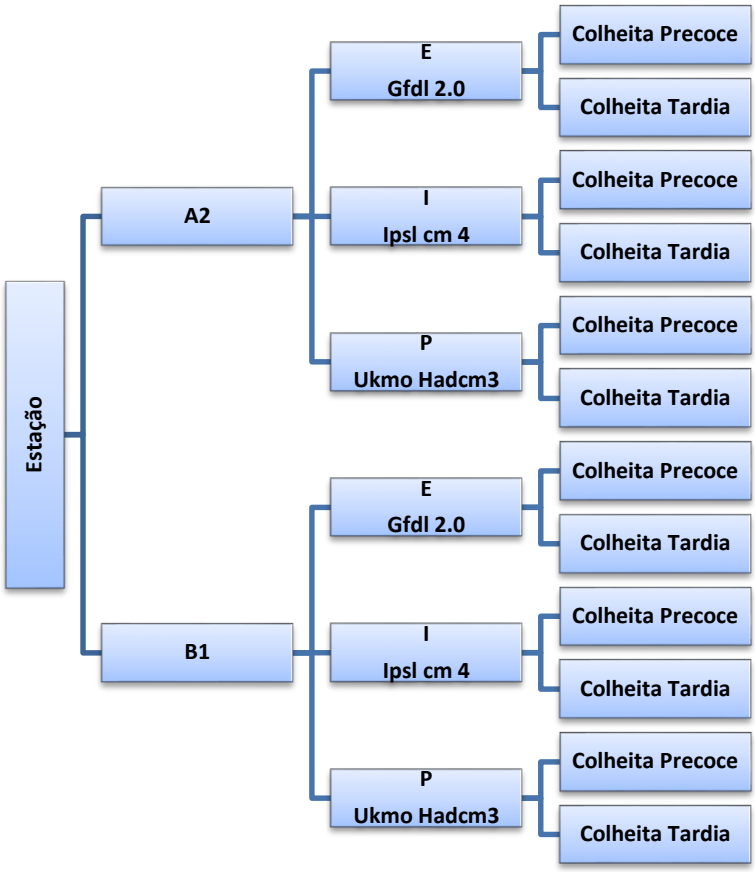


Figura 24 – Representação esquemática dos cenários climáticos futuros utilizados para a simulação com os três modelos de cana-de-açúcar. A2 e B1 representam cenários de emissões. E, I e P representam os cenários climáticos futuros gerados com os modelos GFdl 2.o, Ipsl cm4 e Ukmo Hadcm3, respectivamente

Para as simulações das projeções futuras acrescentou-se CO_2 atmosférico, na concentração de 550 ppm e 450 ppm, respectivamente, para os cenários econômicos de emissões A2 e B1. 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 somaram 108 tratamentos (9 municípios · 2 cenários · 3 GCM's · 2 períodos de corte) que somados à simulação do cenário atual (9 municípios · 1 cenário · 2 períodos de corte = 18), totalizaram 126 tratamentos. Sabendo que essas simulações foram feitas para 30 anos (entre 1980 e 2010), tem-se que os modelos DC e AS simularam 3780 ciclos de cana-de-açúcar. O modelo SAMUCA, por seu caráter estocástico, simulou 3000 vezes cada tratamento, totalizando 11.340.000 simulações para compor o cenário atual e os cenários futuros.

Tabela 13 - Média anual atual e variações introduzidas por cada modelo de circulação geral da atmosfera utilizado para a geração dos cenários climáticos futuros

Localidade	Cenário de emissão B1												Atual			
	E - Gfdl 2,0				*I - Ipsl cm4*				*P - Ukmo Hadcm3*							
	RS	TMax	TMin	Chuva	RS	TMax	TMin	Chuva	RS	TMax	TMin	Chuva	RS	TMax	TMin	Chuva
Brasília	14,6	28,3	18,4	1320	14,6	28,1	18,3	1599	14,6	28,2	18,3	1514	15,5	26,7	16,4	1509
Catanduva	16,8	31,3	20,0	1253	16,8	31,2	19,9	1319	16,8	31,1	19,9	1406	18,0	29,8	17,9	1325
Diamantino	18,3	34,3	22,1	1887	18,3	34,1	21,9	2022	18,3	34,6	22,4	1811	19,6	32,6	20,4	1823
Maceió	19,8	30,7	22,2	1713	19,8	30,9	22,4	2277	19,8	30,6	22,0	1806	19,0	29,3	21,3	1950
Paranaíba	17,9	32,7	20,6	1446	17,9	32,7	20,5	1428	17,9	32,8	20,6	1507	21,7	30,9	18,6	1437
Pres. Prudente	17,8	30,8	20,4	1369	17,8	30,9	20,5	1375	17,8	30,7	20,3	1442	16,9	29,1	18,1	1347
Rio Verde	18,1	31,4	19,3	1595	18,1	31,4	19,3	1706	18,1	31,4	19,3	1754	22,1	29,6	17,6	1614
Uberaba	18,7	31,2	18,5	1614	18,7	31,1	18,3	1653	18,7	31,1	18,4	1739	19,9	29,4	16,7	1597
Votuporanga	17,0	32,0	20,7	1293	17,0	31,9	20,6	1359	17,0	31,8	20,6	1442	20,8	30,2	18,8	1351
	Cenários de emissão A2															
Brasília	14,6	28,9	19,0	1201	14,6	28,7	18,8	1658	14,6	29,0	19,1	1568				
Catanduva	16,8	31,7	20,4	1325	16,8	31,6	20,3	1394	16,8	32,1	20,8	1390				
Diamantino	18,3	35,0	22,8	1738	18,3	34,7	22,5	2094	18,3	35,6	23,4	1782				
Maceió	19,8	31,3	22,8	1434	19,8	31,5	23,0	2171	19,8	30,9	22,4	2024				
Paranaíba	17,9	33,8	21,7	1433	17,9	33,2	21,0	1504	17,9	33,8	21,7	1433				
Pres. Prudente	17,8	31,0	20,5	1404	17,8	31,3	20,9	1491	17,8	31,8	21,4	1362				
Rio Verde	18,1	32,0	19,9	1579	18,1	31,9	19,8	1814	18,1	32,3	20,2	1695				
Uberaba	18,7	31,8	19,1	1504	18,7	31,6	18,9	1746	18,7	32,1	19,4	1729				
Votuporanga	17,0	32,4	21,1	1351	17,0	32,3	21,1	1438	17,0	32,8	21,5	1422				

4.5 Descrição dos dados de produtividade real

Foram utilizados dados de produtividade obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponíveis no Sistema IBGE de recuperação automática Levantamento Sistemática da Produção Agrícola (http://www.sidra.ibge.gov.br/), considerando os dados na escala municipal contidos em cada região homogênea apresentada na Tabela 11. Para eliminar o efeito do incremento tecnológico sobre a produção, a tendência de crescimento da produtividade foi eliminada por análise de regressão. A análise dos dados de produtividade coletados ao longo dessas 7 safras revelou uma taxa de incremento médio anual de 0,42%. Ainda, no intuito de reduzir o efeito das alterações de manejo e melhoramento genético na estimativa da produtividade, atual, optou-se por utilizar dados do IBGE coletados entre as safras 2006 e 2012, uma vez que este período, em teoria, representaria melhor as condições produtivas atuais dos canaviais brasileiros, especialmente no que concerne ao uso da mecanização na colheita.

4.6 Modelos de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

Considerando-se que os resultados de Asseng et al. (2013) sugerem que pelo menos três MCP´s sejam empregados para se garantir a redução das incertezas das projeções, apresenta-se neste trabalho um novo modelo para simulação do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, no intuito de contribuir para a expandir a capacitação brasileira na linha de modelagem, avançando em relação aos trabalhos em que apenas a técnica de simulação é aplicada.

Sobre isso, Sinclair & Seligman (1996) e Dourado-Neto et al. (1998) destacam a importância do desenvolvimento pelos próprios cientistas dos próprios modelos, permitindo aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos envolvidos no processo de simulação e sobre as incertezas inerentes na modelagem agrícola. No mundo, são poucos os grupos plenamente capazes de desenvolver modelos de culturas baseados em processos; neste campo, a ciência agronômica brasileira tem foco maior na simulação utilizando modelos desenvolvidos em outros países. Outro aspecto interessante desse objetivo é alinhar este trabalho às premissas do projeto AgMIP quanto à inclusão da incerteza das simulações por meio do uso de vários modelos. Uma opção neste sentido é o uso de modelos estocásticos permitindo computar a incerteza da simulação dentro de um único modelo, como será discutido mais adiante nesta proposta.

Assim, este trabalho apresenta a estrutura e o funcionamento de um modelo estocástico para simulação do crescimento e produção considerando-se a incerteza dos parâmetros do modelo e das variáveis de entrada (notadamente clima e solo) nas variáveis de saída.

4.7 Desenvolvimento de um modelo estocástico para cana-de-açúcar

O modelo ***Simulador Agronômico modUlar para Cana-de-Açúcar*** (SAMUCA) leva em conta resultados de literatura específica para cana-de-açúcar bem como os novos algoritmos gerados a partir dos experimentos no Brasil, em conjunto com abordagens clássicas utilizadas nos principais modelos do mundo. O modelo baseia-se na estrutura proposta por Marin & Jones (2014), com diversas alterações na modelagem de alguns processos fisiológicos, adaptando-o para simulação estocástica levando em conta a correlação entre os parâmetros e variáveis de entrada do modelo, podendo-se então realizar as simulações baseando-se na abordagem das variáveis aleatórias correlacionadas. Para tanto, aplicou-se uma extensão do método GLUE (do inglês, *Generalized Likelihood Uncertainty Estimator*) (Beven & Binley, 1992) em conjunto com a técnica da decomposição de matrizes de Toeplitz-Cholesky (Baigorria & Jones, 2010) na forma de um algoritmo de multiplicação de matrizes para geração de números aleatórios correlacionados.

No modelo SAMUCA, a incerteza pode ser computada quando oriunda dos parâmetros genéticos, bem como quando derivada dos dados de clima e solo. Para computar a incerteza decorrente dos parâmetros genéticos no modelo SAMUCA, baseou-se na literatura sobre fisiologia de cana-de-açúcar e em observações de campo. Quanto ao solo, uma opção é inserir a incerteza decorrente da extrapolação espacial a partir de simulações pontuais. Sobre o clima, por fim, pode-se avaliar como a incerteza em uma variável meteorológica pode repercutir nas estimativas do modelo. Neste trabalho, fez-se uma análise teórica sobre a influência da incerteza nos parâmetros genéticos sobre as simulações de massa seca de colmos para a cana-de-açúcar.

O modelo SAMUCA simula o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar usando algoritmos baseados em processos biofísicos, incluindo fenologia, desenvolvimento de copa, perfilhamento, acumulação de biomassa e partição, crescimento radicular e o efeito do estresse hídrico. As variáveis de estado (Tabela 14) são atualizadas usando a integração numérica de Euler com passo de tempo diário. O modelo foi projetado para simular o crescimento da planta inteira, bem como de seus componentes: massa de colmos, de folhas, de raízes, de sacarose no colmo, assim como a fenologia da cultura e outras variáveis associadas.

Ele requer parâmetros de solo que controlam o balanço hídrico (UWL, LWL, SWL e profundidade do sistema), bem como dados meteorológicos em intervalo diário (radiação solar, temperatura máxima e mínima e chuva) e dados de irrigação.

O código fonte do modelo foi escrito em FORTRAN 90 porque essa linguagem continua sendo predominante em modelagem de culturas agrícolas, principalmente pela facilidade na obtenção de códigos livres disponíveis referentes a algoritmos programados para outras culturas e pela simplicidade de operação.

Tabela 14 - Variáveis de estado do modelo SAMUCA, descrições, unidades e categorias.

Variáveis de Estado	Descrição	Unidades	Categoria
NSTK	Número de colmos por unidade de área	colmos·m^{-2}	Fenologia
LN	Número de folhas verdes por colmo	folhas·colmo^{-1}	Desenvolvimento foliar
LNTOTAL	Número total de folhas (verdes+secas) por colmo	folhas·colmo^{-1}	Desenvolvimento foliar
LA	Área foliar	m^2	Desenvolvimento foliar
W	Massa seca total da planta	ton·ha-1	Acumulação de biomassa
WA	Massa seca da parte aérea	ton·ha^{-1}	Acumulação de biomassa
WR	Massa seca de raízes	ton·ha^{-1}	Acumulação de biomassa
WSDM	Massa seca de colmos	ton·ha^{-1}	Acumulação de biomassa
WSFM	Massa fresca de colmos	ton·ha^{-1}	Acumulação de biomassa
WL	Massa seca de folhas	ton·ha^{-1}	Acumulação de biomassa
WSUC	Massa de sacarose no colmo	ton·ha^{-1}	Acumulação de sacarose
SLENG	Comprimento do colmo	m	Altura da planta
RLD	Densidade de comprimento de raízes na camada L do solo	cm·cm^{-3}	Raízes e estresse hídrico
SWC_a	Umidade volumétrica do solo na camada L	mm	Água no solo

4.7.1 Composição da planta

Sabendo-se que o produto primário da fotossíntese é a glicose, é necessário estabelecer uma composição média de referência para uma planta de cana-de-açúcar, para então proceder a conversão da glicose para outros componentes. Penning de Vries et al. (1974) e Thonrley & Jonhson (2000) sugerem que a composição de referência para cana-de-açúcar pode ser estabelecida conforme descrito na Tabela 15. Nela, evidentemente, tem-se valores que descrevem uma planta adulta de cana-de-açúcar; uma vez que a composição da planta varia ao longo do ciclo de crescimento, a Tabela 15 trata-se de uma aproximação que pode ser melhorada. Nela, tem-se que para 1 kg de matéria seca da planta são necessário 1,36 kg de glicose sintetizadas na fotossíntese, valor este próximo do observado por Machado (1981) apud Scarpare et al. (2012) em canavial brasileiro cultivado com a variedade NA56-79, onde o teve equivalente em glicose ponderado foi de 1,27 kg·kg^{-1}.

Tabela 15 - Composição estrutural e equivalente em glicose para a produção de cada composto, considerando a planta de cana-de-açúcar.

Categoria	Fração na planta	Subcategoria	Fração ponderada na planta		Equivalente Glicose		Equivalente Glicose Ponderado (Planta)
Carboidratos	0,69	Celulose	0,21	0,145	1,173		0,170
		Hemicelulose	0,19	0,131	1,200		0,157
		Amido	0,01	0,007	1,173		0,008
		Pectina	0,02	0,014	1,212		0,017
		Sacarose	0,51	0,352	1,096		0,386
		Glicose	0,03	0,021	1,000		0,021
		Frutose	0,03	0,021	1,000		0,021
		Subtotal	1,00				
Nitrogenados	0,04	Aminoácidos	0,10	0,004	1,268		0,005
		Proteína	0,90	0,036	2,336		0,084
		Subtotal	**1,00**				
Lignina	0,10	Álcool coniferil	**1,00**	0,100	2,170	*	0,217
Ácidos Orgânicos	0,05	Malato	0,50	0,025	1,000		0,025
		Citrato	0,50	0,025	1,000		0,025
		Subtotal	**1,00**				
Lipídios	0,05	Glicerol triolate	**1,00**	0,050	3,000		0,150
Cinzas	0,07	Cinzas	**1,00**	0,074	1,000		0,074
Total	**1,00**			**1,00**			**1,360**

4.7.2 Simulação dos componentes da cultura

O modelo aplica uma abordagem que parte do desenvolvimento foliar para simular o desenvolvimento da copa e, então, extrapolar para uma unidade de área de terreno, multiplicando a área média das folhas pelo número de folhas por planta, e este produto pelo número de plantas por unidade de área.

A concepção do algoritmo para simulação do perfilhamento segue a abordagem proposta por Inman-Bamber (1991), em que funções baseadas na soma térmica descrevem as fases da cultura, a taxa de perfilhamento, o pico populacional, a fase de senescência e a fase de maturação. No modelo SAMUCA, a soma térmica acumulada diariamente (GDD) segue uma das abordagens (método 2) sugerida por McMaster et al. (1997) (Eq. 11) como um dos métodos que melhor descreve o desenvolvimento na cultura do milho, tendo sido então aplicado para cana-de-açúcar no modelo SAMUCA.

$$GDD = \left[\frac{(Tmax+Tmin)}{2}\right] - Tbase \qquad (11)$$

em que Tmax é a temperatura máxima diária, Tmin é a temperatura mínima diária, Tbase é a temperatura base da cultura. Nesta abordagem, admite-se que se Tmax < Tbase, então Tmin = Tbase.

Cada perfilho é assumido como um colmo na maturidade, e todas as variáveis de desenvolvimento têm o colmo como referência. Os parâmetros relacionados a este processo são CHUPEAK, CHUDEC e CHUMAT (Tabela 16, Figura 25). Outro processo relacionado com a fenologia da cultura no modelo SAMUCA é o que controla a emergência da planta, que depende da profundidade de plantio e velocidade de alongamento da brotação até atingir a superfície do solo. No modelo SAMUCA, admite-se que a taxa de alongamento em direção à superfície do solo é de 0,8 mm $^{o}C^{-1}$ dia^{-1}, como também empregado no modelo APSIM-Sugar (Apsim, 2014). Para soqueiras, o modelo SAMUCA admite que a brotação partirá de uma profundidade de 10 cm com a mesma taxa de alongamento em direção a superfície. Assim, para o modelo SAMUCA, a profundidade de plantio importa para a simulação do desenvolvimento da cultura.

Tabela 16 - Parâmetros do modelo SAMUCA específicos para cada variedade, descrições, unidades e faixa de variação utilizados no processo de otimização com o GLUE

Categoria	Parâmetro	Descrição	Faixa de Variação		Unidades
			Mínimo	Máximo	
Fotossíntese	RUE	Taxa de produção de carboidratos acima do solo, por unidade de energia radiante interceptada (densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, PAR), após descontar a respiração	1,65[10]	2,0[10]	g MJ^{-1}
	EXTCOE	Coeficiente de extinção da radiação	0,33[11]	0,70[11,12]	adimensional
Fenologia	POP_PEAK	Máxima população de plantas por unidade de área	11,0[11]	14,0[11]	colmos·m^{-2}
	POP_MAT	População de plantas na fase de maturação	7,0[11]	11,0[11]	colmos·m^{-2}
	CHUDEC	Graus-dia acumulados para que se inicie a fase de decréscimo da população de plantas, após o plantio/corte	2900,0[11]	3500,0[11]	ºC·d
	CHUMAT	Graus-dia acumulados desde o plantio/corte para o início da fase de maturação	3500,0[11]	4200,0[11]	ºC·d
	CHUPEAK	Graus-dia acumulados desde o plantio/corte até o pico populacional	1000,0[11]	2000,0[11]	ºC·d
	CHUSTK	Graus-dia acumulados, desde a emergência da planta até a emergência do colmo	180,0 [11]	300,0 [11]	ºC·d
Desenvolvimento foliar	SLA	Área foliar específica na base úmida na base seca.	28,0[13]	100,0[10]	g·m^{-2}
	MLA	Área média de cada folha	400,0[14]	550,0[11]	cm^2
	PHY	Filocrono	120,0[12]	180,0[19]	ºC·d
	LFMAX	Número máximo de folhas verdes por colmo saudável e sem estresse hídrico	8,0[15]	12,0[11]	folhas
Partição de biomassa	SGPF	Fração máxima de fotoassimilados alocados para a produção de colmos	0,68[10]	0,91[16]	t·t^{-1}
Partição de sacarose	SUCMAX	Conteúdo máximo de sacarose no internódio, na base seca	0,49[17]	0,75[14]	t·t^{-1}
Crescimento e Desenvolvimento	TBase	Temperatura base	8[18]	12[19]	ºC
Extensão da planta	PERCOEF	Taxa de extensão de uma planta sem estresse	0,232*	0,232*	mm·$ºC^{-1}$·d^{-1}
Raízes e estresse hídrico	RWEP1	Razão entre o suprimento hídrico do solo e a	2,0*	2,0*	adimensional

[10] Muchow et al. 1994.
[11] Observações de campo.
[12] Scarpare et al., 2012
[13] Bonnet (1998); Terauchi & Matsuoka (2000); Scarpare et al. (2012); Irvine (1975)
[14] Marin et al. (2011)
[15] Nassif et al. (2012), Nassif et al. (2013)
[16] Singels et al. 2005
[17] Robertson et al. (1996)
[18] Inman-Bamber, G. (1994)
[19] Singels et al. 2008

		evapotranspiração máxima a partir do qual a fotossíntese sofre limitação			
	RWEP2	Razão entre o suprimento hídrico do solo e a evapotranspiração máxima a partir do qual a expansão celular e o desenvolvimento sofrem limitação	1,0*	1,0*	adimensional
	SRL	Comprimento específico de raízes	15,0[20]	20,0[21]	m g^{-1}

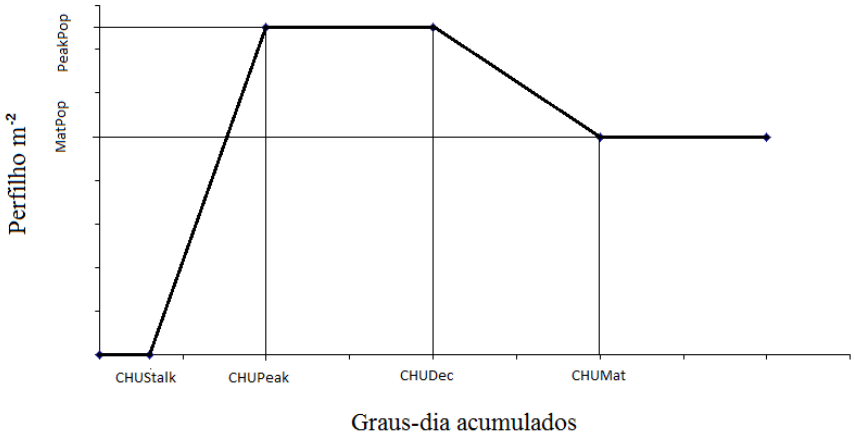


Figura 25 - Representação esquemática do algoritmo de perfilhamento da cultura utilizado no modelo SAMUCA.

A emergência da folha baseia-se no conceito de filocrono, assumido como um único valor ao longo do ciclo da cultura (parâmetro PHY, Tabela 16), representando, portanto, uma simplificação da abordagem utilizada nos modelos AS e DC, que consideram a variação do valor do filocrono para cana-de-açúcar ao longo do ciclo. Quando a planta atinge o número máximo de folhas verdes (parâmetro LFMAX da Tabela 16), a folha mais velha da planta senesce por consequência, e sua área respectiva é subtraída da área da planta de modo a manter coerência para a simulação da fotossíntese da planta.

O algoritmo que simula a área foliar da copa assume que as folhas têm área equivalente à área média de cada folha (MLA), a qual é admitida como constante para todo o ciclo da cultura, a despeito das evidências experimentais indicando variação da dimensão da folha ao longo do ciclo (Figura 26). A decisão por manter essa dimensão associada a um único parâmetro

[20] Ball-Coelho et al. (1992)
[21] Laclau & Laclau (2009)
* O parâmetro não foi otimizado.

do modelo foi tomada após comparar a estratégia utilizada numa versão anterior do modelo (Marin e Jones, 2014 – Figura 27) com a atual, e notar que a simplificação trazida pelo uso de um único parâmetro associado a dimensão da folha tornava a aplicação do modelo mais rápida e simples, com pequena perda de qualidade nas estimativas de LAI e biomassa de colmos. Este aspecto é especialmente interessante para simulação estocástica com a abordagem aqui utilizada.

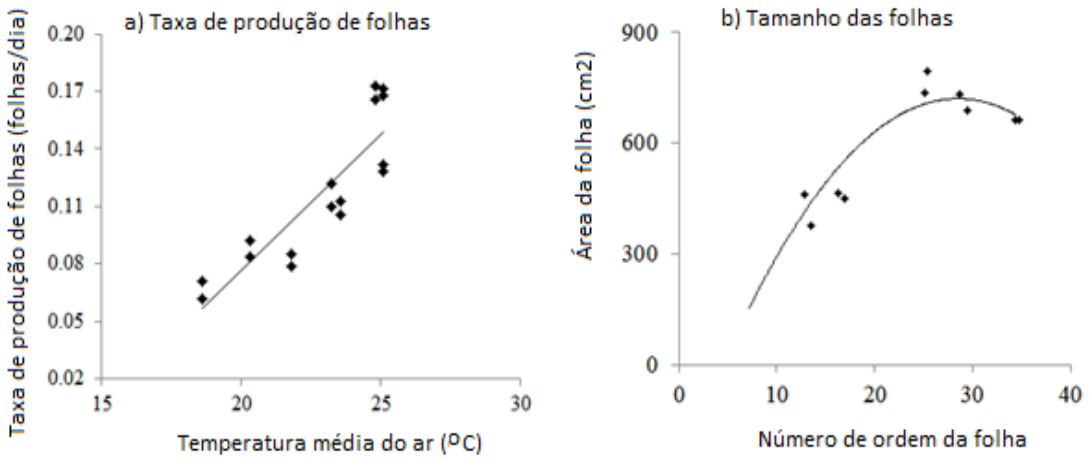


Figura 26 - a) taxa de produção de folhas em função da temperatura; e b) tamanho da folha em função do número de ordem da folha, medido na variedade SP83-2847.

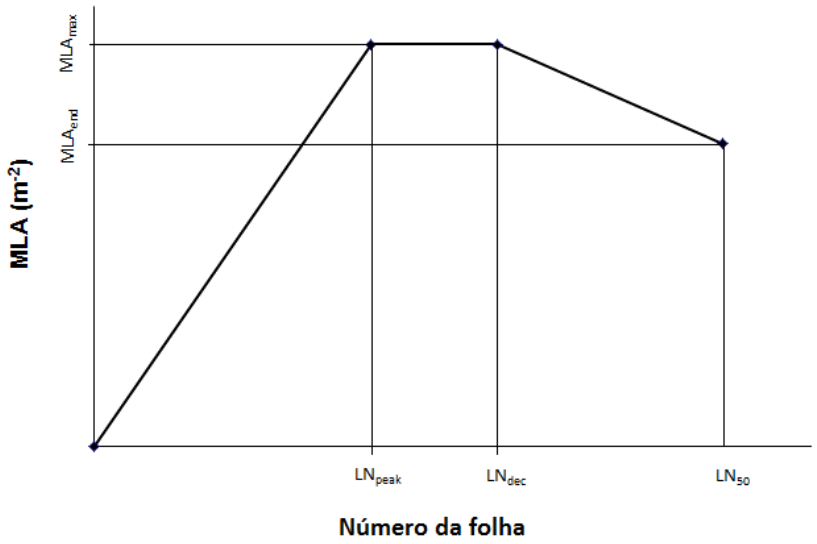


Figura 27 - Representação esquemática do algoritmo de desenvolvimento foliar utilizado no modelo de Marin e Jones (2014), em que LN é a área foliar e MLA é a área média de cada folha.

O incremento diário do número de folhas por planta (dNLeaf) é dado pelo produto dos graus-dia acumulados (GDD) em um dia pelo valor de PHY. Os dados utilizados para ajustar as faixas de variação para o processo de otimização foram obtidos de Marin et al. (2011) e Nassif et al. (2013). O modelo SAMUCA apresenta uma diferença em relação às abordagens utilizadas no modelo DC, incluindo no algoritmo de simulação do crescimento foliar um limitador da taxa de crescimento baseado na abordagem fonte-dreno para o balanço de carbono na planta. Neste algoritmo, o dreno é representado pela demanda por fotoassimilados para o crescimento foliar disponível a cada dia. Quando a quantidade de carboidratos necessário para o crescimento potencial das folhas excede a de fotoassimilados disponível para o crescimento foliar, dNLeaf é reduzido para ajustar-se a este montante disponível de fotoassimilados, com base na área foliar específica (SLA, Tabela 16). Vale notar que no modelo SAMUCA, SLA não é empregada para dimensionar a área foliar em função do fotoassimilado disponível, mas sim para restringir a dimensão da copa em relação a quantidade de fotoassimilados disponíveis a cada dia, mantendo a coerência biofísica do modelo.

Vale destacar, também, que embora SLA varie com a variedade e em resposta a outros fatores da planta e do ambiente, assume-se nessa versão do modelo que SLA seja constante ao longo do ciclo da cultura (Tabela 16). Apesar das evidências levantadas por Irvine (1975), Silva et al. (2005) e Marin et al. (2011) sobre essa relação, também se observou pouco ganho na qualidade das simulações utilizando-se um algoritmo especifico em relação a abordagem aqui empregada (Marin e Jones, 2014).

O modelo computa a fotossíntese baseando-se no conceito de eficiência de uso de radiação (RUE), seguindo a proposta de Keating et al. (1999) e aplicada no modelo AS, representando a massa de carboidrato assimilado por unidade de radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR) interceptada pela copa (g MJ^{-1}), após a respiração (Eq. 12). Assim, nesta versão do SAMUCA a respiração não é computada, diferentemente da abordagem utilizada por Marin e Jones (2014). Com o objetivo de simular a resposta da taxa de fotossíntese em relação à variação da [CO_2], inclui-se o fator $RUE_{modifier,}$ descrito logo abaixo. Os valores máximos e mínimos RUE empregados no processo de otimização (Tabela 16) foram obtidos de Muchow et al. (1994). Como mencionado, o modelo baseia-se na densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PAR) interceptados pela copa da cultura para calcular a taxa diária de produção de carboidrato. A interceptação da radiação é simulada com base na lei de Beer-Bouger, assumindo o valor de índice de área foliar (LAI) simulado diariamente e o coeficiente de

extinção correspondente ao parâmetro EXTCOE (Tabela 15), também assumido como fixo ao longo do ciclo da cultura. A taxa diária de produção de carboidratos pela planta é dada pela Eq. 12:

$$\mathrm{PG} = \mathrm{RUE} \cdot \mathrm{LI} \cdot \mathrm{AGEF} \cdot \mathrm{RUE}_{\mathrm{Modifier}} \cdot \mathrm{SWSP} \tag{12}$$

em que PG é a taxa diária de produção de carboidrato ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) [base na área projetada no solo]; AGEF é um fator de idade da planta incluído para reduzir a taxa de fotossíntese conforme a planta torna-se mais velha (Eq. 13), representando a redução na concentração específica de nitrogênio na folha, a qual por sua vez reduz a taxa fotossintética (Allison et al., 2007; Inman-Bamber et al., 2008); LI é a proporção de radiação interceptada pela copa em função do índice de área foliar (LAI) e do coeficiente de extinção (EXTCOE); SWSP é o efeito do estresse hídrico no solo sobre a fotossíntese (descrito pela Eq. 28), sendo que SWSP = 1 significa ausência de estresse por deficiência hídrica e SWSP = 0 significa estresse por deficiência hídrica em nível máximo. $\mathrm{RUE}_{\mathrm{Modifier}}$ é um fator de ajuste para computar o efeito relativo da [CO_2] sobre PG, admitindo-se que $\mathrm{RUE}_{\mathrm{Modifier}}$ é igual a unidade para [CO_2]=390 ppm (assumido como valor de referência atual ou linha de base), e com variação de acordo com a Eq. 14. A abordagem de $\mathrm{RUE}_{\mathrm{Modifier}}$ é utilizada no modelo APSIM-Sugar e segue o desenvolvimento metodológico apresentado por Howden et al. (2007), Webster et al. (2009) e Biggs et al. (2013). Importa notar que em relação a abordagem do APSIM-Sugar, há uma modificação incorporada na Eq. 14 após o trabalho de Marchiori et al. (2010), que encontraram a resposta fotossintética da cana-de-açúcar sendo maior que a mostrada na Eq. 14, originariamente utilizada no modelo APSIM-Sugar.

$$AGEF = e^{[-0{,}000401 \cdot (GDD - 4000)]} \tag{13}$$

$$\mathrm{RUE}_{Modifier} = \left(\frac{1}{390} \cdot 0{,}05\right) \cdot [CO_2] + 0{,}95 \tag{14}$$

em que [CO2] é a concentração de dióxido de carbono na atmosfera considerada para a simulação.

A taxa de alongamento do colmo é função da soma térmica e é calculada com base em um passo de tempo horário (Eq. 15) e de um fator de idade (AGEF, Eq. 13) de acordo com Inman-Bamber et al. (2008). A simulação da altura da planta continua dissociada do cômputo diário da massa de colmo no modelo SAMUCA, assim como em Marin & Jones (2014), uma vez que não há dados suficientes que permitam estabelecer relações envolvendo a massa específica do colmo e de suas partes componentes (O´Leary et al., 2000).

$$dPER = (2.95 \cdot THour - 0{,}8516) \cdot PERCOEF \cdot SWSG \tag{15}$$

em que dPER é a taxa de alongamento da planta (mm·h^{-1}); THour é a temperatura horária (ºC); PERCOEF é a fração da elongaçao da planta devido à alongamento do colmo (Tabela 16); e SWSG é o fator de estresse por deficiência hídrica afetando o crescimento vegetativo como mostra a Eq. 29. A temperatura horária no modelo é estimada a partir dos valores máximo e mínimo utilizando uma distribuição sintética da temperatura do ar ao longo do dia, conforme Parton e Logan (1981). As suposições importantes no modelo são: (a) que a temperatura máxima irá ocorrer durante o dia, algumas horas antes do pôr do sol, (b) que a temperatura mínima vai ocorrer durante a madrugada, ou próxima ao nascer do sol, e (c) que a variação da temperatura durante o dia é descrita por uma função senoidal truncada, enquanto as temperaturas noturnas são descritas por uma função exponencial, como seguem:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{i,dia}} = \left(T_{\max} - T_{\min}\right)\ sen\left(\frac{\pi\ i_{h,dia}}{N+2a}\right) + T_{\min} \tag{16}$$

$$\mathrm{T}_{\mathrm{i,noite}} = T_{\min} + \left(T_s - T_{\min}\right)\ e^{-\left[\frac{b\ i_{n,noite}}{(24-N)}\right]} \tag{17}$$

em que: N é o fotoperíodo (h); T_i é a temperatura na hora *i*; Tmax e Tmin são as temperaturas máxima e mínima, respectivamente; Ts é a temperatura no momento do pôr-do-sol; $i_{h,\ dia}$ é o número de horas entre a hora da temperatura mínima e a hora atual (i) (deve ser considerada somente entre o nascer e o pôr do sol); $i_{h,\ noite}$ é o número de horas entre a hora do pôr do sol até a hora atual (i) (deve ser considerada entre o pôr do sol e o momento em que ocorre a temperatura mínima), *a* é um coeficiente relacionado com a defasagem da temperatura máxima,

e *b* é o coeficiente relacionado com a temperatura mínima; e *c* é um coeficiente que descreve o tempo entre a temperatura mínima e a do nascer do sol.

As regras de partição de massa seca para folhas, raízes e colmos são apresentadas nas Eqs. 18, 19 e 20, as quais, por sua vez, foram desenvolvidas com base nos dados de diversos trabalhos compilados por Marin et al. (2011) (Figura 28) e que concordam com os dados obtidos por Nassif et al. (2013) com a variedade RB86 7515. Com base nesses dados, assumiu-se que quando o fator de partição para o crescimento foliar (LGPF) é maior que o valor máximo de LGPF, o valor complementar a LGPF (1-LGPF) é o fator de partição para o crescimento do colmo (SGPF), que por sua vez busca descrever a capacidade de dreno para o crescimento estrutural do colmo. Antes da emergência da planta, assume-se que RGPF=1,0; SGPF=0,0 e LGPF=0,0. Após a emergência da planta, mas antes da emergência do colmo (DIAC<CHUSTK), assume-se que SGPF=0,2 e LGPF é então determinada por seu valor complementar. Finalmente, quando DIAC>CHUSTK, o modelo prioriza a alocação de carboidratos para os colmos e assume que LGPF=0,3. A biomassa destinada às raízes é produzida independentemente da biomassa da parte aérea, de modo que uma fração da biomassa da parte aérea é acrescentada diariamente à massa radicular (APSIM-Sugar, 2014). Esta proporção foi assumida como variando de 30% na emergência das plantas até 20% a partir da emergência do colmo (APSIM-Sugar, 2014). Vale lembrar que esta estratégia de partição se deve ao fato de RUE ser comumente medida com base na biomassa da parte aérea, e não da planta como um todo.

$$SGPF = \frac{1-\mathrm{LGPF}}{1+\mathrm{CHUSTK}\cdot e^{-DIAC}} \tag{18}$$

em que LGPF é o fator de partição para o crescimento foliar e SGPF é o fator de crescimento do caule. CHUSTK está descrito na Tabela 15 e DIAC é o número de graus dia acumulados desde o plantio/corte da cultura.

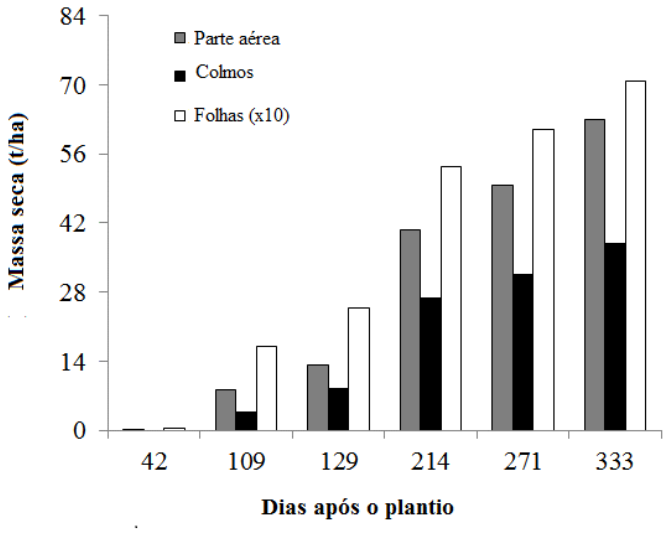


Figura 28 - Variação temporal da massa da massa seca e partição entre folhas, colmos e raízes de uma cultura de cana-planta instalada em Piracicaba, SP com a variedade SP83-2847. Fonte: Marin et al. (2011).

O modelo SAMUCA apresenta uma diferença em relação aos modelos DC e AS no algoritmo de acumulação de sacarose, estruturado para funcionar com base no número, tamanho e idade de internódios das plantas. A partição destinada ao crescimento dos colmos é em parte derivada para seu crescimento estrutural e em parte destinada à produção de sacarose, de acordo com a sua capacidade de dreno, a idade térmica do internódio e as características da variedade. A partição para sacarose propriamente dita é assumida como a quarta prioridade depois de folhas, raízes e para a fibra dos colmos. Este modelo conceitual baseia-se nas observações de Uys et al. (2007) e foram empiricamente derivadas a partir dos dados apresentados por van Dillewijn (1952) (Figura 29). Esta abordagem apoia-se no conceito de que os fotoassimilados excedentes após a distribuição do montante gerado pela fotossíntese seriam destinados para a produção de sacarose. Embora os fisiologistas de cana-de-açúcar já tenham identificado essa abordagem como uma simplificação excessiva do processo de acumulação de sacarose na cana-de-açúcar (ver Alexander, 1973, capítulo 6), ainda é difícil converter as abordagens disponíveis em algoritmos quantitativos para descrever a acumulação de sacarose na cana-de-açúcar.

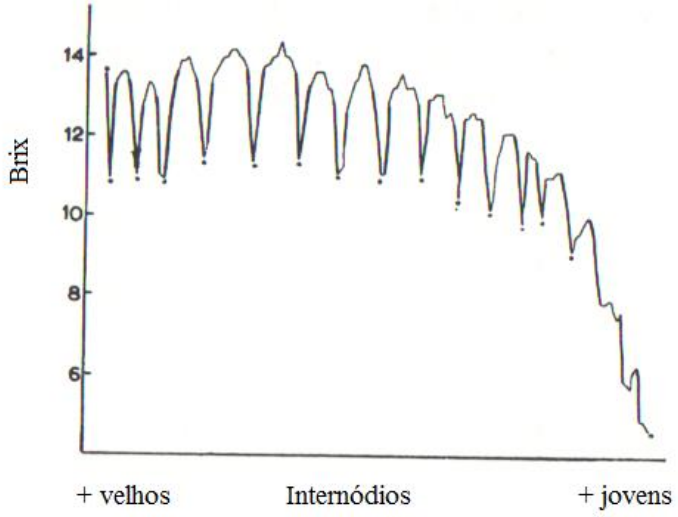


Figura 29 - Variação do brix entre internódios (representados pelos pontos) e dentro de cada internódio, decrescendo com a idade do internódio (da esquerda para direita). Adaptado de van Dillewijn (1952) e Alexander (1973)

Os fatores de partição para sacarose (SUCPF, Eq. 19) e fibra (FIBPF, Eq. 20) são atualizados diariamente para cada internódio (IN) e o efeito da temperatura do ar na acumulação de sacarose é indiretamente computada através das taxas de crescimento foliar, raízes e colmos, que são dependentes da temperatura. Isso porque a queda na temperatura reduz a taxas de crescimento desses componentes de modo não uniforme e também afetam a fotossíntese de modo diferenciado, normalmente gerando algum excedente de carboidratos sob condições de queda leve na temperatura. Do mesmo modo, o estresse hídrico é considerado diferentemente para fotossíntese e crescimento vegetativo, de modo que um estresse hídrico moderado também pode gerar excedente de carboidratos e acelerar o acúmulo de sacarose pela planta.

$$SUCPF_{IN} = \frac{SUCMAX}{[1+EXP(-IN+6)]} \tag{19}$$

$$FIBPF_{IN} = 1 - SUCPF_{IN} \tag{20}$$

em que SUCMAX é um parâmetro representando a concentração máxima de sacarose no internódio (t t^{-1}) com base na massa seca; IN é o número de ordem na planta sendo o primeiro internódio posicionado na base do colmo.

O teor de água no colmo é simulado a partir de uma derivação do método proposto por Martiné et al. (1999), com ajustes incluídos com base nos experimentos de Nassif et al. (2013) e Santos (2007). As equações 21 e 22 são utilizadas para calcular a taxa de variação da massa de água no colmo a cada dia, levando em conta a massa seca estrutural (no caso do SAMUCA apenas de fibras são consideradas) e a massa de sacarose acumulada.

$$dSTKWater = (3.607 \cdot dWS) - (3.078 \cdot dWSuc) \qquad \forall SWFP > 0{,}6 \qquad (21)$$

$$dSTKWater = (STKURed \cdot WS) \qquad \forall SWFP \leq 0{,}6 \qquad (22)$$

em que dSTKWater é a taxa de incremento diário de água a massa do colmo, dWS é a taxa de incremento diário da massa seca estrutural do colmo; dWSuc é a taxa de incremento diária de massa de sacarose no colmo; STKURed é um fator de redução da taxa de água no colmo em condições de seca severa e que varia em função da massa e da umidade de colmo, variando conforme mostra a Figura 30.

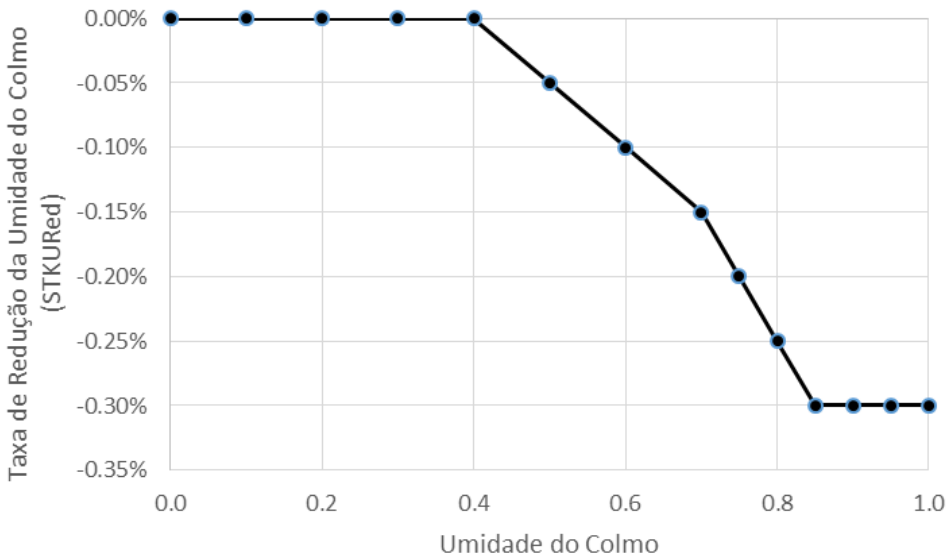


Figura 30 - Variação da taxa de redução da umidade relativa do colmo em função da umidade do colmo e da massa total do colmo, sob condições de estresse hídrico severo

4.7.2 Simulação dos componentes do solo

O crescimento radicular é expresso em termos da profundidade do sistema radicular e do comprimento de raízes em cada camada de solo. A taxa de aprofundamento das raízes foi

determinada com base nos dados de Laclau & Laclau (2009) (0,03 cm·ºC^{-1}·d^{-1}). O balanço hídrico do solo utilizado no modelo requer que um parâmetro denominado Fator de Ponderação da Distribuição Radicular (RWF_i) específico para cada camada de solo, seja informado. Com ele, o modelo busca representar o formato do bulbo radicular. A faixa de variação desse parâmetro vai de 1 – solo mais adequado ao crescimento radicular – até zero– solo inóspito para as raízes (Ritchie 1998), para cada camada de solo (*i*) (Eq. 23). O somatório dos valores de RWF_i para todo o perfil de solo precisa ser igual a 1. Como a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar no perfil segue um padrão exponencial (Liu & Bull, 2001; Laclau & Laclau, 2009), os valores de RWF estimados para os perfis simulados com o modelo seguiram a abordagem proposta por Jones et al. (1991) utilizando uma constante de geotropismo igual a 2.

$$RWF_i = \frac{\frac{(1-L_i)}{S_{maxdepth}}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{(1-L_i)}{S_{maxdepth}}} \tag{23}$$

em que L_i é a profundidade da camada de solo *i*, $S_{maxdepth}$ é a profundidade máxima do sistema radicular no perfil considerado para uma dada simulação, e n é o número de camada de solos para o perfil simulado.

A senescência das raízes é dada pela Eq. 24, derivada dos resultados de Jones & Kiniry (1998) e Ball-Coelho et al. (1992).

$$RootSene = \frac{(0{,}15 \cdot WR)}{(WR+1)} \tag{24}$$

em que RootSene é o percentual do total de raízes senescido a cada dia, e WR é a massa seca total de raízes da planta (g m^{-2}) [com base em área de solo].

A simulação da absorção de água pelas raízes utiliza a abordagem de Ritchie (1998) assumindo que as raízes (e a água no solo) são uniformemente distribuídas dentro de cada camada, e que a taxa máxima diária de absorção de água pelas raízes é de 0,07 cm^3 dia^{-1} (Singels et al., 2008). Com isso, tem-se que a taxa de absorção radicular pelas raízes (RWU_i) em cada camada *i* pode ser dada pela Eq. 25 e que o volume absorvido na camada *i* é representada por $RWUL_i$ (Eq. 26). Assim, o volume total de água absorvido em todo o sistema radicular (TRWU)

é dado pela integração de $RWUL_i$ em todo o perfil. É evidente que abordagens mais robustas podem tornar este algoritmo melhor embasado mecanísticamente (e.g. Van Lier et al., 2006) e devem ser objeto de futuras melhorias no modelo SAMUCA.

$$RWU_i = \frac{0{,}00267 \cdot \exp(62 \cdot (\theta_{v(i,t)} - \theta_{v(i,LL)})}{(6.68 - \ln(RLD_i))} \quad (25)$$

$$RWUL_i = RWU_i \, L_i \, RLD_i \quad (26)$$

em que RWU_i é a taxa de absorção de água pelas raízes na camada *i* (cm^3[água] cm[raíz]$^{-1}$ d^{-1}); $RWUL_i$ é o volume de água absorvido em toda a camada de solo (cm^3 [água] d^{-1}); L_i é a profundidade da camada de solo *i* (cm); e RLD_i é a densidade de comprimento de raízes na camada de solo *i* (cm [raíz] cm^{-3} [solo]; $\theta_{v(i,t)}$ e $\theta_{v(i,LL)}$ são respectivamente a umidade atual do solo na camada *i* e a umidade do solo no potencial equivalente a -15 atm para a camada *i*. O valor de RLD_i é também calculado de acordo com Jones & Kiniry (1986) utilizando a Eq. 27.

$$RLD_i = (W_r \cdot SLR \cdot RWF_i) \cdot R_{depth}^{-1} \quad (27)$$

em que Wr é massa seca de raízes (g cm^{-2}); SLR é o comprimento específico de raízes (g cm^{-1}); RWF_i é o fator de ponderação de distribuição de raízes (adimensional) para a camada (*i*); e R_{depth} é a profundidade do sistema radicular num determinado dia (cm).

Como já mencionado, dois fatores de estresse hídrico são simulados no modelo para levar em conta o efeito negativo da falta de água no solo na fotossíntese (SWSP, Eq. 28) e no crescimento vegetativo (SWSG, Eq. 29) (afetando processos como o perfilhamento, alongamento do colmo, produção e expansão foliar), assim como utizado na maioria dos modelos das famílias DSSAT e APSIM. Ambos são calculados a partir da razão entre a taxa potencial diária de absorção de água pelas raízes e a transpiração potencial da planta (Ritchie, 1998). Assim, assume-se que SWSP e SWSG reduzem linearmente a partir de 1,0 até 0,0 conforme a razão entre o potencial de absorção e a transpiração potencial cai abaixo de 1,0 e 2,0, respectivamente (Jones & Kiniry, 1986). Na versão atual, não são simulados estresses devidos a limitações nutricionais ou mesmo pelo efeito de pragas, doenças ou plantas daninhas.

$$\mathrm{SWSP} = \mathrm{MIN}\left(1., \left(\frac{\mathrm{EPp}}{RWUEP_1 \cdot \mathrm{TRWU}}\right)\right) \tag{28}$$

$$\mathrm{SWSG} = \mathrm{MIN}\left(1., \left(\frac{\mathrm{EPp}}{RWUEP_2 \cdot \mathrm{TRWU}}\right)\right) \tag{29}$$

em que RWUEP1 é o valor-limite abaixo da qual a taxa de fotossínte é reduzida, assumida como 1; e RWUEP2 é o valor-limite abaixo da qual o crescimento vegetativo é reduzido, assumido igual a 2 em acordo com os valores utilizados na família de modelos CERES (Jones & Kiniry, 1986).

O modulo de balanço hídrico do solo do modelo SAMUCA foi concebido para seguir a abordagem clássica de Darcy e Buckingham (1907), na qual a umidade volumétrica na camada de solo *i* no tempo *t* é dada pela Eq. 30:

$$\theta_{v(i,t)} = \theta_{v,sat} - \frac{\theta_{v,sat}}{\alpha} ln\left\{\frac{\alpha K_{sat}\Delta t}{L_i \theta_{v,sat}} + exp\left[\frac{\alpha}{\theta_{v,sat}}\left(\theta_{v,sat} - \theta_{v(i,t-1)}\right)\right]\right\} \tag{30}$$

em que $\theta_{v(i,t)}$ é a umidade volumétrica do solo no dia *t* ($m^3\ m^{-3}$) e $\theta_{v(i,t-1)}$ é a umidade volumétrica do solo no dia anterior a *t* ($m^3\ m^{-3}$) na camada de solo (*i*); L_i é a espessura (m) da camada de solo *i*; Δt é o passo de tempo (dia); α foi assumido como sendo 13 admitindo-se que o perfil de solo é homogêneo (Reichardt et al., 1972); e $\theta_{v,sat}$ é a umidade volumétrica na saturação ($m^3\ m^{-3}$). A absorção de água pelas raízes ou a evaporação da água do solo foi indiretamente incluída na Eq. 30 subtraindo-se os valores de absorção e evaporação do dia anterior do montante de água armazenado no solo, representado pela integral de $\theta_{v(i,t-1)}$.

A condutividade hidráulica foi estimada assumindo-se que haveria relação exponencial com a umidade do solo (Kendy et al., 2003) na forma da Eq. 31:

$$K_{(\theta)} = K_{sat} \cdot exp\left[-\alpha \frac{(\theta_{v,sat} - \theta_{v(i,t)})}{(\theta_{v,sat} - \theta_{v,r})}\right] \tag{31}$$

em que Ksat é a condutividade hidráulica saturada (m dia^{-1}); α é um coeficiente empírico (adimensional); e $\theta_{v,sat}$ e $\theta_{v,r}$ são respectivamente a umidade volumétrica saturada e residual do solo. Nas simulações realizadas no âmbito deste trabalho $\theta_{v,r}$ foi igual a zero.

As equações de estimativa da evapotranspiração diária (ETp, mm d^{-1}) foram obtidas de Ritchie (1998), utilizando uma modificação do método de Priestley & Taylor (1972) devido a necessidade de um menor número de dados de entrada. Na forma utilizada no modelo SAMUCA, a estimativa de ETp requer uma aproximação para a temperatura diurna (TD, Eq. 33) e um coeficiente de reflexão da radiação solar em função da cobertura do solo pela copa da planta (Eq. 34).

$$\mathrm{ETp} = \mathrm{f} \cdot [\mathrm{Qg} \cdot (0{,}00488 - 0{,}00437 \cdot \mathrm{ALB}) \cdot (\mathrm{TD} + 29)] \tag{32}$$

$$\mathrm{TD} = 0{,}6 \cdot \mathrm{T_{max}} + 0{,}4 \cdot \mathrm{T_{min}} \tag{33}$$

$$\mathrm{ALB} = 0{,}1 \cdot \mathrm{e}^{(-0{,}7 \cdot \mathrm{LAI})} + 0{,}2 \cdot (1 - \mathrm{e}^{(-0{,}7 \cdot \mathrm{LAI})}) \tag{34}$$

em que Qg é a radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}), ALB é o albedo da vegetação (adimensional), Tmax e Tmin são, respectivamente, a temperatura máxima e mínima do ar (ºC); f é um fator de correção dependente da temperatura, dado pela Eq. 35. Antes da germinação, ALB é assumido como o albedo do solo nu informado do arquivo de solos do modelo.

$$\mathrm{f} = \begin{cases} 0{,}01 \cdot e^{0{,}18 \cdot (\mathrm{Tmax} + 20)} & \forall \quad Tmax < 5°\mathrm{C} \\ 1.1 + 0{,}05 \cdot (\mathrm{Tmax} - 35) & \forall \quad Tmax > 35°\mathrm{C} \\ 1.1 & \forall\ 5°\mathrm{C} \leq Tmax \leq 35°\mathrm{C} \end{cases} \tag{35}$$

A partição da evapotranspiração em transpiração (EPp) e evaporação potencial (ESp) é estimada pelas Eqs. 36 e 37. A evaporação potencial do solo é convertida em evaporação real por um fator de redução ($R_{d,e}$) calculado em função do conteúdo relativo de água no solo, que por sua vez leva em conta a razão entre o conteúdo volumétrico atual de água no solo e a umidade no ponto de saturação (Keulen e Seligman, 1987) (Eq. 38). Para o período anterior à emergência da cultura, o balanço de água no solo é simulado considerando-se apenas a evaporação e a drenagem profunda no perfil de solo.

$$\mathrm{ESp} = \mathrm{ETp} \cdot e^{-0,7 \cdot LAI} \tag{36}$$

$$\mathrm{EPp} = \mathrm{ETp} \cdot [1 - e^{-0,7 \cdot LAI}] \tag{37}$$

$$R_{d,e} = \frac{1}{1+\left[3.6073\left(\frac{\theta_v}{\theta_{v,sat}}\right)\right]^{-9.3172}} \tag{38}$$

4.7.3 Estimação de parâmetros e avaliação do modelo

O modelo SAMUCA conta com uma ferramenta acoplada ao componente central do modelo baseada no método Bayesiano de estimativa da probabilidade generalizada de incerteza (do inglês *Generalized Likelihood Uncertainty Estimate*, GLUE) (Beven e Binley, 1992; Franks et al., 1998) que pode ser utilizada como estimador do melhor conjunto de parâmetros para o modelo, considerando um conjunto simulações, dados observados e um número relativamente grande de simulações estocásticas admitindo-se uma distribuição anterior dos parâmetros ou variáveis de entrada. O princípio fundamental desse método é discretizar o espaço de variação dos parâmetros pela geração de um grande número de amostras de valores de parâmetros a partir de uma distribuição anterior predefinida (Jones et al., 2011). O GLUE é um método Bayesiano que assume que modelos relativamente grandes e com bom número de parâmetros não contam com solução inversa exata. Assim, a estimativa de um único conjunto de parâmetros que otimizem o ajuste das simulações aos dados observados não é possível (Romanowicz e Beven, 2006). No uso do método GLUE, pode-se também utilizar diferentes condições de contorno do modelo ou mesmo estruturas diferentes de modelos para solução do problema da busca de um conjunto ótimo de parâmetros para o modelo numa determinada condição. Neste estudo, baseou-se nos resultados de He et al. (2012), desenvolvido para a cultura do milho, para admitir que a distribuição posterior dos parâmetros segue a função de distribuição normal.

Neste método, gera-se muitos conjuntos de parâmetros simulados de acordo com uma distribuição anterior pré-definida, pelo método de Monte Carlo, e que são então utilizados para simular as variáveis de saída do modelo. No caso deste trabalho, admitiu-se que a distribuição anterior era uniforme para todo o espaço amostral definido pela faixa de variação de cada parâmetro apresentada na Tabela 16. Assim, gerou-se um número N de realizações de conjuntos de parâmetros sendo cada conjunto constituído dos seguintes parâmetros (descritos na Tabela 16): RUE, SGPF, EXTCOEF, CHUSTK, CHUPEAK, CHUDEC, POPPEAK, POPMAT, TBASE, PHY, LFMAX, MLA, SLA, SUCMAX e SRL. A decisão sobre quais parâmetros

seriam utilizados no processo de otimização com o método GLUE (assim como para a definição das faixas de variação) foi baseada na disponibilidade de dados experimentais e no conhecimento prévio sobre cada parâmetro, para assim evitar otimizar parâmetros sobre os quais não havia nenhuma informação ou nenhum dado relacionada que permitisse avaliar a qualidade do processo de estimação.

Do ponto de vista do método da amostragem baseada no método de Monte Carlo para o método GLUE, um maior número de parâmetros tende a produzir resultados mais estáveis (He et al., 2010a). Neste estudo, admitiu-se que N=3000 realizações, consideradas independentes e em número suficiente para cobrir todo o espaço amostral possível para cada parâmetro. Este número de gerações foi selecionado após alguns testes prévios mostrando que a partir desse valor praticamente não havia variação nos resultados produzidos em termos de otimização e da matriz de correlação produzida (ver item 4.7.4), e por ser este número o recomendado como valor mínimo para otimização com o método GLUE pelo guia do usuário do GLUE no sistema DSSAT (He et al., 2010a). Após essa geração, o desempenho de cada conjunto de parâmetros produzidos na predição do estado das variáveis de estado do modelo é analisado por uma medida de probabilidade que pondera a qualidade das predições geradas com cada conjunto de parâmetros (He et al., 2010b).

O método GLUE, portanto, transforma o problema da busca de um conjunto ótimo de parâmetros em um problema de busca de conjunto de valores de parâmetros que fornecem as simulações mais confiáveis, dadas as condições de contorno e variáveis de entrada do modelo (Candela et al., 2005). Baseado na comparação entre valores simulados e observados, para cada conjunto de parâmetros atribui-se uma probabilidade de este conjunto ser o melhor simulador para o sistema considerado naquela realização. A definição de como essa probabilidade será atribuída a cada conjunto de valores é intrínseca da abordagem do método GLUE e a incerteza da predição (neste caso da seleção do conjunto mais provável de ser o ótimo) é fortemente dependente dessa definição (Ratto et al., 2010). Na abordagem Bayesiana, essa definição está relacionada com o modo pelo qual os erros das observações e da estrutura do modelo são representados pelo modelo estatístico. Desse modo, como diferentes funções de probabilidade podem ser utilizadas no GLUE, como já mencionado, assumiu-se a distribuição posterior normal multivariada (Eq. 39) em acordo com os resultados obtidos por He et al. (2010), que encontrou nesta distribuição as simulações do modelo CERES-Maize mais próximas das observações de campo.

$$L(S_i|O) = \prod_{i=1}^{M} \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 2 \cdot \sigma_O^2}} \cdot e^{\left[-\frac{\left[O_j - P(S_i)\right]^2}{2 \cdot \sigma_O^2}\right]} \qquad (i=1,2,3,\ldots N) \qquad (39)$$

em que S_i é o *i*ésimo conjunto de parâmetros; $P(S_i)$ é p *j*ésima saída do modelo simulado com o conjunto de parâmetros S_i; O é o valor observado; O_j é a *j*ésima observação de O; σ_O^2 é a variância de erros do modelo, neste caso assumida como sendo a variância das observações de campo; N é o número de conjuntos aleatórios de parâmetros; e M é o número de repetições de observações.

Utilizando a Eq. 40, faz-se então a normalização das medidas de probabilidade de tal modo que o somatório das probabilidades seja igual a unidade. Os valores de probabilidade foram então calculados para cada conjunto de parâmetros com base nas observações de campo de massa fresca de colmos, população de plantas e LAI na colheita.

$$L(S_i) = \frac{L(S_i|O)}{\sum_{i=1}^{N} L(S_i|O)} \qquad (40)$$

em que $L(S_i)$ é a probabilidade normalizada dos *i* conjuntos de parâmetros S_i; $L(S_i|O)$ é a probabilidade de cada conjunto de parâmetros S_i, dadas as observações O.

4.7.4 Matriz de correlação e correlação entre variáveis aleatórias

Uma outra característica interessante do método GLUE é que a estrutura de covariância entre os fatores (no caso deste trabalho, os parâmetros do modelo) analisados com o método é refletida implicitamente na medida de probabilidade associada com os conjuntos de fatores. Com o método GLUE é possível quantificar a covariância entre os fatores com base na distribuição posterior dos parâmetros, uma vez que cada combinação entre fatores é ponderada pela medida de probabilidade utilizada no método GLUE (Ratto et al., 2010).

Com base na matriz de correlação gerada a partir da estrutura do método GLUE, utilizou-se o método da fatorização de Toeplitz-Cholesky[22], que consiste numa técnica útil e eficiente na solução de métodos numéricos e de simulação com o método de Monte Carlo. Ela baseia-se na decomposição de matrizes positivas-definidas na forma do produto de uma matriz triangular inferior e sua transposta conjugada (Press et al., 1992). A decomposição de Cholesky é comumente utilizada em associação com o método de Monte Carlo para a simulação de sistemas com múltiplas variáveis aleatórias correlacionadas, de modo que após a decomposição da matriz de correlação, a matriz triangular inferior (L) é aplicada a um vetor de amostras aleatórias não correlacionadas (u) para produzir um vetor Lu com as propriedades de covariância do sistema em análise.

Para a geração das simulações estocásticas correlacionadas com o modelo SAMUCA, os valores constituintes de um conjunto de parâmetros são gerados com base num reescalonamento de um vetor de números aleatórios independentes gerados a partir de uma distribuição normal tendo média igual ao valor de cada parâmetro otimizado pelo método GLUE e variância assumida como sendo resultante de um coeficiente de variação igual a 30%, definida a priori. A geração dos números aleatórios que dão origem aos conjuntos de parâmetros com distribuição normal é feita a partir de um algoritmo desenvolvido em Fortran 90 por Acklam (2014) que realiza a normal inversa a partir de um número aleatório entre 0 e 1 gerado a partir de uma distribuição uniforme, conforme mostra a Figura 30.

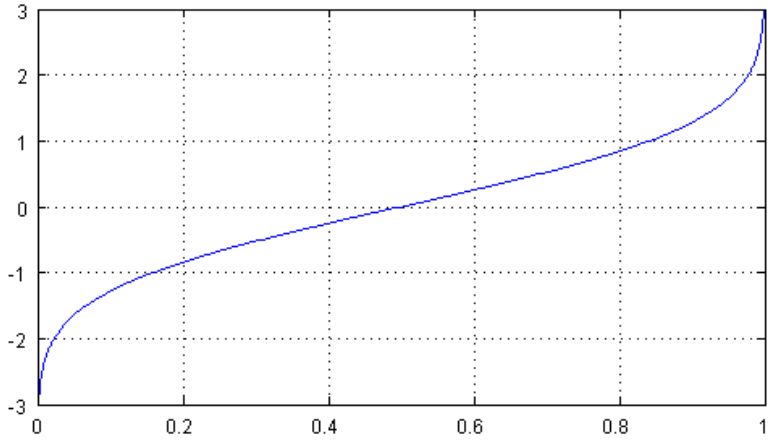


Figura 30 - Resultado do algoritmo de Acklam (2014) para a geração de números aleatórios independentes com distribuição normal

[22] Seguindo Baigorria & Jones (2010), o método é comumente conhecido como método da fatorização de Cholesky: neste estudo será denominado como método da fatorização de Toeplitz–Cholesky, considerando que Toeplitz desenvolveu o mesmo método em 1907 (Taussky and Todd, 2006), portanto antes de Cholesky (Benoît, 1924).

O vetor de números aleatórios correlacionados, por sua vez, é obtido a partir da multiplicação dessa matriz contendo números aleatórios independentes pela matriz resultante da fatorização de Toeplitz-Cholesky (F), sendo F obtida a partir da matriz de correlação dos parâmetros do modelo obtida a partir do GLUE. A multiplicação da matriz de correlação dos parâmetros decomposta pela matriz de matriz de números aleatórios independentes com distribuição normal foi feita utilizando-se o algoritmo desenvolvido por Rego (2014).

Para a execução dessa abordagem, além das simulações de amostras aleatórias para a otimização dos parâmetros do modelo e geração da matriz de correlação entre os parâmetros analisados, fez-se uma segunda sequência de geração de amostras aleatórias que foram então convertidas em amostras aleatórias correlacionadas como produto da multiplicação da matriz de correlação triangular inferior decomposta do modelo. Nesta segunda fase de simulação com o modelo SAMUCA, optou-se por gerar apenas 1000 realizações para cada ano simulado para os nove locais, utilizando os dados de entrada de clima, solo e definições de manejo para cada local, para então predizer as variáveis de estado do modelo ao longo do ciclo simulado. Nessas realizações, considerou-se como fonte única de incerteza para o modelo apenas os parâmetros genéticos do modelo (Tabela 16).

O número de 1000 realizações foi selecionado por ser suficientemente grande para assegurar a estabilidade dos resultados sem tornar o tempo computacional para o processamento das simulações demasiadamente longo. Para cada local, as 1000 simulações estocásticas para os 30 anos de dados (representando 29 safras), duas épocas de colheita, nove locais e 7 cenários climáticos produziu 429 GB de dados e consumiu 119 horas de processamentos em computadores domésticos de médio desempenho (Processador Intel I7, 8GB memória RAM).

Os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 17 permitem avaliar a estrutura de interação linearizada entre pares de parâmetros, incluindo na simulação estocástica a relação biofísica entre os parâmetros e reduzindo a incerteza da simulação até níveis que possam ser sustentados pelo significado mecanístico dos parâmetros e sua função dentro do modelo. Em outras palavras, a simulação estocástica de variáveis aleatórias correlacionadas, considerando a correlação entre pares de parâmetros reduz a incerteza da simulação em comparação com simulações estocásticas pelo método de Monte Carlo assumindo independência entre os parâmetros. Considerando o limite de significância de 5%, nota-se que poucos parâmetros mostraram correlação significativas em níveis de correlação inferiores a 10%, para um número de realizações de n=3000. Na Tabela 17, vê-se que os parâmetros relacionados à fenologia (especialmente CHUSTK e CHUMAT) mostraram interação relativamente maior com os

demais parâmetros, em especial (LFMAX, TB, RUE, SLA, EXTCOEF, SGPF, SUCMAX e SRL). O parâmetro SUCMAX (definindo a máxima concentração de sacarose no colmo na base seca) mostrou-se correlacionado com RUE, EXTCOEF, CHUMAT e MLA, indicando dependência entre a concentração de sacarose no colmo com parâmetros relacionado à definição do potencial de acúmulo de biomassa na planta e interceptação de radiação solar pela copa. Vale mencionar que CHUMAT, apesar de tratar-se de parâmetro enquadrado na classe dos parâmetros controladores da fenologia da planta, define também a população de plantas na fase final do ciclo da cultura, interferindo, portanto, no cômputo do índice de área foliar e na capacidade de interceptação da radiação solar pela copa. O parâmetro PHYLOC mostrou correlação com outros parâmetros também associados ao dimensionamento da copa, como SLA, CHUDEC e CHUMAT. Também, é interessante notar que na Tabela 17, apenas correlações positivas entre os parâmetros apresentaram significância ao nível de 5%.

Tabela 17 - Matriz de correlação do modelo gerada com base no método GLUE. Valores com asterisco indicam coeficiente de correlação significativo a 5% de probabilidade. Significância calculada com base em 3000 simulações estocásticas (n=3000) com base na estatística $r_{crit} = \frac{1-\alpha}{\sqrt{n-1}}$, sendo $r_{crít}$ o valor limite para significância do coeficiente de correlação, n é o número de dados considerados e α é o nível de significância desejado

	LFMAX	**TB**	**RUE**	**SLA**	**EXTCOEF**	**SGPF**	**SUCMAX**	**SRL**	**CHUSTK**	**CHUPEAK**	**CHUDEC**	**CHUMAT**	**POPPEAK**	**POPMAT**	**PHYLOC**	**MLA**
LFMAX	1*	-0,014	0,041*	0,008	-0,0063	-0,0075	0,065*	0,0303	0,0144	0,035*	-0,0275	-0,0001	0,043*	0,0201	-0,0447	-0,0301
TB	-0,014	1*	-0,0619	-0,0137	0,0004	0,0097	0,038*	0,0131	-0,0033	0,090*	-0,0678	-0,0492	-0,0003	0,0071	-0,0032	0,0322
RUE	0,041*	-0,0619	1*	0,0213	0,090*	-0,011	0,067*	0,052*	0,0269	-0,0369	-0,0351	0,0141	-0,0204	0,0192	-0,0733	-0,0529
SLA	0,008	-0,0137	0,0213	1*	0,0334	0,060*	0,0121	0,0054	0,019	-0,0207	0,0101	0,0133	0,052*	0,0171	-0,021	0,037*
EXTCOEF	-0,0063	0,0004	0,090*	0,0334	1*	-0,0512	0,044*	0,081*	-0,0157	-0,0411	0,0129	0,047*	-0,0051	-0,0062	-0,0376	0,0263
SGPF	-0,0075	0,0097	-0,011	0,060*	-0,0512	1*	0,050*	-0,0214	0,008	0,053*	-0,0315	0,0012	0,049*	-0,0043	-0,0083	0,0337
SUCMAX	0,065*	0,038*	0,067*	0,0121	0,044*	0,050*	1*	0,144*	0,046*	0,0307	0,0244	0,068*	0,074*	0,088*	0,048*	0,037*
SRL	0,0303	0,0131	0,052*	0,0054	0,081*	-0,0214	0,144*	1*	-0,0011	-0,0585	-0,0173	-0,0159	0,043*	-0,0094	-0,0482	0,014
CHUSTK	0,0144	-0,0033	0,0269	0,019	-0,0157	0,008	0,046*	-0,0011	1*	0,040*	0,0319	-0,0285	0,0107	0,0221	-0,0697	-0,0623
CHUPEAK	0,035*	0,090*	-0,0369	-0,0207	-0,0411	0,053*	0,0307	-0,0585	0,040*	1*	-0,0297	-0,0593	-0,0298	0,0196	0,046*	0,0018
CHUDEC	-0,0275	-0,0678	-0,0351	0,0101	0,0129	-0,0315	0,0244	-0,0173	0,0319	-0,0297	1*	-0,0158	-0,0053	-0,0335	-0,0099	0,0078
CHUMAT	-0,0001	-0,0492	0,0141	0,0133	0,047*	0,0012	0,068*	-0,0159	-0,0285	-0,0593	-0,0158	1*	0,0278	0,0236	-0,008	0,042*
POPPEAK	0,043*	-0,0003	-0,0204	0,052*	-0,0051	0,049*	0,074*	0,043*	0,0107	-0,0298	-0,0053	0,0278	1*	0,0065	0,0228	0,041*
POPMAT	0,0201	0,0071	0,0192	0,0171	-0,0062	-0,0043	0,088*	-0,0094	0,0221	0,0196	-0,0335	0,0236	0,0065	1*	0,050*	-0,0077
PHYLOC	-0,0447	-0,0032	-0,0733	-0,021	-0,0376	-0,0083	0,048*	-0,0482	-0,0697	0,046*	-0,0099	-0,008	0,0228	0,050*	1*	-0,0003
MLA	-0,0301	0,0322	-0,0529	0,037*	0,0263	0,0337	0,037*	0,014	-0,0623	0,0018	0,0078	0,042*	0,041*	-0,0077	-0,0003	1*

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desempenho do modelo SAMUCA

5.1.1 Simulação de área foliar e perfilhamento

Com base no procedimento de calibração assistida pelo método GLUE, e com os valores dos parâmetros otimizados da Tabela 18, o algoritmo de perfilhamento usado no modelo foi capaz de descrever os dados experimentais razoavelmente bem, com RMSEP = 3,4 plantas m^{-2} e Eff = -0,56 (Tabela 19). De modo geral, a calibração adotada representou população de plantas acima da observado no campo na maioria das localidades (União, Coruripe, Colina, Olímpia, Figuras 31 e 35d), havendo subestimativa apenas em Piracicaba e em um pequeno período do experimento de sequeiro de Coruripe (Figuras 31e e 31i). Com exceção de Coruripe e União, pode-se generalizar os locais analisados como tendo solos similares e diferenças climáticas relativamente pequenas, indicando outros fatores a controlar a taxa de perfilhamento da cultura além da soma térmica utilizada no modelo SAMUCA (e também nos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar). Este aspecto merece maior atenção da comunidade científica de modo a conferir um caráter mais mecanístico a este algoritmo do modelo, incluindo também nesse processo a interceptação de radiação solar pela copa e a dimensão das folhas no período inicial de desenvolvimento da cultura (Beizuindenholt et al., 2003). Uma tentativa prévia de aprimorar o algoritmo neste sentido foi abandonada pela falta de dados consistentes e deve ser considerada em um futuro esforço de aprimoramento do modelo SAMUCA.

Tabela 18 – Valores otimizados para a variedade RB867515 com base em dados de 9 experimentos de campo

Parâmetro	Valor Inicialmente Arbitrado	Valor obtido pelo método GLUE
LFMAX	10,0	9,950
TB	9,0	9,987
RUE	1,8	1,820
SLA	50,	64,043
EXTCOEF	0,7	0,591
SGPF	0,88	0,789
DPERCOEFF	0,323	0,318
SUCMAX	0,75	0,769
SRL	18,0	17,378
CHUSTK	200,0	237,057
CHUPEAK	1500,0	1481,049
CHUDEC	3000,0	3182,047
CHUMAT	3500,0	3823,010
POPPEAK	12,0	12,886
POPMAT	11,0	10,410
PHYLOC	160,0	169,705
MLA	450,0	543,239

Tabela 19 – Indicadores estatísticos das predições do modelo SAMUCA para a variedade RB86-7515 para massa fresca de colmos, teor de sacarose no caldo (POL), índice de área foliar (LAI) e população de plantas.

Indicador	Massa Fresca de Colmos (t ha^{-1})	POL (%)	LAI	População (pl m^{-2})
Média das Obs.	90,6	12,9	3,4	8,7
Desvio P. das Obs.	51,3	4,2	1,1	2,7
Média das Sim.	90,3	13,9	3,9	10,9
Desvio P. das Sim.	51,5	3,3	1,1	1,5
RMSEP	21,3	3,9	1,0	3,4
Eficiência.	0,82	0,09	0,20	-0,56
R	0,91	0,48	0,78	0,36
d-index	0,95	0,62	0,79	0,51
EMA	-0,3	1,0	0,46	2,2
N	21	42	39	43

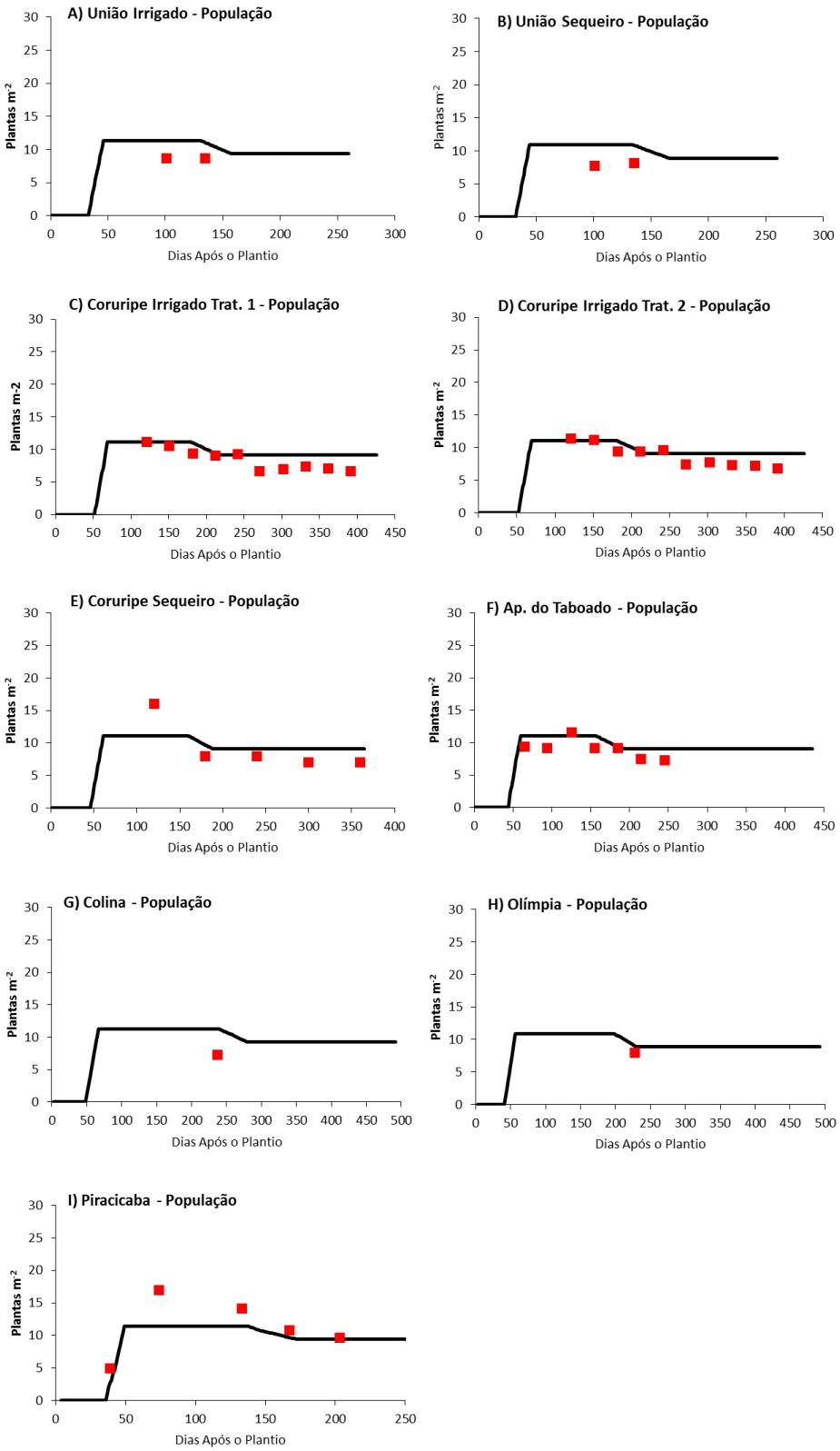


Figura 31 – Valores observados simulados de modo determinístico de população de plantas (plantas m^{-2}) para nove experimentos com a variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18. Linhas representam a simulação e os pontos as observações de campo.

Os valores de LAI foram observados em 7 dos 9 experimentos aqui analisados, e os algoritmos associados a simulação do crescimento e dimensão da copa da planta mostraram-se razoáveis em comparação com dados experimentais (RMSEP = 1,0; Eff = 0,20). Considerando-se as diversidades de ambientes nos quais o modelo SAMUCA foi testado neste trabalho e a complexidade dos processos envolvendo a simulação de LAI para a cultura da cana-de-açúcar, pode-se considerar a abordagem adotada como aceitável. Vale notar, contudo, que associando a tendência de superestimativa dos valores de perfilhamento (Figura 31), a superestimativa dos valores de LAI (Figuras 32 e 35c), e boa qualidade das simulações para massa fresca de colmos (sem tendência de superestimativa), pode-se inferir que o modelo SAMUCA tem uma dificuldade em quantificar adequadamente o montante de radiação interceptada pela cultura, ou que talvez os valores de RUE sejam superiores aos utilizados na calibração do modelo (como também sugerido por Muchow et al., 1994). Como será discutido na seção 5.2 deste trabalho, essa mesma característica foi identificada nos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO.

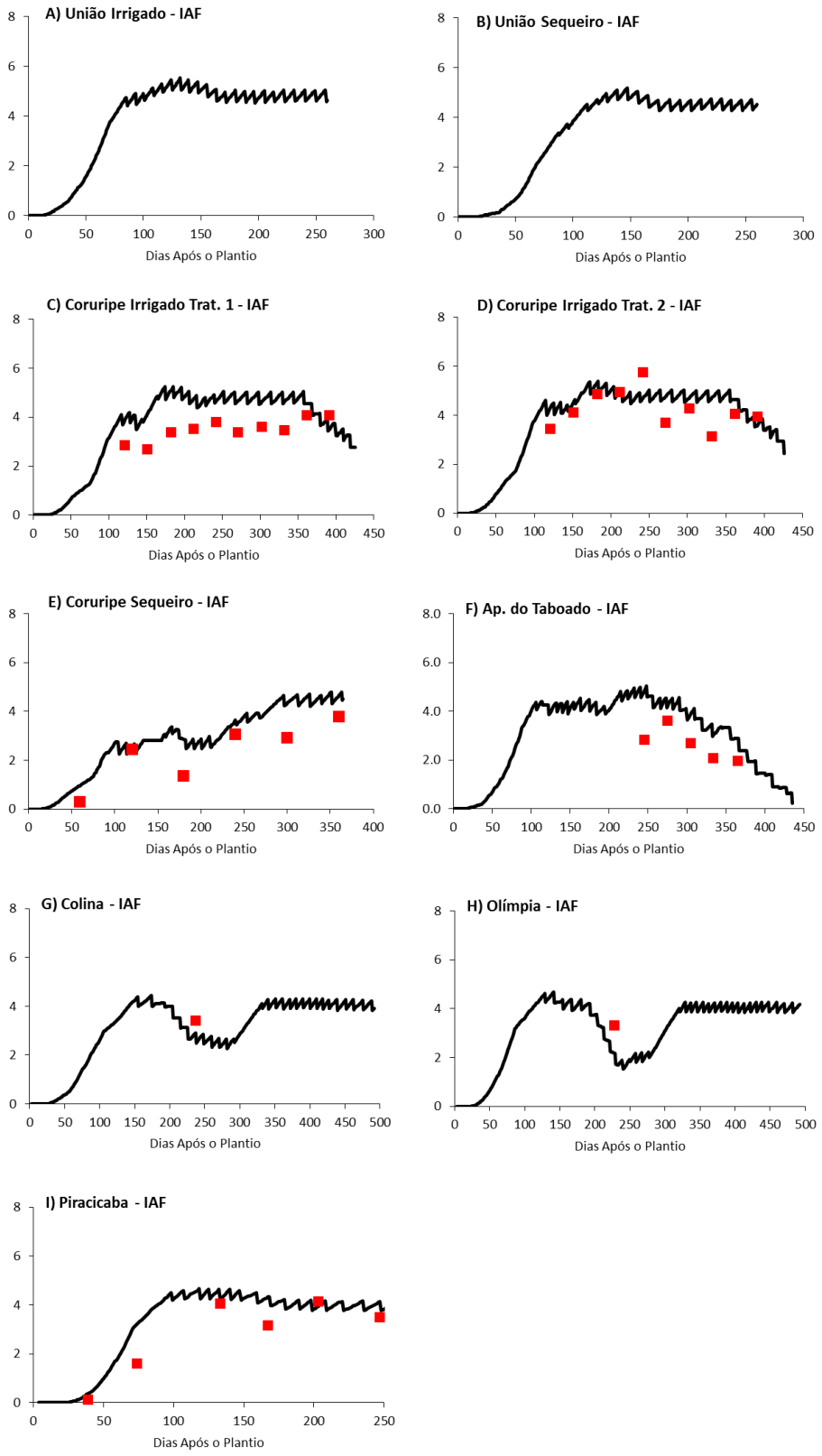


Figura 32 – Valores observados (pontos) e simulados (linhas) de modo determinístico de índice de área foliar (LAI) para nove experimentos com a variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18

5.1.2 Desempenho do Modelo SAMUCA: Simulação da massa de colmo e sacarose

Tendo sido o modelo SAMUCA desenvolvido para simular a partição para massa de colmos e sacarose entre os componentes da planta da cana-de-açúcar, a avaliação desses dois aspectos é particularmente importante para um modelo de simulação da cultura da cana-de-açúcar. O modelo SAMUCA apresentou RMSEP para massa fresca de colmos de 21,3 t ha^{-1} (Tabela 19, Figura 33 e Figura 35a), o que é superior aos valores obtidos por Marin & Jones (2014) utilizando uma versão anterior do modelo SAMUCA para a variedade SP83-2847, em experimentos com menor variabilidade edafoclimáticas (RMSEP of 5,38 t ha^{-1} para massa seca de colmos). Esses valores de RMSEP são também comparáveis aos obtidos por Singels & Bezuidenhout (2002), O'Leary (2000) e Marin et al. (2011) usando várias versões do modelo CANEGRO nas simulações, bem como aos obtidos por Cheeroo-Nayamuth et al. (2000) usando o modelo APSIM-Sugar para simular a cultura da cana-de-açúcar desenvolvendo-se nas Ilhas Maurício, com RMSEP = 6.0 t ha^{-1} para massa seca de colmos.

A massa fresca de colmos foi o componente para o qual o modelo SAMUCA teve o melhor desempenho em relação as demais variáveis da planta (Figura 35), com os melhores valores quanto aos indicadores estatísticos utilizados na Tabela 19. A eficiência da modelagem alcançou valor de 0,82. Exceção foram os experimentos de sequeiro em Coruripe (Figura 33e), onde o modelo superestimou a biomassa fresca de colmos, e em Piracicaba (Figura 33i), com tendência oposta.

Os indicadores estatísticos para o teor de sacarose no caldo da cana (POL) mostraram que os algoritmos empregados no modelo SAMUCA ainda têm baixa capacidade preditiva, com eficiência de 0,09 (Tabela 19, Figura 34). Entretanto, resultados apresentados por Singels et al. (2008) para uma série de experimentos realizados na África do Sul mostraram desempenho similar aos alcançados aqui. Esses resultados, em parte, podem ser decorrentes ao fato das medidas serem normalmente obtidas na fase final do ciclo, quando a concentração de sacarose assume padrão aproximadamente estável e com pequena margem de variação entre medidas subsequentes. Lembrando que o indicador estatístico eficiência da modelagem representa quão melhor um modelo qualquer seria em relação à média dos dados de campo, ao se comparar dados simulados com valores observados pouco variáveis, tem-se normalmente baixos valores de eficiência da modelagem. Este aspecto foi também observado por Marin et al. (2011) analisando o desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO em simular o número de folhas verdes para duas variedades de cana-de-açúcar cultivadas em 5 localidades do Brasil.

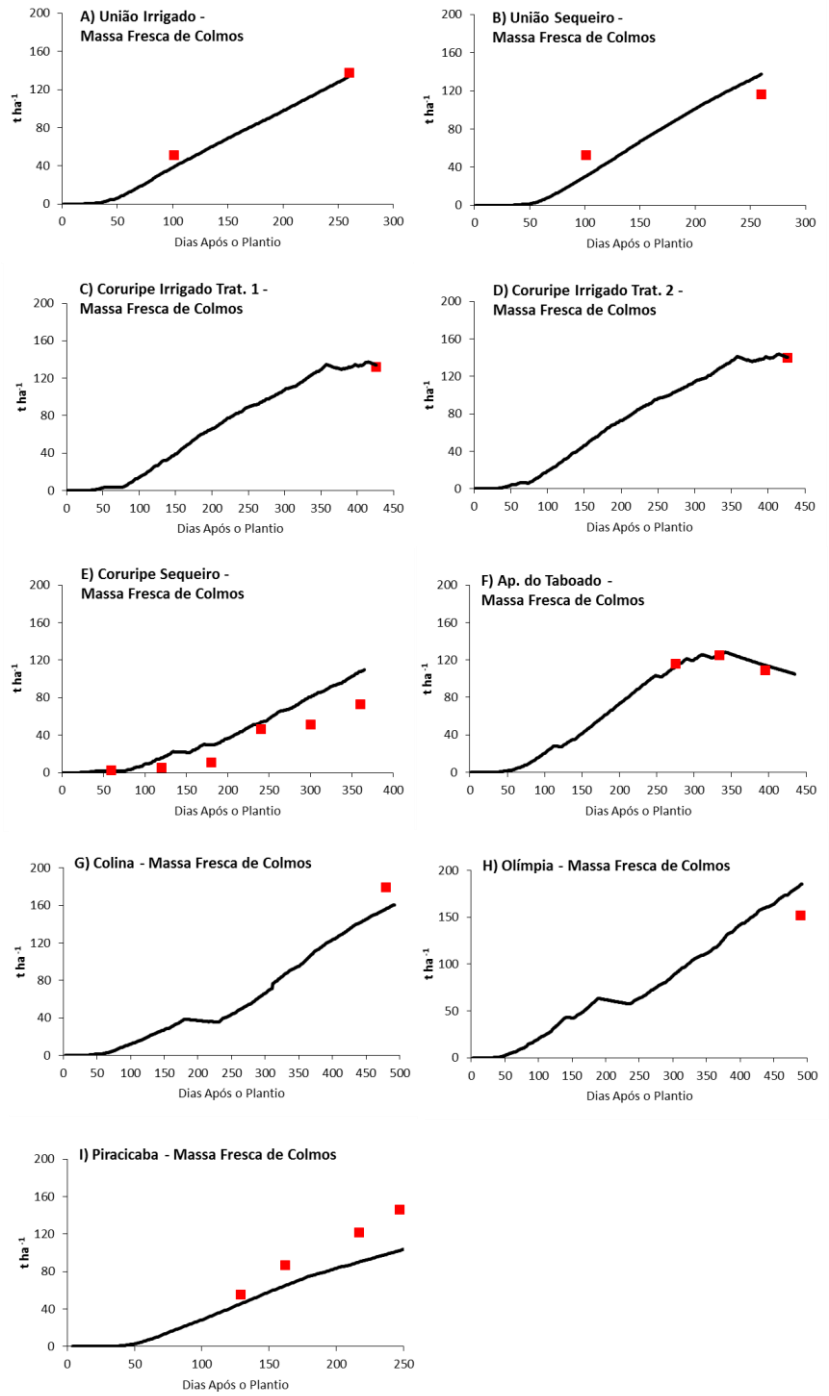


Figura 33 – Valores simulados (linhas) de modo determinístico com o modelo SAMUCA e observados experimentalmente (pontos) de massa fresca do colmo para a variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18

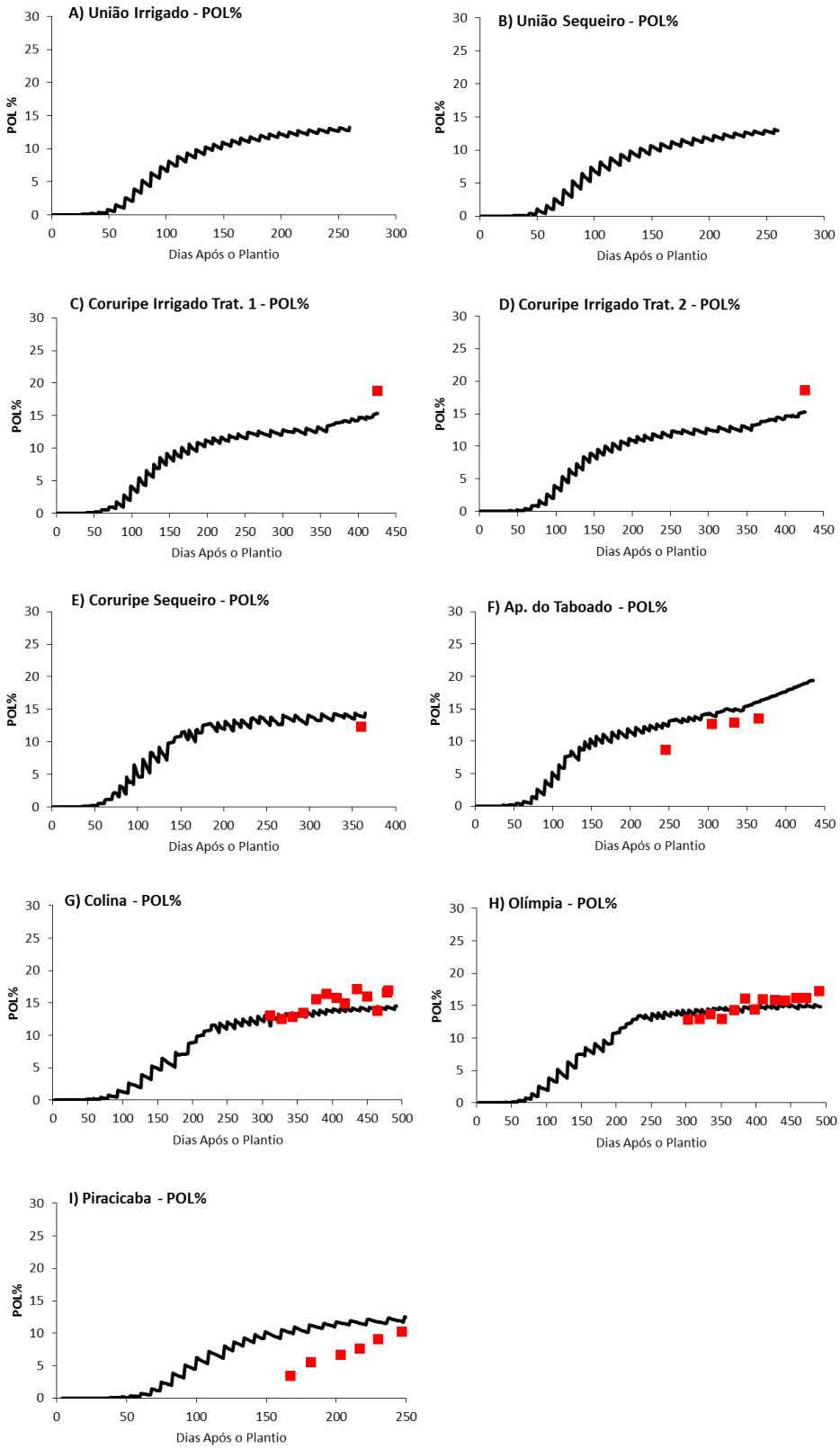


Figura 34 – Valores simulados (linhas) de modo determinístico pelo modelo SAMUCA e observados experimentalmente (pontos) de teor de sacarose no caldo da

variedade RB86-7515, utilizando os valores de parâmetros otimizados da Tabela 18

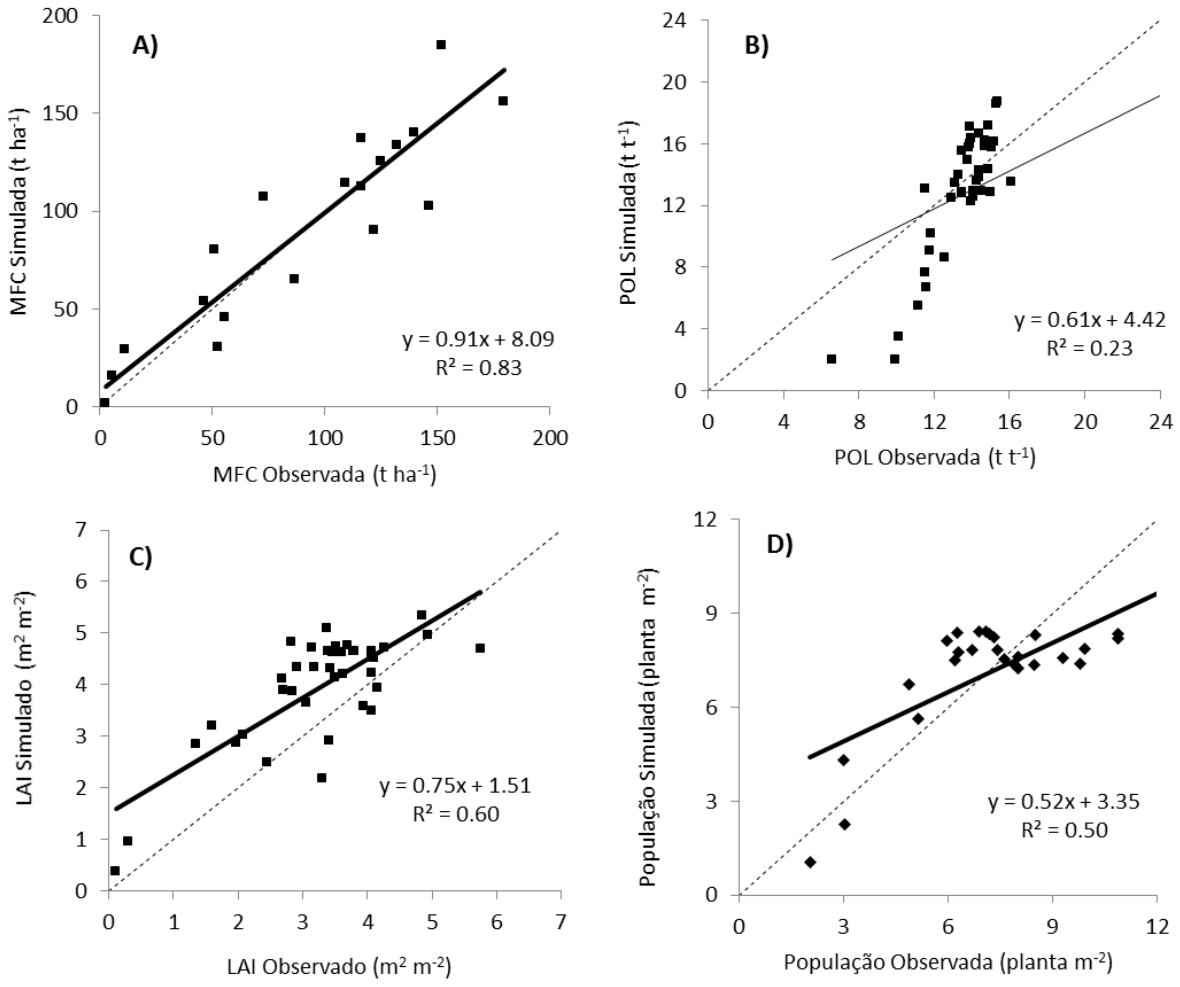


Figura 35 – Comparação entre valores simulados com o modelo SAMUCA e medidos experimentalmente de (A) Massa Fresca de Colmos, (B) teor de sacarose no caldo (POL, %), (C) Índice de área foliar (LAI), e D) população de plantas

5.1.3 Simulação estocástica, incerteza dos parâmetros e variabilidade das simulações

O efeito da incerteza nos parâmetros genéticos do modelo SAMUCA na estimativa da massa fresca de colmos está representada na Figura 36 para os nove experimentos avaliados neste estudo. Interessante notar que a simulação estocástica com as variáveis aleatórias correlacionadas modificou o padrão de resposta do modelo em comparação com as simulações do modelo SAMUCA no modo determinístico (Figuras 33 a 35), com tendência de

superestimativa em relação às observações de campo para as localidades com maior temperatura média do ar (União-PI e Coruripe-AL, Figura 36a, b, c e d) e tendência oposta para localidades situadas em São Paulo (Figura 36g, h e i).

Vale também notar que o padrão de incerteza observado se mostrou variável em função das condições de clima e solo da simulação, uma vez que a única fonte de incerteza considerada nas simulações da Figura 36 foram os parâmetros genéticos, mas algumas localidades mostraram com maior nível de incerteza que outras. A razão de tais alterações no padrão de incerteza não foi ainda identificada no modelo SAMUCA, mas é fácil notar que Colina, Olímpia e Aparecida do Taboado (Figuras 36 f, g e h) mostraram-se com maior nível de incerteza na simulação que as demais localidades, especialmente em relação a União e Coruripe (Figuras 36 a, b, c e d).

Apesar da dificuldade em aprofundar a discussão para este tipo de simulação para cana-de-açúcar, tendo em vista que a larga experiência em modelagem basear-se em simulação determinística e por não ter sido possível encontrar na literatura a descrição de modelos agrícolas estocásticos similares a esses, é possível inferir que uma importante aplicação para este tipo de ferramenta é em aplicações de passagem de escala espacial, da micro para macro (*upscaling)*, na qual é possível incluir a variabilidade espacial dos solos como fonte de incerteza, além da variabilidade genética, permitindo estimar a incerteza associada na extrapolação espacial das simulações feitas com modelos do tipo utilizados neste trabalho.

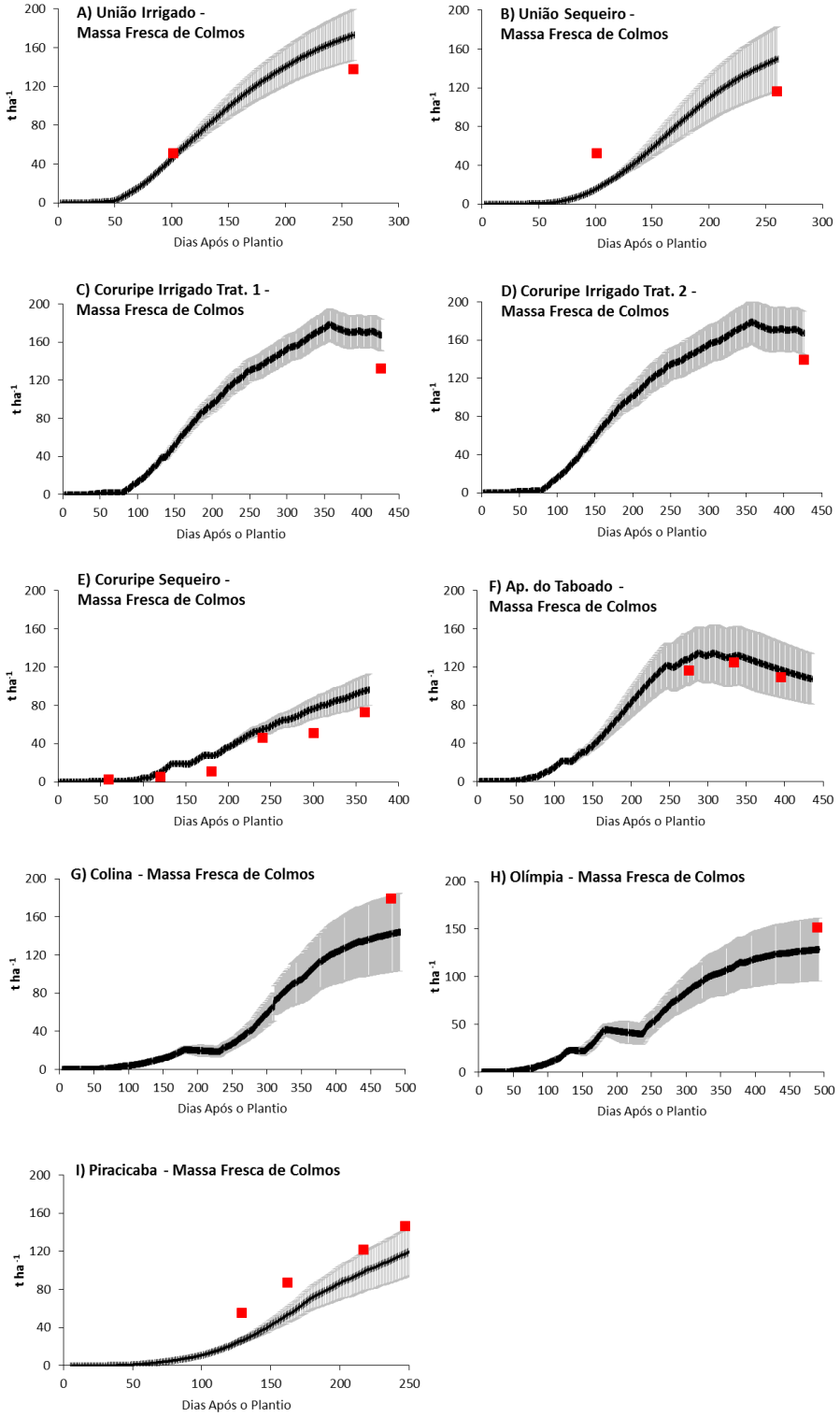


Figura 36 - Simulação estocástica da massa de colmos, para 1000 realizações do modelo SAMUCA assumindo parâmetros com distribuição normal, média igual aos valores dos parâmetros otimizados da Tabela 18 e coeficiente de variação de 30% em relação a média das observações. A área hachurada representa o valor do desvio padrão em relação à média

5.2 Análise e calibração dos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugar para a cana-de-açúcar brasileira

5.2.1 Intercomparação de modelos simulando o crescimento e o desenvolvimento de uma variedade padrão

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre o desempenho dos modelos DC e AS, também utilizados nas simulações deste trabalho, fez-se uma comparação entre eles buscando identificar as diferenças na estrutura e nas simulações entre os modelos. As Figuras 37 e 38 apresentam as simulações produzidas pelos modelos DC e AS usando os parâmetros da variedade NCo376, considerada como referência para ambos e cujos valores são disponibilizados pelos desenvolvedores. Essa variedade foi selecionada porque se considerou que o processo de calibração dos modelos contou com dados experimentais detalhados em bom número que asseguram a qualidade desse processo, tornando este exercício de intercomparação de modelos mais consistente. As figuras também mostram dados experimentais de MFC da variedade RB867515 coletados no Brasil e, ao compará-los com as simulações, tem-se em destaque o desempenho similar dos modelos ao simular os sítios experimentais 4, 5 e 6 (Figuras 37a, 38b e c), mas diferenças expressivas ocorrendo na simulação dos sítios experimentais 1 e 7 (Figuras 37f e 37h).

Dadas as diferenças em termos de temperatura do ar entre os sítios experimentais, é possível que as diferentes respostas dos modelos estejam relacionadas com os algoritmos de perfilhamento e desenvolvimento foliar (os quais definem a estrutura da copa), que são fortemente dependentes da temperatura do ar. No modelo DC, por exemplo, a emergência do perfilho primário é simulada após uma determinada soma térmica acumulada desde o plantio (cana-planta) ou após o último corte (cana-soca). Para a variedade de origem sul-africana NCo376, os valores no modelo DC são 428 e 203 ^{o}C·d, respectivamente. O pico de perfilhamento ocorre quando um novo montante de graus-dia foi acumulado desde a emergência (para a variedade NCo376 este valor é de 600 ^{o}C·d). Vale mencionar que no modelo DC, a fase de perfilhamento é considerada como tendo início na emergência do perfilho primário até a fase de pico de perfilhamento, enquanto que a fase de alongamento do colmo inicia-se no momento de emergência do colmo até a colheita. Por fim, a fase de senescência dos perfilhos inicia-se logo após o pico de perfilhamento e termina na fase de maturação, quando há estabilização no número de plantas. Nesta fase, a densidade de plantas é limitada

para não exceder um determinado valor definido por um parâmetro do modelo. Nesse algoritmo, não há distinção entre cana-planta e cana-soca, com exceção da soma térmica requerida para a emergência. O modelo DC não considera a taxa de alongamento do colmo para a emergência, mas apenas a soma térmica requerida pela variedade. Isso implica que para o modelo DC a profundidade de plantio não é considerada no caso de cana-planta.

O modelo AS admite que a germinação ocorre após um período de latência, que vai de 350 ºC d para a cana-planta e 100 ºC d para cana-soca, e esses valores são considerados como invariáveis entre as variedades, não sendo, portanto, passíveis de ajuste no processo de calibração. Sem a ocorrência de estresses, o modelo assume que broto cresce a uma taxa de 0,8 mm $ºC^{-1}·d^{-1}$, após um somatório térmico de 250 ºC·d. O requerimento térmico entre a emergência e o início do crescimento do colmo é definido por um parâmetro de variedade (tt_emerg_to_begcane) assumido como sendo 1800 ºC·d para o caso da NCo376. No modelo AS, a complexidade que envolve a simulação da dinâmica do perfilhamento da cultura é substituída por uma relação mais simples, mas sem abrir mão da base conceitual correta para definição do índice de área foliar durante a fase do pico de perfilhamento. Para tanto, a cultura é assumida como tendo um número teoricamente constante de plantas por unidade de área ao longo do ciclo, ajustada pelo usuário de acordo com o manejo a ser aplicado no módulo “Manager” do modelo. Nas simulações apresentadas nas Figuras 37 e 38, este parâmetro foi configurado como sendo 13,3 plantas m^{-2} para tornar-se comparável ao valor sugerido no modelo DC para a variedade NCo376. A área foliar adicional decorrente do pico de perfilhamento é capturado via um fator de perfilhamento específico de cada variedade, e que efetivamente promove o acréscimo de área foliar e os consequentes efeitos sobre os processos de fotossíntese e transpiração, por exemplo.

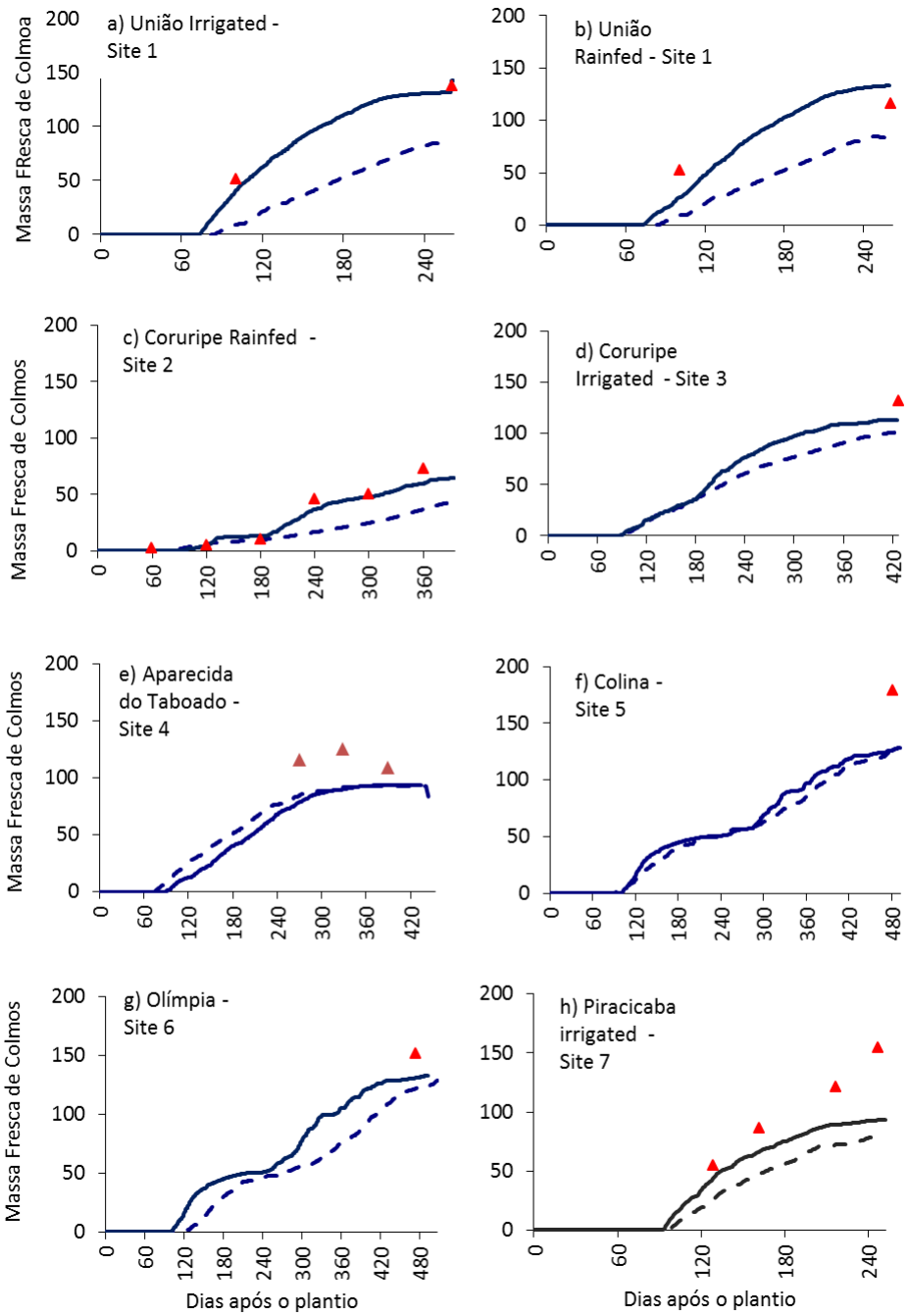


Figura 37 - Massa seca de colmos (t/ha) simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e APSIM-Sugar (linha pontilhada) usando os parâmetros da variedade NCo376 para diferentes ambientes do Brasil. Os triângulos vermelhos são os dados experimentais referentes a variedade RB867515 observados em cada um dos ambientes.

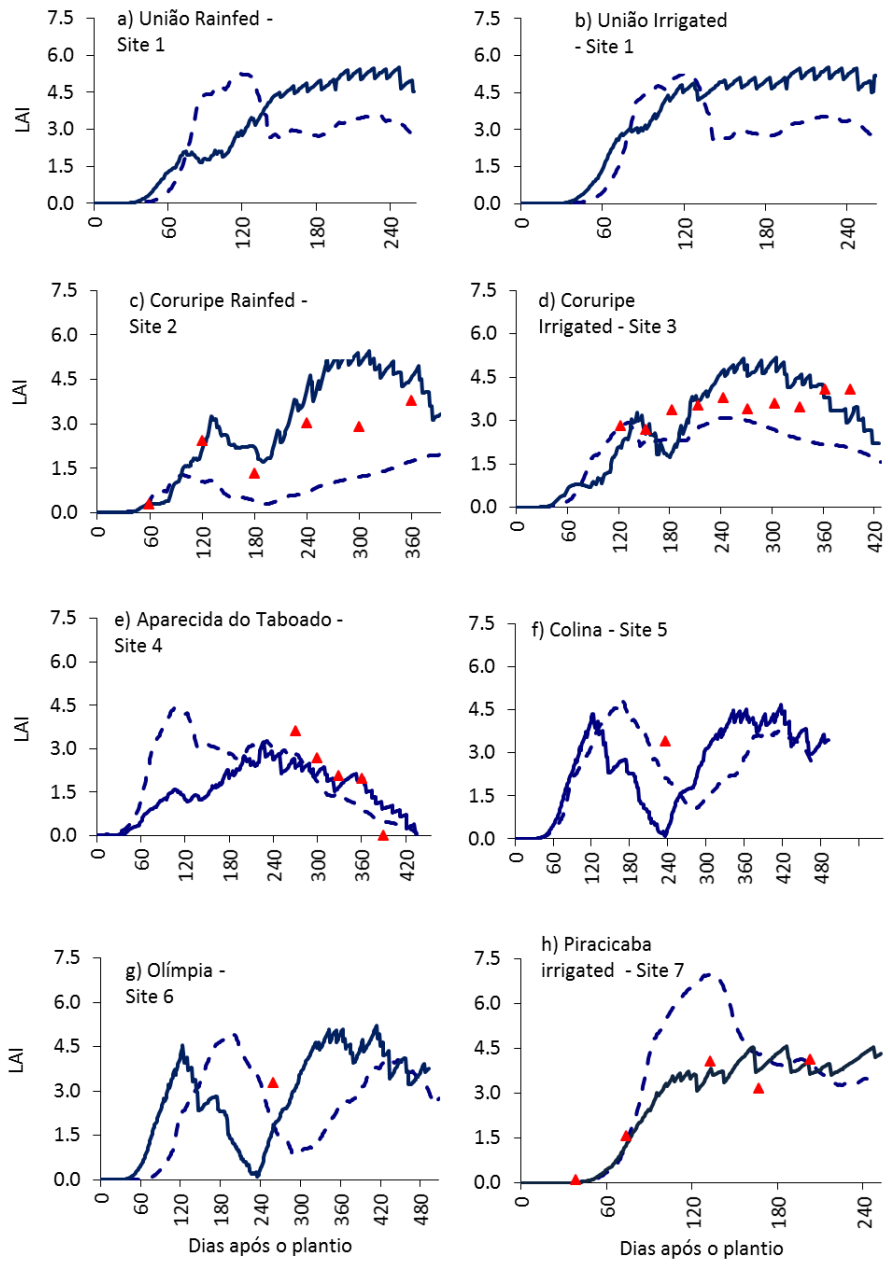


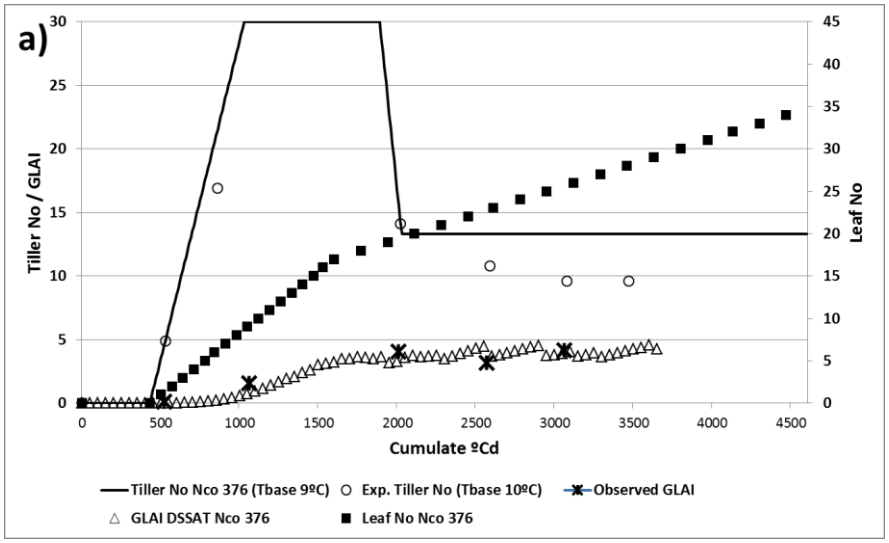
Figura 38 - Índice de área foliar simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e pelo modelo APSIM-Sugar (linha pontilhada) utilizando os parâmetros da variedade NCo376 para diferentes ambientes no Brasil. Os triângulos vermelhos são os dados experimentais referentes a variedade RB867515 observados em cada um dos ambientes. LAI é o índice de área foliar.

Dado que União (sítio 1) é o local mais quente entre os sete avaliados neste estudo (Tabela 9) e que foi neste sítio em que os modelos mostraram as maiores diferenças entre si (mesmo para o tratamento irrigado) em termos de massa fresca de colmos (Figuras 37f e 37g), pode-se inferir que os modelos respondem diferentemente em relação às altas temperaturas do ar e, como mostrado nas Figuras 39 e 40, há de fato diferenças dos algoritmos de perfilhamento

e área foliar dos modelos que implicam em atraso do modelo AS em relação ao modelo DC no que refere ao desenvolvimento da copa (Figura 38d, 38e, 38f e 38g). Esse atraso, por sua vez, resulta também em atraso na simulação do desenvolvimento foliar e no início da captação de radiação solar, explicando a menor biomassa acumulada nas simulações do modelo AS em comparação com o modelo DC em todos os sítios experimentais (Figura 37). Como essa característica fica mais evidente para os locais mais quentes, infere-se também que isso decorre do modo pelo qual o modelo AS faz o cômputo do somatório térmico (ºC·d) baseando-se em uma interpolação da temperatura máxima e mínima do ar a cada 3 horas, usando temperatura base de 9 ºC, temperatura ótima de 32 ºC e temperatura máxima de 45 ºC. O modelo DC utiliza a mesma abordagem, mas considerando temperatura base específica para cada processo e calculando o somatório térmico sem levar em conta os limites impostos pela temperatura ótima e máxima. Assim, essa diferença estrutural entre os modelos resulta em diferenças nas simulações especialmente em ambientes mais quentes e, no caso dos dados experimentais aqui analisados, indicam que o modelo DC parece ter uma estrutura mais apropriada para ambientes mais quentes em termos de acumulação de biomassa e período de emergência. Também, baseado nessas considerações, pode-se sugerir uma melhoria no modelo AS para simulação em ambientes muito quentes alterando o modo de integração numérica do somatório térmico pelo uso de sistema de trapezoidal (i.e. tendo duas temperaturas ótimas) em substituição da abordagem triangular atualmente utilizada no modelo, que utiliza apenas uma temperatura ótima e reduz o acúmulo de graus-dia em ambientes muito quentes.

Nas Figuras 39 e 40 comparam-se os algoritmos de desenvolvimento da copa (perfilhamento, número de folhas e área foliar) dos modelos AS e DC (para as variedades NCo376 e RB867515) utilizando as mesmas unidades e os dados coletados no sítio experimental 7. Após a calibração para a variedade RB867515, o modelo AS requereu o incremento do fator de perfilhamento em duas vezes para melhor simular a massa de colmos nos experimentos (Figura 41). Isso indica subestimativa na taxa fotossintética quando se utilizou ajustou este fator de perfilhamento para valores que condiziam com as observações de campo. Assim, tem-se que a despeito da falta de evidência experimental, foi necessário incrementar a “dimensão da copa” simulada no modelo AS para que ele fosse capaz de simular adequadamente o crescimento da cultura. No processo de calibração, foi também necessário aumentar o número de folhas verdes para 13 (apesar da variedade RB867515 apresentar-se com 10 folhas verdes em todos os experimentos considerados neste estudo) para que o modelo simulasse adequadamente esse conjunto de dados experimentais. No modelo DC,

possivelmente, este aspecto foi incluído no modelo através do parâmetro que descreve a taxa de conversão da radiação solar em carboidrato assimilado (parâmetro PARCEMAX, Tabela 20) como específico da variedade, o que permitiu ajustá-lo de 9,9 (valor de referência para a variedade NCo376) para 11,1 g·MJ^{-1} para a variedade RB867515 e, de modo indireto, tornar a copa mais eficiente no processo de conversão da radiação solar. Este processo foi também utilizado por Marin et al. (2011) e tem base experimental como reportado em Marin et al. (2014). É importante lembrar que o modelo AS não assume a eficiência de uso da radiação como sendo específica da variedade e, portanto, sendo um valor único para a espécie e não passível de ajuste na calibração. Baseando-se nessas alterações, e admitindo-se que a eficiência de uso da radiação das variedades brasileiras não difira expressivamente das observadas nas variedades australianas e sul-africanas, pode-se inferir que a questão da estrutura da copa e da absorção da radiação poderiam ser melhor exploradas em ambos os modelos para seu desempenho fosse melhorado na simulação dos sistemas brasileiros de produção de cana.



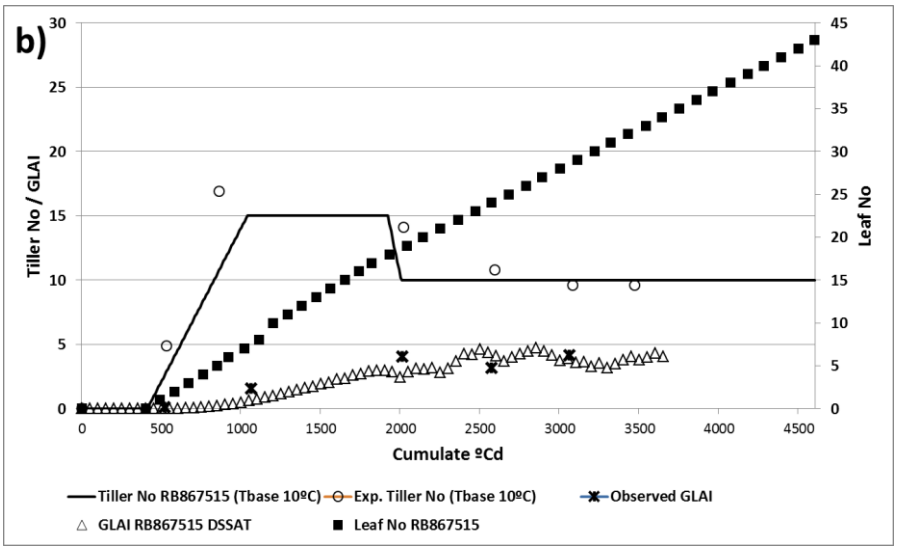


Figura 39 - Representação esquemática dos algoritmos de perfilhamento e área foliar do modelo DSSAT/CANEGRO para as variedades NCo376 (a) e RB867515 (b).

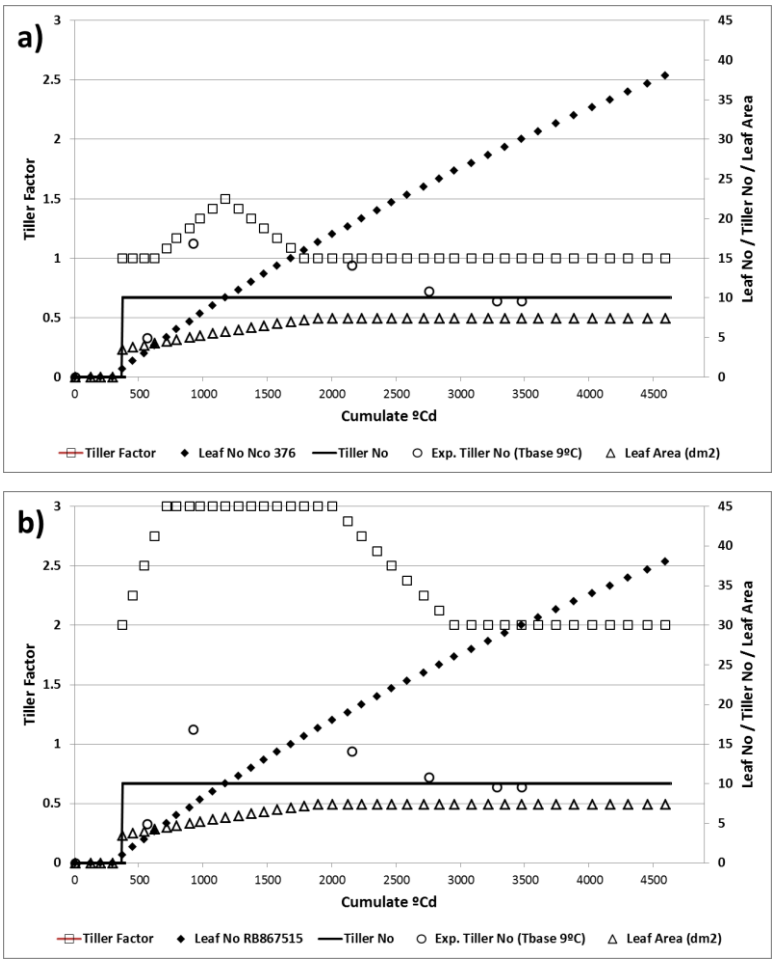


Figura 40 - Representação esquemática dos algoritmos de perfilhamento e área foliar do modelo APSIM-Sugar para as variedades NCo376 (a) e RB867515 (b).

5.2.2 Intercomparação de modelos após a calibração para uma importante variedade brasileira

Após as calibrações utilizando os dados dos 9 experimentos, ambos os modelos mostraram bom desempenho na simulação da fenologia da cultura, da massa seca da parte aérea, massa de raízes, área foliar, massa de colmos e nos componentes do balanço hídrico (Figuras 41 e 42). Entretanto, como abordado acima, as diferenças estruturais repercutiram em diferenças nas simulações das variáveis de crescimento e desenvolvimento da cultura que envolvem os processos de emergência, perfilhamento, dinâmica do crescimento foliar, eficiência do uso da radiação e dinâmica da água no solo.

Com relação a fenologia e perfilhamento, já é bem sabido que o número de perfilhos aumenta rapidamente até um pico durante, aproximadamente, 1400 ºC·d a partir da emergência passando para uma fase em que ocorre decréscimo no número de perfilhos até a estabilização (Inman-Bamber, 1994). Para as soqueiras, é comum que esse pico de perfilhamento requeira menor soma térmica do que na cana-planta e, consequentemente a copa se desenvolva mais rapidamente (Robertson *et al.*, 1996). Ambos os modelos simulam a dinâmica de crescimento da copa de modo dependente do estágio fenológico, considerando os efeitos da temperatura do ar (de modo direto) e da radiação solar (de modo indireto) em cada um desses estágios.

Como já mencionado, o desenvolvimento da área foliar e a expansão do LAI são simulados após um determinado valor de somatório térmico para sua emergência (ou para sua rebrota no caso das soqueiras), contado a partir do plantio (ou da colheita), e ambos os modelos permitem que este valor possa ser ajustado para cada variedade na forma de um parâmetro. Para os ajustes obtidos nas Figuras 41 e 42 utilizou-se os parâmetros das Tabelas 20 e 21. Como já mencionado, no modelo AS, a calibração para a variedade RB867515 demandou ajuste da densidade de plantas na maturação para 13 plantas·m^{-2} para a melhor qualidade nas simulações da massa de colmos e LAI, apesar dos valores observados oscilarem entre 9 e 11 plantas·m^{-2} nos experimentos analisados neste estudo (Tabela 20). Para o modelo DC, obteve-se melhor desempenho do modelo configurando-se o parâmetro relacionado ao número de plantas na maturação para 10 plantas·m^{-2}, o que condizia com a média dos valores observados do campo (Tabela 20)

Tabela 20 – Parâmetros ajustados para a variedade RB867515 para o modelo DSSAT/CANEGRO. Os parâmetros da variedade NCo376 fornecidos na distribuição do modelo DSSAT/CANEGRO são também apresentados para comparação

Parâmetro	**Unidade**	**RB867515**	**NCo376**
PARCEMAX	$g \cdot MJ^{-1}$	11,1	9,9
APFMX	$t \cdot t^{-1}$	0,88	0,88
STKPFMAX	$t \cdot t^{-1}$	0,65	0,65
LFMAX	$folhas \cdot colmo^{-1}$	10,0	12,0
MXLFAREA	cm^2	546	360
MXLFARNO		18	14
PI1	ºC·d	89	69
PI2	ºC·d	107	169
PSWITCH		18	18
TTPLNTEM	ºC·d	408	428
TTRATNEM	ºC·d	203	203
CHUPIBASE	ºC· d	547	1050
TT_POPGROWTH	ºC·d	628	600
MAX_POP	m^{-2}	15	30
POPTT16	m^{-2}	10	13,3

Tabela 21 – Parâmetros calibrados para a variedade RB867515 no modelo APSIM-Sugar. Os valores dos parâmetros da variedade NCo376 fornecidos pelo modelo APSIM são também apresentados para comparação

Parâmetro	**Unidades**	**RB867515**					**NCo376**				
leaf_size	cm^2	3500	45000	74600	74600		3000	7000	12000	28000	
leaf_size_no		1	5	18	26		1	4	14	20	
cane_fraction	$t \cdot t^{-1}$	0,70					0,65				
sucrose_fraction_stalk	$t \cdot t^{-1}$	1	0,55				1	0,55			
stress_factor_stalk		0,2	1				0,2	1			
tt_emerg_to_begcane	ºC·d	650					1800				
tt_begcane_to_flowering	ºC·d	8000					6000				
tt_flowering_to_crop_end	ºC·d	2000					2000				
green_leaf_no	$folhas \cdot colmo^{-1}$	13					10				
tillerf_leaf_size		2	3	3	3	2	1	1	1,5	1	1
tillerf_leaf_size_no		1	5	10	18	26	1	4	10	16	26

No modelo AS, o rápido incremento da área foliar no período de perfilhamento intenso, como já descrito, é simulado com base no parâmetro relacionado ao perfilhamento de forma a elevar a área foliar sem a necessidade de incrementar o número de plantas por unidade de área. Esse número de plantas, logo após o pico de perfilhamento é, subsequentemente, reduzido conforme descrito neste mesmo parâmetro. A taxa de senescência de folhas verdes, por sua vez, é determinada como sendo o máximo de quatro taxas determinadas pelos fatores de idade,

competição por radiação solar, estresse hídrico e geada. No modelo, com o avanço na idade da cultura há limitação do número máximo de folhas verdes expandidas que a copa pode suportar. A competição por radiação solar é simulada para induzir a senescência de folhas sempre que a fração da radiação interceptada atinge 85% da radiação incidente. O estresse hídrico induz a senescência sempre que um fator dependente da disponibilidade de água no solo e da transpiração da planta (calculado do mesmo modo que o utilizado no modelo SAMUCA descrito na seção 5.1.2) e que, no modelo, afeta a fotossíntese quando este valor cai abaixo de 1,0. A geada é simulada como removendo 10% do LAI por dia em que a temperatura do ar cai até 0 ^{o}C, e removendo 100% do LAI se a temperatura cai até -5°C. O modelo DC controla a senescência de folha considerando apenas dois fatores – idade e estresse hídrico – e esses fatores são simulados de modo similar ao utilizado no modelo AS. No processo de calibração do modelo AS, ajustou-se o número máximo de folhas verdes como 13 por planta para a variedade RB867515, enquanto que no modelo DC o parâmetro referente a esta informação foi ajustado para 10 folhas por planta (Tabela 20 e 21), valor este que melhor representa os valores experimentais utilizados neste estudo.

Para simular o processo de conversão da radiação solar incidente em fotoassimilados, ambos os modelos se baseiam no conceito da eficiência de uso da radiação (RUE) (Monteith & Moss, 1977). Como já abordado na seção anterior, o modelo DC admite que a RUE seja específica da variedade e que o valor 9,9 g MJ^{-1} (em unidade de massa seca de cana produzidos, antes de computar a respiração, por unidade de PAR interceptada) é sugerida como padrão para a variedade NCo376. A fração do incremento de biomassa consumido para a respiração de manutenção e calculada como uma função da temperatura considerando a temperatura base de 10ºC (Singels et al., 2008). Nas versões do modelo DC distribuídas até o final de 2013, a relação da respiração com a temperatura é descrita por uma função exponencial (Singels et al., 2008), tendo sido modificada na nova versão do modelo para melhor representar o desempenho da cultura em condições de temperatura muito elevada (Singels et al., 2013). Esta versão do DC deve ser distribuída a partir de 2014 e, nela, os autores julgaram necessário essa modificação após evidências empíricas obtidas na África do Sul[23], mas que não condizem com as evidências obtidas neste estudo para a variedade RB867515.

No modelo AS, RUE é definida como a biomassa acumulada por unidade de radiação solar global interceptada e considerada como sendo muito estável entre variedades (Robertson

[23] (Dr. Abraham Singels, SASRI, África do Sul, informação pessoal)

et al., 1996) com base nas evidências obtidas por Muchow et al. (1994; 1997). O modelo AS, portanto, assume que RUE é uma característica da espécie e não um parâmetro dependente da variedade. Nesse modelo, portanto, manteve-se o valor padrão de 1,80 g·MJ^{-1} (em unidades de massa seca de assimilados produzidos após a respiração por unidade de radiação global interceptada) para a cana-planta e 1,65 g·MJ^{-1} para cana-soca (Keating et al., 1999). Vale mencionar que a carência de estudos de campo para a caracterização dos valores de RUE das variedades brasileiras dificulta a avaliação de modo mais profundo desse aspecto, avançando além de especulações.

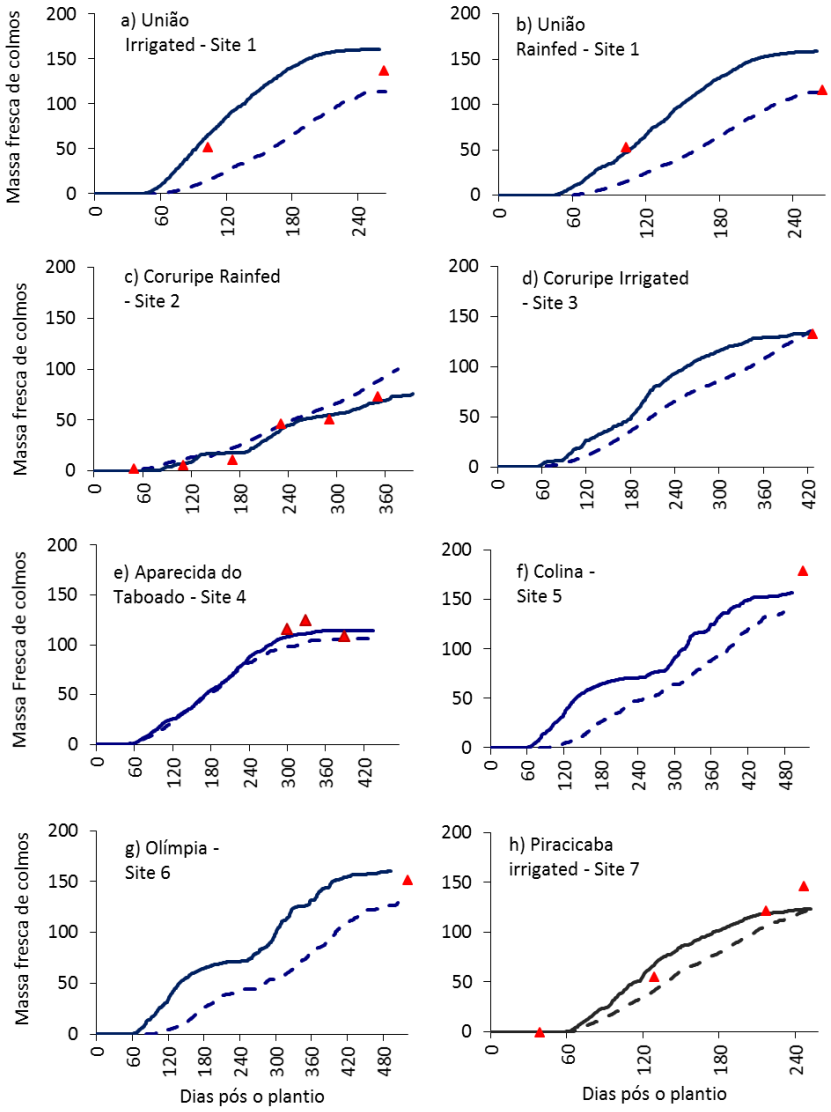


Figura 41 - Massa fresca de colmos (MFC, t ha^{-1}) simulada pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e APSIM-Sugar (linha pontilhada) após a calibração com dados da variedade RB86-7515 cultivada em diferentes ambientes no Brasil. Os triângulos

vermelhos são dados experimentais da variedade RB867515 observada em cada sítio e DAP é dias após o plantio

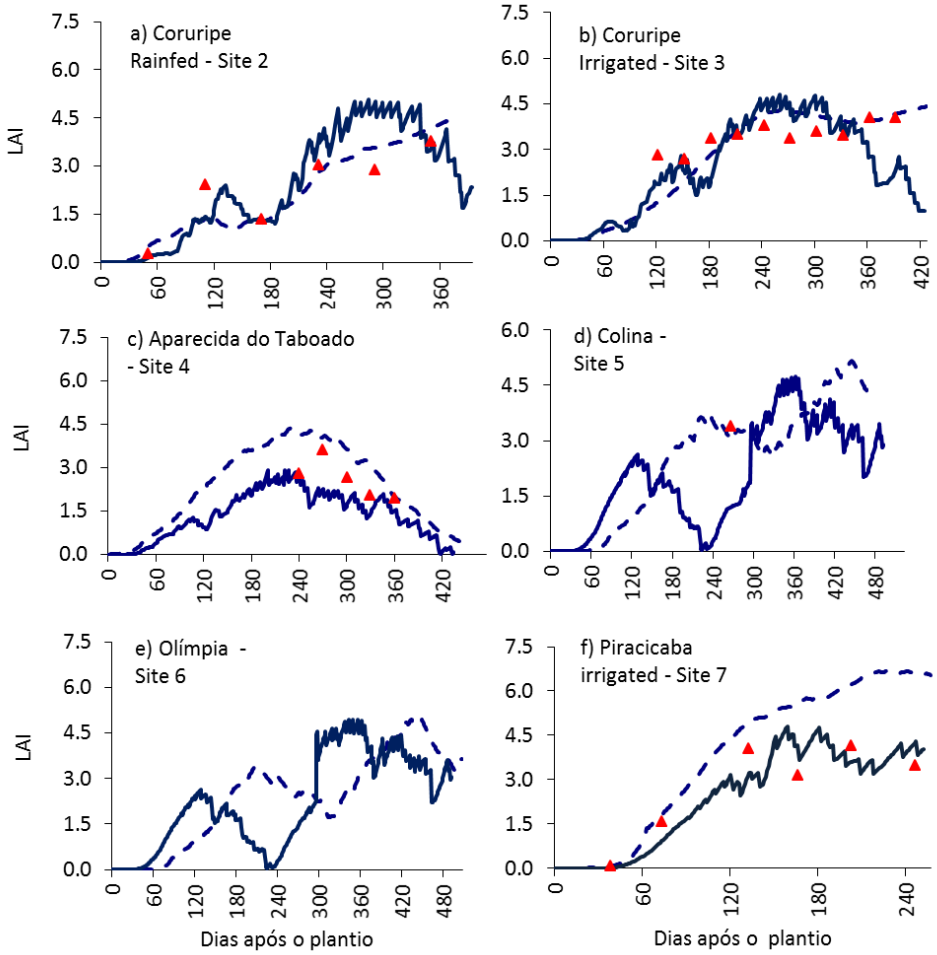


Figura 42 - Índice de área foliar (LAI) simulado pelo modelo DSSAT/CANEGRO (linha sólida) e APSIM-Sugar (linha pontilhada) após a calibração com dados da variedade RB86-7515 cultivada em diferentes ambientes no Brasil. Os triângulos vermelhos são dados experimentais da variedade RB867515 observados em cada sítio e DAP é dias após o plantio

Durante o processo de calibração dos modelos, foi possível verificar que o modelo AS simula o desenvolvimento da copa de modo mais lento do que o modelo DC, resultando assim em subestimativa do crescimento da cultura na fase inicial de desenvolvimento, mas com melhor desempenho na simulação das variáveis de biomassa nas fases finais do ciclo. Já o modelo DC simula o crescimento inicial da cultura de modo mais rápido em relação ao AS, o que resulta em maiores valores de biomassa ao longo do ciclo, seja nas fases iniciais como no estágio de maturação da cultura. Os valores das medidas de ajuste para massa de colmos e LAI são apresentadas na Tabela 22, mostrando desempenho diferenciado dos modelos em comparação aos dados observados de massa de colmos (enquanto AS subestima os valores

observados, o DC superestima-os); o modelo apresentou desempenho pouco superior do que o modelo AS para o conjunto de dados analisados.

Na simulação do LAI, o modelo DC forneceu menores valores em comparação com o padrão médio do modelo AS e isso parece ter sido consequência de dois fatores. O primeiro foi relacionado ao aumento dos parâmetros relacionados à estrutura de copa no modelo AS (o que não foi necessário no modelo DC uma vez que o valor da RUE foi alterado). O segundo foi a maior sensibilidade do algoritmo de área foliar do modelo DC com relação ao estresse hídrico para o modelo (Figura 41). Essa inferência foi feita com base na observação de que ambos os modelos simulam os efeitos de períodos de estresse severo sobre a cultura, mas em condição de estresse moderado por falta d'água, o modelo DC penaliza o crescimento da copa mais cedo e de modo mais intenso do que o AS. Ao final, isso resulta em maior variabilidade na predição do LAI ao longo do tempo no modelo DC, enquanto o modelo AS fornece simulações mais estáveis e menos sensíveis a períodos curtos de deficiência hídrica (Figura 41).

Esse fato é mais evidente quando se compara as simulações produzidas para os dois sítios experimentais em Olímpia e Coruripe (Figuras 41c e 41d). Neles, é possível identificar algumas diferenças entre os modelos no que se refere ao efeito da deficiência hídrica sobre o LAI. Em Olímpia (Figura 42c), ambos os modelos simulam um pico de LAI de aproximadamente 4,0 entre 120 e 180 DAP seguido por um forte decréscimo em consequência de um período de seca severa. Observando as linhas dos dois modelos, é possível notar a maior sensibilidade do modelo DC tanto durante o período seca, bem como na recuperação desta (aproximadamente 240 DAP). No mesmo local, o modelo AS mostra crescimento mais lento no período inicial da cultura, até o primeiro pico de LAI, quando também passa a mostrar o efeito da seca que atingiu a área experimental cerca de 180 DAP. No entanto, a taxa de queda do LAI durante seca é sensivelmente menor no modelo AS, assim como é mais ameno o processo de recuperação após a retomada das chuvas. No experimento de sequeiro, em Coruripe (Figura 42d), tem-se algo similar (porém em dimensões mais reduzidas) nos primeiros 6 meses da cultura, observando-se o LAI crescendo até 120 DAP e um decréscimo daí até 180 DAP. Neste período de seca, pode-se notar a resposta mais rápida do modelo DC durante tanto na seca quanto à recuperação após a retomadas das chuvas. Esse padrão diferenciado de resposta, além das diferenças entre os modelos quanto ao início do processo de senescência foliar sob estresse mencionado anteriormente, é também resultado do algoritmo que descreve a transpiração da cultura nos modelos. No modelo DC, os valores de transpiração são maiores

que no modelo AS, o que implica em consumo mais rápido da água disponível no perfil do solo e demonstração mais rápida e intensa do efeito de períodos de seca que no modelo AS.

5.3. Simulação multimodelos de crescimento e desenvolvimento da variedade RB867515

Os três modelos mostraram boa capacidade de simular a produção de biomassa da variedade RB867515 no Brasil, com r=0,95; r=0,96 e r=0,98 para os modelos AS, DC e SAMUCA, respectivamente (Tabela 22). A média das simulações geradas pelos modelos (doravante denominada como Média) forneceu melhores predições de massa de colmos e LAI do que os modelos isolados para todos os experimentos e em todos as fases de cada experimento (Figura 43, Tabela 22), com especial melhoria na qualidade das simulações para o LAI. O valor do RSME obtidos com a Média foi menor que os obtidos em outros trabalhos utilizando os modelos AS e DC (Keating et al., 1999; O´Leary, 2000; Cheeroo-Nayamuth et al., 2000; Singels & Bezuidenhout, 2002; e Marin et al., 2011).

Tabela 22 - Indicadores de concordância estatística das simulações produzidas pelos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO para as variáveis massa fresca de colmos (MFC, t/ha) e índice de área foliar (LAI) em relação aos dados observados

Modelo	**Indicador estatístico**	**MFC**	**LAI**
APSIM- Sugar	RMSE	18,95	1,01
	r	0,95	0,62
	Eficiência	0,84	0,19
	Média Obs.	90,6	3,43
	Média Sim.	79,9	3,05
DSSAT/CANEGRO	RMSE	14,84	0,92
	r	0,96	0,73
	Eficiência	0,91	0,17
	Média Obs.	90,6	3,43
	Média Sim.	91,8	2,77
SAMUCA	RMSE	21,3	1,00
	r	0,91	0,78
	Eficiência	0,82	0,20
	Média Obs.	90,6	3,43
	Média Sim.	90,3	3,90
Média	RMSE	10,43	0,53
	r	0,97	0,84
	Eficiência	0,94	0,65
	Média Obs.	90,6	3,45
	Média Sim.	87,1	3,04

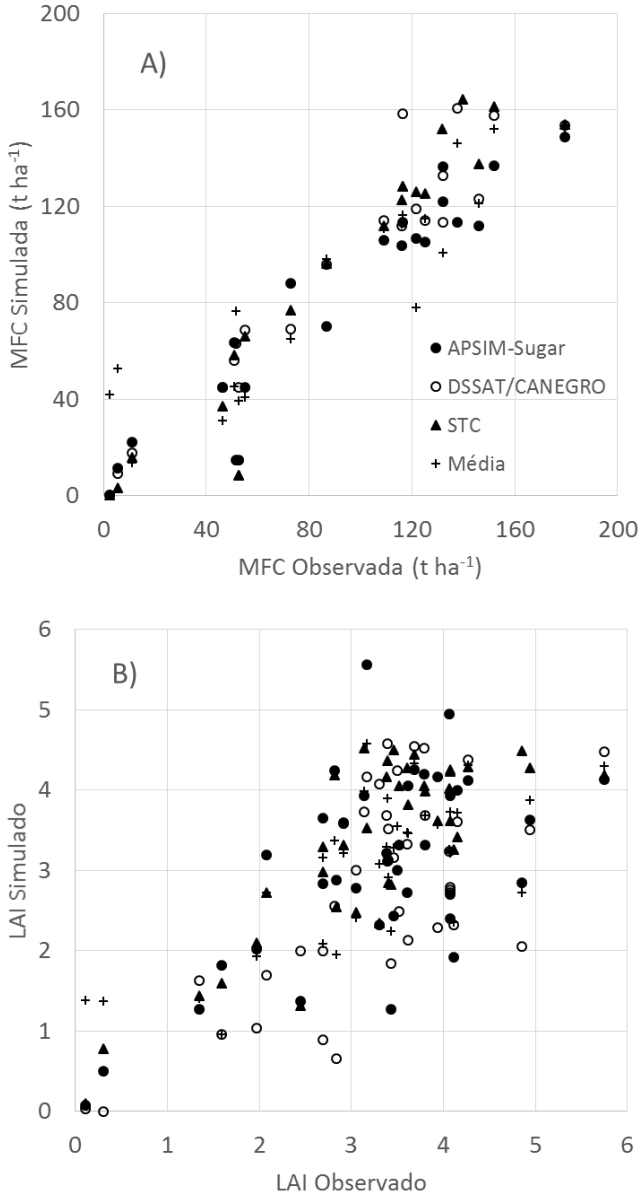


Figura 43 – Massa fresca de colmo (MFC, A) e índice de área foliar (LAI, B) simulados e observados em 8 experimentos com a variedade RB86-7515 utilizando os modelos DSSAT/CANEGRO, APSIM-Sugar e SAMUCA, e a média multimodelos

A esse respeito, vale destacar as considerações de Van Oijen & Ewert (1999) e Walker *et al.* (2003) sobre as três principais fontes de incerteza em simulações com modelos baseados em processos: (i) dados de entrada, (ii) calibração e (iii) estrutura do modelo. A relativamente pequena faixa de dispersão das simulações de MFC (Figura 43) indica menor grau de incerteza nessa variável do que a encontrada para o LAI, e que a relativamente baixa qualidade das simulações de LAI são provavelmente decorrentes da terceira fonte de incerteza sugerida por Van Oijen & Ewert (1999). Como dados de entrada, ambos os modelos utilizam dados

meteorológicos diários, dados de propriedades físicas (e químicas no caso do modelo AS) do solo, além das condições iniciais e dados de manejo do solo e da cultura. Assim, as incertezas relacionadas aos dados de entrada são também importantes especialmente para alguns sítios onde não havia dados meteorológicos medidos em locais próximos e o solo estava descrito de forma pouco detalhada. Neste estudo, este foi o caso dos sítios situados em Colina, Olímpia e Aparecida do Taboado. Contudo, mesmo para os experimentos com maior nível de controle, erros de medida e variabilidade de pequena escala no solo e da chuva são também fontes de incerteza que precisam ser consideradas neste tipo de análise. Nesse sentido, interessante destacar as colocações de Legates e Willmott (1990) e Subedi e Fullen (2009) sobre erros de medida de chuva utilizando pluviômetros padrão, os quais podem subestimar o volume de chuva precipitado e acrescentar uma nova fonte de incerteza em trabalhos dessa natureza. No caso deste estudo, boa parte das series meteorológicas contavam com valores faltantes que precisaram ser preenchidos apropriadamente, mas que também incrementaram o nível de incerteza das simulações.

Sobre o processo de calibração, é evidente sua dependência em relação à qualidade dos dados observados e, neste caso, parte dos sítios experimentais contavam com dados de qualidade moderada e poucos podem ser considerados como de boa qualidade. As Figuras 41 e 42 são exemplos de que mesmo utilizando os mesmos dados de entrada, há alguma incerteza introduzida pelo modo pelo qual esses dados são interpretados e utilizados nos modelos. Outra fonte de incerteza relacionado ao processo de calibração é que os valores dos parâmetros requeridos pelo modelo são normalmente modificados a partir de valores de referência sugeridos na distribuição do modelo, ou da literatura ou mesmo de estudos prévios com o mesmo modelo realizados nem sempre nas mesmas condições de contorno. A qualidade deste processo depende tanto da aplicabilidade (distância geográfica, variedades similares etc.) como da qualidade da fonte de dados empíricos. Lembrando que modelos de culturas agrícolas são, por definição, simplificações da realidade e algumas vezes há simplificações excessivas de alguns processos, é natural esperar que hajam discrepâncias entre simulações e dados observados. Para os três modelos analisados, assumiu-se que as diferenças principais nos algoritmos de perfilhamento, estrutura de copa e área foliar não se refletiram em diferenças substanciais na simulação da biomassa da cultura. Isso, por sua vez, está principalmente relacionado com as respostas do modelo à temperatura do ar em termo de fenologia, que parece ter afetado de modo mais pronunciado a habilidade do modelo AS na simulação do crescimento

foliar em ambientes muito quentes, bem como a estrutura de copa, a qual foi aparentemente subestimada pelos três modelos.

5.4 Cenários agrícolas futuros com base em simulações multimodelos

Com base nas simulações produzidas pelos 3 modelos, foi possível identificar que a massa fresca de colmos nos cenários futuros respondeu positivamente aos cenários climáticos futuros (Tabela 23) em relação as simulações com base em dados climáticos atuais (1980 a 2010). Com base nesses dados, de modo geral, nenhum dos cenários climáticos futuros implicaria em perda de produtividade em relação ao padrão atual.

Interessante destacar, contudo, que apenas o modelo DC (Tabela 24) indicou elevação substantiva da produtividade nos cenários futuros, enquanto os modelos AS (Tabela 25) e SAMUCA (Tabela 26) projetaram cenários futuros com produtividades levemente superior ou até mesmo inferior ao padrão atual, quando se considerou a média ponderada pela área de cana em cada região homogênea definida na Tabela 11. Assim, dado que o modelo DC indicou produtividades futuras expressivamente superiores às atuais, tem-se que os cenários da Tabela 23 indicam incremento de produtividade entre +4% e +8%. Numa tentativa de computar apenas a variação em relação à média, excluindo dessa análise a intensidade da variação, tem-se na Tabela 27 uma composição dos resultados de cada modelo, onde se percebe o modelo DC indicou variação positiva para a maioria das localidades, enquanto que os modelos AS e SAMUCA indicando projeções negativas para uma parte das localidades, mas apontando ganho de produtividade no cenário geral considerando a avaliação conjunta dos três modelos.

Considerando os resultados individuais de cada modelo, observa-se o modelo DC indicando elevação relativa da massa fresca de colmos entre +22% e +35% (Tabela 25) para os cenários futuros, com queda apenas para o cenário B1 para Votuporanga (Tabela 27). Para todos os demais locais e cenários, o modelo apontou elevação da produtividade em valores relativamente elevados. O modelo AS, por sua vez, aponta queda na produtividade de -5% e -3% (Tabela 24), projetando manutenção nos níveis de produtividade para apenas um dos cenários (A2i). Analisando-se os resultados por localidade (Tabela 27) nota-se que, com exceção de Presidente Prudente, as projeções foram negativas para todas as localidades. O modelo SAMUCA mostrou-se intermediário entre os demais, produzindo projeções negativas para 37% dos locais/cenários, e positivas para 63% dos locais/cenários restantes (Tabela 27). Com base na média ponderada pela área de abrangência de cada localidade, o modelo SAMUCA projetou queda na produtividade entre -1% e -2% em relação ao clima atual.

Neste ponto, merece destaque o fato do modelo AS ser o único dentre os 3 analisados aqui que considera processos biofísicos relacionados ao ciclo do carbono [afetando a produção/decomposição de palha e matéria orgânica no solo e a evaporação da água no solo, Marin et al., (2013)] e do nitrogênio [envolvendo a disponibilidade e a lixiviação de nitratos, Costa et al. (2014)]. Vale lembrar que variações na temperatura e na chuva são especialmente importantes para esses processos, o que torna os resultados produzidos pelo AS relevantes nesta análise. Ainda sobre o modelo AS, tem-se na Tabela 28 um resumo dos valores gerados pelos fatores de estresse para deficiência de nitrogênio e deficiência hídrica para a cultura, onde pode-se observar que a deficiência por nitrogênio representa maior impacto negativo na produtividade que a falta d'água no solo, indicando que o manejo do nitrogênio na cultura deve ser também uma questão de interesse nos estudos sobre adaptação de culturas às mudanças climáticas futuras. Neste trabalho, as simulações com o modelo utilizaram a mesma dose de nitrogênio (na forma de ureia) ao longo do tempo, conforme descrito na seção 4.4. Contudo, sob temperaturas mais elevadas e maior intensidade de chuvas nos cenários (Tabela 13), é razoável supor que o ciclo da matéria orgânica no solo seja acelerado, reduzindo a disponibilidade do nutriente no solo. Outros processos que podem ser afetados pelo aumento das chuvas nos cenários futuros são a lixiviação e a desnitrificação, com impacto no estoque de nitrogênio no solo no longo prazo. Neste sentido, vale também mencionar que o modelo AS, desenvolvido na Austrália e baseado num grande conjunto de dados experimentais coletados naquele ambiente, pressupõem uma taxa de desnitrificação maior que aquelas observadas nos solos brasileiros, sendo esta uma possível incerteza nas simulações produzidas pelo AS e que possivelmente tornem suas projeções mais pessimistas. Para minimizar este aspecto, contudo, o modelo foi modificado de modo a reduzir as taxas de desnitrificação, conforme descrito na seção 4.5.

Os resultados referentes ao modelo AS já haviam sido identificados por Soares & Marin (2013) para 13 localidades no Brasil, e enriquecem a discussão referente ao efeito das mudanças climáticas na cultura da cana-de-açúcar e contrariam em parte a concepção geral produzida até o momento na literatura científica brasileira (Assad et al., 2008; Gouvêa et al., 2009; Marin et al., 2012; Santos & Sentelhas, 2013). 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, para cenários de emissões A2 e B2, com projeções futuras bastante favoráveis quanto

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.

Nessa discussão vale mencionar o trabalho de Rosensweig et al. (2013b), utilizando uma abordagem multimodelos em escala mundial para avaliar cenários agrícolas futuros para milho, soja, arroz e trigo. Eles encontraram resultados similares sobre a questão do nitrogênio, observando que os modelos que simulavam o balanço desse nutriente no solo projetavam impactos negativos severos para a produtividade dessas culturas em escala mundial, mas sobretudo para as regiões produtoras de baixa latitude. Vale também destacar que experimentos (Kimball, 2010) têm demostrado que os ganhos de produtividade decorrente da elevação da [CO_2] são minimizados sob condições de deficiência de nitrogênio no solo, com implicações evidentes sobre as estratégias de manejo da cultura em condições de clima futuro. Com base neste aspecto, é possível inferir que as projeções otimistas produzidas pelo modelo DC seriam coerentes apenas em cenários futuros de aumento da fertilização nitrogenada (ou aumento do estoque de carbono e nitrogênio decorrentes da manutenção da palhada) nos canaviais e, ao contrário, que a manutenção das doses atuais de fertilização seriam melhor representadas pelas simulações geradas com o modelo AS.

Considerando, ainda, a tendência de remoção da palha do campo para uso nas usinas, pode-se ter aí uma fonte adicional de pressão sobre os sistemas produtivos canavieiros, uma vez que a manutenção da palhada pode acarretar em ganho expressivo no estoque de carbono e nitrogênio no solo no longo prazo (Trivelin et al., 2013). Assim, tendo em vista que a tendência de remoção de palha é forte entre os produtores, as estratégias de adaptação frente ao clima futuro precisarão de algum modo considerar o manejo da adubação nitrogenada, para compensar ao mesmo tempo as possíveis perdas de nitrogênio no sistema produtivo com a mudança no clima e com a remoção da palha do campo.

Outro aspecto a diferenciar a resposta dos modelos aos cenários climáticos futuros está relacionado com a sensibilidade dos modelos à variação 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, reduzindo a produção de colmos mesmo com pequenos aumentos na temperatura do ar. O modelo DC, ao contrário, mostra-se mais estável para aumentos de até 3 ^{o}C na temperatura do ar, passando a reduzir as estimativas de massa de colmos a partir desse valor. Isto está associado principalmente ao sistema de cômputo de graus-dia. Na versão atual do modelo DC, não há restrição para temperatura base superior no cômputo dos graus-dia, enquanto que o AS tem essa limitação para temperaturas elevadas, que parece limitar em demasia o ritmo de desenvolvimento da cultura para os padrões observados no Brasil.

Recentemente, Singels et al. (2013) reportam que uma nova versão do modelo DC deve passar a incorporar um limite para temperatura elevada, mas usando um sistema trapezoidal para o cômputo da somatória de graus-dia (com uma temperatura base inferior, duas temperaturas ótimas e um valor de temperatura base superior. Vale notar que o modelo AS conta com um sistema triangular para o cômputo da soma térmica (uma temperatura base inferior, uma temperatura ótima e um valor de temperatura base superior). O modelo SAMUCA, por sua vez, não conta com limitação para temperatura superior para o cômputo do somatório térmico, estando, portanto, as respostas negativas para cenários climáticos futuros mais quentes, associadas a elevação da evapotranspiração (ainda estimada por uma modificação do método de Priestley-Taylor com alta sensibilidade à temperatura do ar).

Nessa discussão, vale também relembrar que até recentemente, não se esperava resposta das espécies C4 a elevação do [CO_2], com base nos trabalhos de Ottman et al. (2001) para a cultura do sorgo, Leakey et al. (2006) para milho e Maherali et al., (2002) para uma espécie C4 nativa do Estado do Texas, nos Estados Unidos. Entretanto, as modificações implementadas nos códigos dos modelos DC, AS e, por conseguinte, no modelo SAMUCA, foram feitas com base nos resultados dos trabalhos de Ziska & Bunce (1997); Vu et al. (2006), Souza et al. (2008) e Vu & Allen Jr (2009). Estes quatro trabalhos reportaram elevações expressivas na taxa de fotossíntese e produção de biomassa para plantas de cana-de-açúcar bem supridas hidricamente e sem restrição nutricional. A resposta da massa fresca de colmos em relação ao aumento na [CO_2] é mais acentuada no modelo DC, seguindo pelo modelo AS. O modelo SAMUCA, por considerar o efeito da [CO_2] apenas na taxa de fotossíntese líquida (enquanto os dois outros modelos também consideram o efeito da [CO_2] sobre a transpiração da cultura), mostra resposta comparativamente menor que a observada nos outros dois modelos. O efeito da elevação da [CO_2] na resistência estomática de espécies C4 já foi demonstrada na literatura e merece ser incluída nas próximas versões do modelo SAMUCA. Este efeito está associado ao fechamento estomático, à consequente queda na transpiração e melhoria do estado hídrico da planta quando a [CO_2] é elevada (Tolbert e Zelich, 1983; Owensby et al., 1997; Drake et al., 1997). Neste ponto, vale destacar que as simulações produzidas por Knox et al. (2010) e Marin et al. (2012), e os experimentos de Souza et al. (2008) e Marchiori (2010), indicaram elevação na produtividade de água da cana-de-açúcar cultivada sob altas [CO_2] na atmosfera.

Na análise desses dados, vale também destacar que os três modelos analisados sofrem influência da temperatura do ar em diferentes processos, e que todos os cenários climáticos futuros considerados aqui projetam elevação da temperatura. Os principais processos afetados

são a taxa de fotossíntese e respiração (para o modelo DC), desenvolvimento e crescimento vegetativo e evapotranspiração. Assim, conforme tem-se efeito positivo da [CO_2] nos cenários futuros, a temperatura do ar exerce efeito contrário, tendendo a prejudicar a cultura. Contudo, considerando também que alguns dos cenários utilizados no presente trabalho projetam queda na precipitação em relação ao clima atual, pode-se generalizar que os benefícios do incremento da [CO_2] superam as possíveis desvantagens decorrentes das modificações em outras variáveis climáticas, notadamente a precipitação e a temperatura do ar.

Tabela 23 - Média ponderada das simulações de massa fresca de colmos atingível produzidas pelos modelos APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO e SAMUCA, com relação à área representada por 9 zonas climáticas homogêneas do Brasil, e variação da produtividade em 6 cenários climáticos futuros em relação ao clima atual

Cenário	Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga	Média Ponderada	Variação Relativa
B1e	123,0	144,7	158,3	113,3	141,5	163,8	148,7	132,3	141,6	143,0	104%
B1i	131,4	147,7	164,3	114,9	140,9	164,8	148,9	133,5	141,2	144,5	105%
B1p	134,0	148,7	162,1	113,0	141,3	165,2	150,3	144,7	143,3	147,5	107%
A2e	122,3	150,3	163,1	111,2	140,6	167,1	153,8	134,0	144,0	145,8	106%
A2i	131,3	151,3	167,1	114,4	144,2	167,1	153,4	136,4	146,1	147,7	107%
A2p	131,2	152,8	158,4	113,7	142,1	165,4	151,8	145,9	146,0	149,0	108%
Atual	126,2	146,7	167,9	112,4	122,0	119,2	155,1	130,3	159,2	138,1	100%
Fração da Área total	4%	21%	4%	3%	12%	13%	12%	21%	11%		

Tabela 24 - Média das simulações de massa fresca de colmos com o modelo APSIM-Sugar para 9 locais no Brasil e 7 cenários climáticos (1 atual + 6 futuros)

Modelo	Cenário	Ciclo	Local									Média Ponderada	Variação Relativa
			Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga		
APSIM-Sugar	B1e	Prec.	130,3	140,9	175,6	85,2	174,2	153,9	180,1	132,4	140,0	134,6	95%
	B1e	Tardia	93,4	120,4	132,2	109,3	152,0	153,3	136,8	119,2	118,3		
	B1i	Prec.	140,7	146,0	195,6	88,4	176,4	157,0	189,6	132,9	144,1	137,7	97%
	B1i	Tardia	105,3	124,4	141,1	110,7	150,3	152,7	141,0	120,3	121,3		
	B1p	Prec.	139,4	146,8	184,6	86,2	176,8	156,9	185,2	132,2	145,4	137,2	97%
	B1p	Tardia	104,7	126,9	129,8	108,5	148,4	152,7	138,5	119,9	123,5		
	A2e	Prec.	130,1	146,0	185,4	82,3	175,6	157,9	190,8	133,4	145,0	139,2	98%
	A2e	Tardia	93,0	132,1	137,0	102,3	148,5	157,5	145,5	122,0	128,0		
	A2i	Prec.	141,9	151,2	200,0	85,7	184,0	157,2	194,9	138,2	148,4	141,0	100%
	A2i	Tardia	104,7	129,3	142,2	109,4	152,4	154,3	141,5	120,7	126,3		
	A2p	Prec.	136,3	149,1	186,9	87,4	175,6	156,8	186,2	131,3	144,2	137,4	97%
	A2p	Tardia	103,3	127,4	126,6	108,7	148,5	152,6	138,4	120,1	124,7		
	Atual	Prec.	143,2	148,1	204,4	90,1	187,4	136,4	205,7	138,5	150,8	141,6	100%
	Atual	Tardia	112,6	130,4	157,6	110,4	162,2	127,8	163,0	124,7	129,3		
Média Local			119,9	137,1	164,2	97,5	165,2	151,9	166,9	127,6	134,9		
Média Geral			140,6										

Tabela 25 - Média das simulações de massa fresca de colmos com o modelo DSSAT/CANEGRO para 9 locais no Brasil e 7 cenários climáticos (1 atual + 6 futuros)

Modelo	Cenário	Ciclo	Local									Média Ponderada	Variação Relativa
			Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga		
DSSAT/ Canegro	B1e	Prec.	140,4	151,8	145,0	120,6	101,6	165,5	117,4	132,2	157,0	126,3	122%
	B1e	Tardia	103,5	135,0	127,0	128,1	93,8	157,6	100,2	110,5	143,0		
	B1i	Prec.	145,4	156,3	152,9	124,8	102,3	166,4	122,9	134,0	160,1	129,0	125%
	B1i	Tardia	118,0	138,9	134,7	129,1	91,7	159,4	102,2	114,0	146,3		
	B1p	Prec.	159,1	157,8	149,5	118,6	102,9	168,3	123,2	172,3	161,1	136,7	132%
	B1p	Tardia	117,2	140,3	151,2	128,7	92,1	159,8	100,9	144,0	147,2		
	A2e	Prec.	142,4	156,6	147,7	116,6	102,1	168,8	121,3	131,6	160,7	130,2	126%
	A2e	Tardia	106,4	144,4	129,8	126,9	96,4	161,8	106,8	115,6	150,7		
	A2i	Prec.	149,3	160,0	153,9	123,6	106,3	171,3	128,6	141,7	162,8	132,4	128%
	A2i	Tardia	121,4	144,5	133,5	128,7	91,2	163,0	101,8	116,2	151,0		
	A2p	Prec.	151,0	164,3	150,0	120,1	104,5	167,9	124,6	171,5	162,3	139,3	135%
	A2p	Tardia	128,1	152,9	127,8	130,3	92,1	159,4	101,7	150,7	149,3		
	Atual	Prec.	132,9	156,3	146,4	116,6	47,8	75,5	112,9	108,4	159,3	103,2	100%
	Atual	Tardia	99,2	125,3	123,1	125,6	3,9	77,9	92,2	111,6	143,4		
Média Local			129,6	148,9	140,9	124,2	87,8	151,6	111,2	132,5	153,9		
Média Geral			131,2										

Tabela 26 - Média e desvio padrão das simulações de massa fresca de colmos com o modelo SAMUCA para 9 locais no Brasil e 7 cenários climáticos (1 atual + 6 futuros)

Modelo	Cenário	Ciclo	Local									Média Ponderada	Variação Relativa
			Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga		
SAMUCA	B1e	Prec.	113,7±29,8	149,3±38	170,5±34,4	122,5±33,5	154,1±37,8	170,8±34,3	165,1±35,9	144,5±38	139,1±37,5	159,6	99%
	B1e	Tardia	156,6±37,5	170,5±34,4	199,5±19,1	114±30	173,5±33,3	181,4±30	192,4±23,9	154,8±37,7	151,9±37,9		
	B1i	Prec.	122,2±33,4	148,7±38	159,5±37,1	122,3±33,4	150,6±38	170,6±34,3	143,9±37,9	144±37,9	135,6±37	157,6	98%
	B1i	Tardia	156,8±37,5	171,8±33,9	201,8±17,3	114,1±30	173,8±33,2	182,7±29,4	193,8±23	155,9±37,6	139,6±37,6		
	B1p	Prec.	126,8±34,9	149,8±38	154,4±37,7	121,9±33,3	154,1±37,8	171,2±34,1	162,8±36,4	144,9±38	140,4±37,7	159,1	99%
	B1p	Tardia	156,5±37,5	170,6±34,3	202,9±16,5	113,9±29,9	173,5±33,3	182,1±29,7	191±24,8	154,8±37,7	142±37,8		
	A2e	Prec.	104,8±24,9	150,2±38	178,5±31,3	123,7±33,9	144,2±38	173,3±33,4	163,9±36,2	145,3±38	134,2±36,8	159,5	99%
	A2e	Tardia	157±37,4	172,3±33,8	200,5±18,3	115,1±30,5	176,4±32,2	183,4±29	194,3±22,6	156,2±37,5	145±38		
	A2i	Prec.	112,2±29,1	150,2±38	169,2±34,8	123,6±33,9	154,1±37,8	172,6±33,7	157,7±37,3	144,9±38	136,1±37,1	160,4	100%
	A2i	Tardia	158,1±37,3	172,3±33,8	204,1±15,5	115,1±30,5	177±32	184,5±28,5	195,7±21,7	156,8±37,5	151,8±37,9		
	A2p	Prec.	110,8±28,4	150,6±38	154,9±37,7	120,3±32,7	154,8±37,7	172,1±33,8	164,6±36	145,4±38	141,6±37,8	160,9	100%
	A2p	Tardia	157,8±37,3	172,4±33,7	204,3±15,4	115,1±30,5	176,9±32	183,9±28,8	195,5±21,9	156,3±37,5	153,6±37,8		
	Atual	Prec.	108,6±27,2	144,6±38	169,5±34,7	120±32,6	150,3±38	130,3±35,9	157,5±37,4	139,3±37,5	189,7±25,5	160,7	100%
	Atual	Tardia	160,6±36,9	175,1±32,7	206,3±13,7	111,3±28,6	180,6±30,4	167,1±35,4	199,2±19,3	159,1±37,1	182,6±29,4		
Média Local			135,9	160,6	184,0	118,1	163,9	173,3	177,0	150,2	148,8		
Média Geral			156,9										

Tabela 27 - Variação relativa das simulações geradas por três modelos para o clima atual para massa fresca de colmos para 9 locais no Brasil e 6 cenários climáticos futuros. + indica variação positiva, - indica variação negativa em relação ao clima atual. O sinal a esquerda representa o modelo SAMUCA, o sinal da direita representa o modelo APSIM-Sugar e o sinal da posição intermediária refere-se ao modelo DSSAT/CANEGRO

Cenário	Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga
B1e	++-	++-	-+-	++-	-+-	+++	++-	++-	---
B1i	++-	++-	-+-	++-	-+-	+++	-+-	++-	-+-
B1p	++-	++-	-+-	++-	-+-	+++	-+-	++-	-+-
A2e	-+-	++-	++-	++-	-+-	+++	++-	++-	-+-
A2i	++-	+++	-+-	++-	++-	+++	-+-	++-	-+-
A2p	-+-	++-	-+-	++-	++-	+++	++-	++-	-+-

Tabela 28 - Variação dos índices de estresse por deficiência de nitrogênio e deficiência hídrica no modelo APSIM-Sugar para nove locais no Brasil em sete cenários climáticos (um atual + seis futuros)

Fator	Cenário	Ciclo	Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga	Média Ponderada	Variação Relativa
Estresse Nitrogênio	A2e	Prec.	1,00	0,85	0,91	0,73	0,72	0,68	0,94	0,50	0,80	0,79	98%
		Tardia	1,00	0,92	1,00	0,35	1,00	0,65	1,00	0,61	0,94		
	A2i	Prec.	0,98	0,84	0,90	0,63	0,75	0,71	0,96	0,47	0,81	0,78	97%
		Tardia	1,00	0,91	1,00	0,27	1,00	0,65	1,00	0,55	0,93		
	A2p	Prec.	0,99	0,86	0,91	0,59	0,72	0,70	0,94	0,48	0,72	0,79	98%
		Tardia	1,00	0,93	1,00	0,29	1,00	0,70	1,00	0,63	0,92		
	B1e	Prec.	1,00	0,91	0,92	0,62	0,88	0,72	0,98	0,51	0,90	0,82	102%
		Tardia	1,00	0,95	1,00	0,28	0,99	0,66	1,00	0,66	0,97		
	B1i	Prec.	0,98	0,85	0,90	0,53	0,91	0,74	0,97	0,50	0,84	0,81	101%
		Tardia	1,00	0,94	1,00	0,26	1,00	0,69	1,00	0,63	0,96		
	B1p	Prec.	0,98	0,85	0,91	0,63	0,86	0,71	0,97	0,49	0,82	0,81	100%
		Tardia	1,00	0,91	1,00	0,30	1,00	0,69	1,00	0,65	0,95		
	Atual	Prec.	0,97	0,78	0,89	0,65	0,92	0,89	0,90	0,49	0,82	0,81	100%
		Tardia	1,00	0,84	1,00	0,32	0,99	0,88	1,00	0,62	0,89		
Média			0,99	0,88	0,95	0,46	0,91	0,72	0,98	0,56	0,88		
Estresse Hídrico	A2e	Prec.	1,00	1,00	1,00	0,98	0,97	1,00	0,99	1,00	1,00	0,91	99%
		Tardia	0,88	0,63	0,79	0,93	0,87	0,98	0,86	0,94	0,74		
	A2i	Prec.	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	105%
		Tardia	0,98	0,85	1,00	0,98	0,93	1,00	0,98	1,00	0,95		
	A2p	Prec.	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	102%
		Tardia	0,96	0,74	0,94	0,99	0,87	0,89	0,94	0,97	0,90		
	B1e	Prec.	1,00	0,97	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	101%
		Tardia	0,92	0,75	0,77	0,96	0,85	0,93	0,91	0,96	0,86		
	B1i	Prec.	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,97	1,00	1,00	1,00	0,92	100%
		Tardia	0,95	0,66	0,99	0,97	0,86	0,93	0,93	0,96	0,79		
	B1p	Prec.	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	102%
		Tardia	0,96	0,77	0,94	0,98	0,86	0,92	0,94	0,97	0,89		
	Atual	Prec.	1,00	0,98	1,00	1,00	0,91	0,96	0,95	1,00	1,00	0,92	100%
		Tardia	0,96	0,78	0,94	0,98	0,79	0,91	0,89	0,96	0,84		
Média			0,97	0,87	0,95	0,98	0,91	0,96	0,96	0,98	0,93		

5.5 Eficiência da produção da cana-de-açúcar brasileira com base em simulação multimodelos

As Figuras 44 e 45 apresentam os mapas de produtividade real baseados em dados fornecidos pelo IBGE, com a tendência de incremento tecnológico de produtividade já eliminada. Como comentado, para o período estudado (de 2006 a 2012) essa taxa de incremento foi em média de 0,42%, com alta variabilidade, especialmente em decorrência da crise financeira de 2008. Considerando as regiões analisadas neste trabalho, e ponderando a representatividade espacial de cada região, tem-se que a produtividade média do Brasil é de 60,5 t ha^{-1} (Tabela 29). Vale destacar que o banco de dados analisados no cômputo desta média teve valores inferiores a 30 t ha^{-1} excluídos, com o objetivo de melhor representar a realidade das unidades de produção de fornecedores ou das próprias usinas.

A Tabela 29 apresenta a média ponderada para o país da produtividade atingível resultado das simulações com os modelos DC, AS e SAMUCA. No geral, o clima atual permitiria alcançar produtividade de 138 t ha^{-1} para condições de cultivo com restrições baseadas apenas no estresse hídrico, sem qualquer outra limitação ao crescimento e desenvolvimento da cultura. A discussão em torno desse valor é bastante interessante e, ainda, permanece obscurecida pela dificuldade em se dissociar influências fisiológicas e do meio físico daquelas relacionadas com o manejo da cultura. Entretanto, a despeito de ajustes em torno desse valor, pode-se verificar claramente que a possibilidade de incremento da produtividade dos canaviais brasileiros é ainda grande, e um aspecto que merece atenção neste sentido é sobre a dificuldade de implementar boas práticas de manejo da cultura em larga escala. Isso explica em grande parte tanto a produtividade relativamente baixas da cultura no estágio de cana-planta, como também explica boa parte do declínio de produtividade das soqueiras, exigindo reforma entre o 4º e o 5º corte na maioria dos casos.

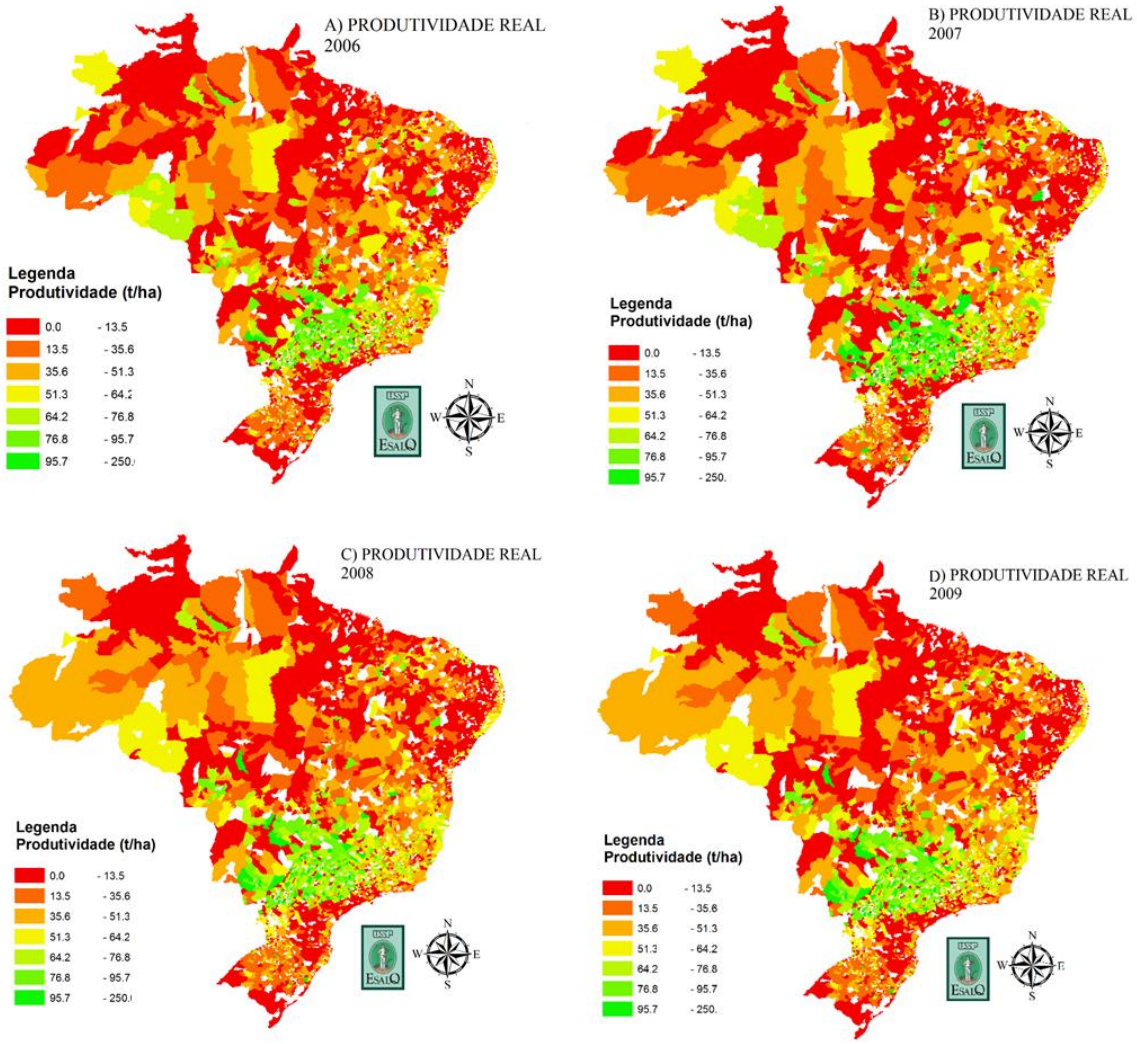


Figura 44 - Variação espacial da produtividade real de cana-de-açúcar entre 2006 e 2009, gerada a partir de dados fornecidos pelo IBGE.

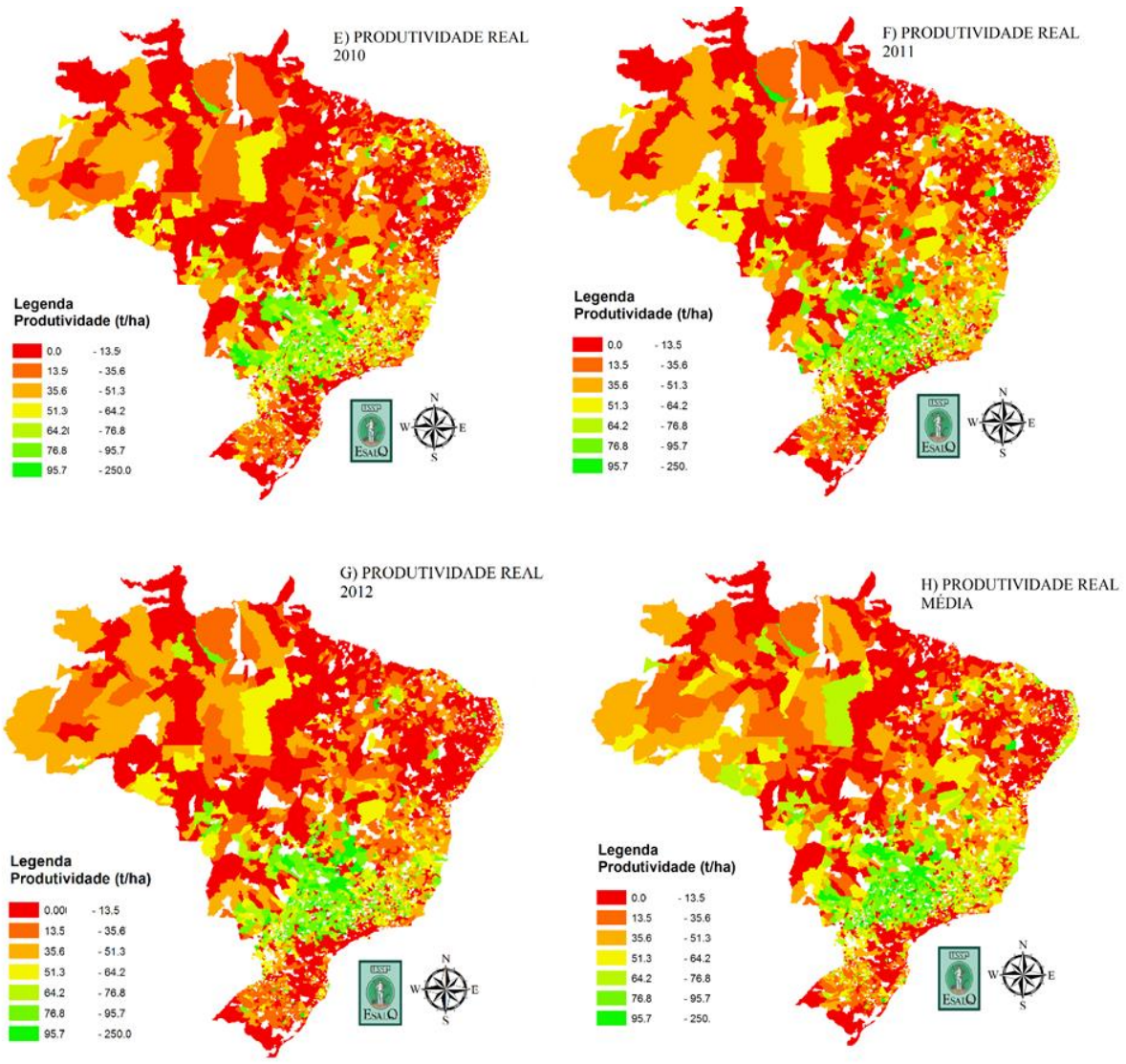


Figura 45 - Variação espacial da produtividade real de cana-de-açúcar em três safras agrícolas e média entre as safras 2010 e 2012, geradas a partir de dados da produção agrícola municipal do IBGE

Tabela 29 - Produtividade real e atingível, eficiência da produção e *yield-gap* explorável da cana-de-açúcar em nove regiões brasileiras e valores ponderados para o Brasil. São apresentados os valores calculados para o cenário atual e para 6 cenários climáticos futuros

		Brasília	Catanduva	Diamantino	Maceió	Paranaíba	Pres. Prudente	Rio Verde	Uberaba	Votuporanga	Média Pond. Brasil[24]
Produção Real (t ha^{-1})[25]		53,9	65,8	45,6	50,6	58,6	62,3	52,0	62,8	64,8	60,5
Produção Atingível (t·ha^{-1})[26]	B1e	123,0	144,7	158,3	113,3	141,5	163,8	148,7	132,3	141,6	143,0
	B1i	131,4	147,7	164,3	114,9	140,9	164,8	148,9	133,5	141,2	144,5
	B1p	134,0	148,7	162,1	113,0	141,3	165,2	150,3	144,7	143,3	147,5
	A2e	122,3	150,3	163,1	111,2	140,6	167,1	153,8	134,0	144,0	145,8
	A2i	131,3	151,3	167,1	114,4	144,2	167,1	153,4	136,4	146,1	147,7
	A2p	131,2	152,8	158,4	113,7	142,1	165,4	151,8	145,9	146,0	149,0
	Atual	126,2	146,7	167,9	112,4	122,0	119,2	155,1	130,3	159,2	138,1
Eficiência da produção[27]	B1e	44%	45%	29%	45%	41%	38%	35%	47%	46%	43%
	B1i	41%	45%	28%	44%	42%	38%	35%	47%	46%	42%
	B1p	40%	44%	28%	45%	42%	38%	35%	43%	45%	41%
	A2e	44%	44%	28%	46%	42%	37%	34%	47%	45%	42%
	A2i	41%	44%	27%	44%	41%	37%	34%	46%	44%	41%
	A2p	41%	43%	29%	45%	41%	38%	34%	43%	44%	41%
	Atual	43%	45%	27%	45%	48%	52%	34%	48%	41%	44%
Yield-Gap Explorável[28] (t·ha^{-1})	B1e	32,2	35,5	65,2	28,7	40,4	52,3	52,1	29,8	34,3	39,6
	B1i	38,1	37,6	69,4	29,8	40,0	53,0	52,2	30,7	34,0	40,7
	B1p	39,9	38,3	67,8	28,5	40,3	53,3	53,2	38,5	35,5	42,8
	A2e	31,8	39,4	68,5	27,2	39,8	54,6	55,7	31,0	36,0	41,6
	A2i	38,1	40,1	71,3	29,5	42,3	54,6	55,4	32,7	37,5	42,9
	A2p	38,0	41,1	65,3	29,0	40,8	53,5	54,3	39,4	37,4	43,8
	Atual	34,5	36,9	71,9	28,1	26,8	21,1	56,6	28,4	46,6	36,2

[24] Calculada com base na fração da área representada por cada zona homogênea.
[25] Valores calculados excluindo-se produtividades inferiores a 30 t ha^{-1}, de modo a representar produtores de maior porte e utilizando tecnologia mais avançada.
[26] Valores calculados a partir da média simulada pelos modelos DSSAT/Canegro, APSIM-Sugar e SAMUCA.
[27] Dada pela razão entre prod. real e produtividade atingível.
[28] Calculado pela diferença entre prod. atingível e prod. real, assumindo-se como limite máximo de produtividade 80% da prod. atingível.

A eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar oscilou entre 34% e 52% para Rio Verde e Presidente Prudente, respectivamente. Na média ponderada do Brasil, gira em torno de 44%, indicando uma oportunidade para elevação dos rendimentos dos canaviais brasileiros, algo especialmente importante num período de crise pela qual passa o setor sucroalcooleiro. Esses valores de eficiência condizem com faixa de eficiência preconizada por Lobel et al. (2009) para cultivos de sequeiro. Apesar das estimativas de produtividade atingível estarem sujeitas a maiores erros do que as simulações para cultivos irrigados, esses dados sugerem um amplo espaço para elevação da produtividade dos canaviais brasileiros. Levantamentos do Portal Sucroenergético do PECEGE-ESALQ indicam que são poucas as regiões do Brasil onde se consegue atualmente retorno financeiro positivo e, destas, apenas as empresas que alcançam níveis de produtividade elevados conseguem tornar o negócio rentável nos últimos anos. Dito isso, mesmo considerando que uma eficiência agrícola de 100% não seria interessante sob o ponto de vista econômico, tem-se que valores em torno entre 70% e 80% seriam razoáveis, como se tem observado para culturas anuais como o milho (Grassini et al., 2009).

Comparado com estudos anteriores (Marin et al., 2008 e Marin e Carvalho, 2012) os padrões de eficiência apresentados neste trabalho são relativamente menores (oscilando em torno de 50%), uma vez que os métodos de estimativa da produtividade utilizados anteriormente foram calibrados com dados comerciais de usinas, normalmente alcançando valores menores que os observados em experimentos. Assim, aqui, os valores de produtividade atingível parecem mais coerentes ainda que relativamente maiores em relação aos estudos anteriores.

Os valores de *yield-gap* explorável apresentados na Tabela 29 foram calculados a partir da diferença entre a produtividade atingível e a real, mas descontando-se 20% desse valor atingível de modo a representar uma meta mais realista para a cana-de-açúcar brasileira. Nota-se, assim, a oportunidade de acrescentar entre 30 e 40 $t \cdot ha^{-1}$ nos canaviais brasileiros para uma eficiência produtiva de 80%, o que representaria um salto de rentabilidade expressivo para o setor sucroenergético e um ganho produtivo expressivo para o país. Assumindo os valores de *yield-gap* explorável para o cenário atual apresentados na Tabela 29, pode-se estimar que o incremento de 36 $t \cdot ha^{-1}$ nessa área amostrada neste estudo (equivalente a 86% da área total de cana do país, Tabela 11) representaria em elevação da safra brasileira de até 294 milhões de toneladas.

Evans (1993), analisando as projeções futuras tratando de culturas para a produção de alimentos lembra dos casos históricos de projeções pessimistas quanto a segurança alimentar da humanidade que não se comprovaram verdadeiras. Para culturas como o milho e o trigo, por exemplo, a situação nos países desenvolvidos pode de fato causar preocupação, uma vez que a eficiência atual desses cultivos já é atualmente bastante elevada (Grassini et al., 2011; Brisson et al., 2010). No caso da cana-de-açúcar, contudo, as perspectivas são diferentes, com excelente potencial de crescimento da produção sem necessidade de expansão na área utilizada. Nesse sentido, num momento de discussão sobre questões ligadas à mudança de uso do solo, pode-se também estimar a área economizada com a cultura da cana-de-açúcar em decorrência da elevação da eficiência de produção. Com base nos dados obtidos, pode-se estimar que cada ponto percentual de elevação na eficiência representa aumento de 11 milhões de toneladas na produção nacional de cana-de-açúcar, ou cerca de 186.000 ha a menos que poderiam ser utilizados por outros setores produtivos.

Nos cenários climáticos futuros, observa-se a possibilidade de queda na eficiência, uma vez que as projeções foram feitas mantendo-se os valores de produtividade real atuais, sem projeta-los considerando o incremento da produtividade em decorrência do avanço tecnológico. Isso, contudo, não invalida a discussão e chama a atenção para a oportunidade de redução de custos no setor em decorrência da melhor exploração do ambiente produtivo, além do ganho evidente com a elevação da produtividade. Essa redução estaria, em parte, com a menor necessidade de área para a produção da mesma quantidade de cana-de-açúcar nas usinas, ou pelo ganho no volume produzido mantendo-se a área ocupada pela cultura atualmente. Assim, tem-se também uma redução parcial dos custos de transporte e colheita uma vez que haveria menor necessidade de deslocamento para transporte do mesmo volume de cana, ou um uso mais eficiente de máquinas, implementos e caminhões transportando mais matéria prima até as usinas.

Os estudos de Marin et al. (2008) e Marin e Carvalho (2012) exploraram também os fatores determinantes da eficiência de produção agrícola, tentando dissociar os fatores do meio físico daqueles associados aos aspectos de mercado, como preços e custos de insumos. Ambos os trabalhos identificaram que no Estado de São Paulo, os fatores de mercado explicavam cerca de 40% da eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar. Mais desafiante que estimar a magnitude da eficiência e o *yield-gap* explorável é identificar e entender os fatores que poderiam contribuir para a sua redução. A lista de fatores que normalmente limitam a produtividade da cana-de-açúcar é longa e variável entre regiões. A Tabela 30 apresenta uma

relação não exaustiva de fatores bióticos e abióticos, sendo alguns facilmente identificáveis, outros mais complexos para serem detectados, outros ainda relacionados ao manejo da cultura. Com base numa lista como a da Tabela 30, o desafio dos gestores agrícolas é identificar os principais fatores que têm a maior influência limitando a produção da cultura e, se possível, quantificar os ganhos que poderiam ser alcançados caso esses limitantes fossem superados (Lobel et al., 2009). Junte-se nessa discussão os resultados levantados em um amplo estudo realizado por Internacional Rice Research Institute (1979) em seis países asiáticos, que apontou a elevação nas doses de fertilizantes e agroquímicos como os principais fatores para a redução do *yield-gap*, mas que essas doses normalmente não se mostraram economicamente viáveis. Os autores, consequentemente, apontam a necessidade de reformas institucionais e novas tecnologias que permitam reduzir o custo de fertilizantes e agroquímicos ou reduzam a necessidade de controle de pragas, insetos e daninhas, uma vez que a decisão econômica para elevação da produtividade nem sempre é favorável. Este último aspecto ressalta também a importância para o setor sucroalcooleiro de políticas públicas no sentido de destravar economicamente o etanol, aspecto esse especialmente importante na conjuntura atual do Brasil, em que o setor demanda por apoio para reverter o quadro de sucessivos resultados negativos, especialmente no que concerne à produção de etanol.

Tabela 30 - Fatores que comumente afetam a perda de produtividade nos canaviais brasileiros Adaptado de Lobel et al. 2009.

Fatores biofísicos	**Fatores Socioeconômicos**
Deficiência nutricional	Maximização de lucros
Deficiência hídrica	Aversão ao risco
Compactação do solo por maquinário	Falta de acesso ao crédito
Competição com daninhas, ataque de pragas e doenças	Falta de conhecimento técnico
Época de plantio; época de colheita e população de plantas	*Benchmark* produtivo regional
Manejo varietal	Desconhecimento sobre a produtividade atingível da área produtiva
Tombamento por vento, chuva e granizo. Ocorrência de geadas	
Encharcamento do solo, limitações no solo por salinidade, drenagem	

5.6 Incertezas e Limitações

É bem sabido que os modelos climáticos globais (GCM´s) têm dificuldade em simular cenários futuros perfeitamente e que as variações em relação ao clima atual são normalmente mais confiáveis do que os valores absolutos projetados pelos GCM´s. Assim, considera-se que a abordagem aqui utilizada para geração dos cenários futuros, baseada no método delta (Gleick, 1986) é a melhor opção disponível para o tipo de estudo aqui produzido. Sobre os métodos de *downscaling*, utilizaram-se os métodos preconizadas pelo programa AgMIP, que envolvem as melhores técnicas desenvolvidas pela ciência meteorológica até o momento. Neste estudo, os cenários climáticos futuros reproduzem a variabilidade temporal dos elementos climáticos atuais, e isso implica que eles não contemplam mudanças na distribuição temporal das chuvas e na frequência de eventos extremos, como secas, ondas de calor e geadas. 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. A despeito disso, vale destacar que as projeções futuras se tratam de cenários e não de previsões, e devem ser assim encarados. Interessa também relembrar que apesar da dificuldade em quantificar a incerteza dos cenários climáticos futuros, as seis combinações aqui utilizadas representam variabilidade suficiente para permitir ao leitor uma análise minimamente ampla do futuro do setor sucroalcooleiro no que concerne à mudança no clima.

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 três 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. A seleção de solos predominantes por região representa um avanço em relação às tentativas anteriores de simular a produtividade da cana-de-açúcar, mas a representação dos solos nos modelos é ainda uma simplificação e uma fonte de incertezas. As simulações com o modelo SAMUCA, supondo incertezas nos parâmetros genéticos do modelo revelou um nível elevado de variabilidade nas simulações de massa fresca de colmos, que serve como ilustração do nível de incerteza associada aos estudos baseadas em modelagem baseada em processos de culturas.

6 CONCLUSÕES

Os três modelos de culturas utilizados neste trabalho mostraram-se capazes de simular adequadamente a fenologia, o índice de área foliar e a massa fresca de colmos para nove conjuntos de dados coletados em diferentes regiões do Brasil. O modelo SAMUCA, a despeito de sua relativa simplicidade em comparação com os outros dois, mostrou-se eficiente para a simulação da massa fresca de colmos e capaz de quantificar a incerteza associada aos parâmetros genéticos ou às variáveis de entrada associadas ao clima ou ao solo. A incerteza da simulação é uma medida da falta de conhecimento sobre os processos biofísicos e/ou o resultado da dificuldade em se representar em algoritmos o conhecimento já adquirido. A estratégia de computar a incerteza baseando-se na correlação entre variáveis aleatórias mostrou-se útil para a modelagem de culturas agrícolas, como já foi observado em outras áreas do conhecimento. O uso do método GLUE mostrou-se útil na calibração assistida do modelo bem como na construção da matriz de correlação entre os parâmetros do modelo.

As mudanças climáticas são aceitas pela maior parte da comunidade científica como algo provável de ocorrer nas próximas décadas. As projeções de longo prazo aqui estudadas em conjunto com diferentes modelos de crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar contribuíram para a análise do desempenho da cultura submetida ao clima futuro, e o avanço baseado em simulações estocásticas precisa ser mais bem explorado neste sentido. Também vale destacar a necessidade de avanço no conhecimento sobre os processos fisiológicos que controlam o acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar, a resposta da cultura ao estresse hídrico e ao incremento na concentração de CO_2 na atmosfera. No Brasil, novos experimentos para determinação da eficiência de uso da radiação são também necessários.

A despeito da incerteza ainda associada às simulações de massa fresca de colmos geradas pelos três modelos avaliados para os cenários climáticos de 2050, e da incerteza associada aos próprios cenários climáticos, o conjunto de simulações produzidas permite estabelecer que é mais provável que a cultura seja beneficiada pelas condições climáticas futuras, alcançando maiores produtividades em comparação com a condição atual. No entanto

o modelo APSIM-Sugar, o único a incluir processos relativos a decomposição da palha e ao ciclo do nitrogênio no solo e na planta, indicou possibilidade de perda produtividade para praticamente todos os locais e cenários climáticos futuros. Este aspecto conduz à questão de que a adaptação da cultura ao clima futuro precisa levar em conta o manejo nutricional.

A eficiência média atual da produção de cana-de-açúcar no Brasil é de 44%, correspondendo a um *yield-gap* explorável médio nacional de 41 $t \cdot ha^{-1}$ Os cenários futuros projetam variação negativa da eficiência, uma vez que as produtividades atingíveis no futuro têm perspectiva de elevação enquanto que as produtividades reais foram assumidas como constantes neste estudo. A superação da crise atual do setor canavieiro passa, entre outros fatores, pelo aprimoramento do manejo agrícola das áreas de modo elevar a eficiência produtiva, de modo a otimizar os recursos naturais e financeiros e reduzir o custo de produção.

REFERÊNCIAS

ACKLAM, P.J. An algorithm for computing the inverse normal cumulative distribution function. Disponível em: http://home.online.no/~pjacklam/notes/invnorm/figures/figure02.png. Acesso em: 3 mar. 2014.

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, et al. 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-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 725p.

ALEXANDROV, V.A.; HOOGENBOOM, G. The Impact of Climate Variability and Change on Crop Yield in Bulgaria. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdan, v.104 p.315–327, 2000.

ALLEN, L.H.; JONES, P.H.; JONES, J.W. Rising atmospheric CO2 and evapotranspiration. In:---------- Advances in evapotranspiration. St. Joseph: ASAE, 1985. p. 13-27.

ALLISON, J.C.S., N.W. PAMMENTER, E R.J. HASLAM. Why does sugarcane (Saccharum sp. hybrid) grow slowly? South African Journal of Botany cidade, v.73, n. 4 p. 546–551. 2007: doi:10.1016/j.sajb.2007.04.065.

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, cidade, Pretoria, v. 19, p.12–16, 2002.

ALPHEN, J. Natuurk. Tijdschrift voor Ned.-Indie, v.25, p.359, 1862.

ALVES, L.; MARENGO, J. Assessment of Regional Seasonal Predictability Using the PRECIS Regional Climate Modeling System over South America. Theoretical and Applied Climatology, Wien, v.100 p.337–350, 2010. http://dx.doi.org/10.1007/s00704-009-0165-2.

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-Sugar. Crop Module Documentation. Disponível em: http://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/CropModuleDocumentation/Sugar.aspx. Acesso em: 5 mar. 2014.

APSIM-SUGARCANE. Wiki. Disponível em: <http://www.apsim.info/Wiki/APSIM-Documentation.ashx>. Acesso em: 19 fev. 2012.

ARALDI, R.; SILVA, F.M.L.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Florescimento em cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria, v.40, n.3, p.23-38, 2010.

ARTSCHWAGER, E.; BRANDES, E.W. Sugarcane (Saccharum officinarum L.). Agricultural Handbook, New York, n. 122 p.307, 1958.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JR., J.; MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; EVANGELISTA, S.R.; OTAVIAN, A. 2008. Aquecimento Global e a Nova Geografia da produção Agrícola no Brasil.Brasília: Embaixada Britânica, 2008. 82p.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nature Climate Change advance online publication, 2013.

BAIGORRIA, G.A.; JONES, J.W. GiST: A stochastic model for generating spatially and temporally correlated daily rainfall data. Journal of Climate, Boston, v.23, p.5990–6008, 2010.

BALL-COELHO, B., SAMPAIO, E.V.S.B., TIESSEN, H., STEWART, J.W.B., Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. Plant Soil, Dordrecht, v. 142, p. 297–305, 1992.
BARBOSA, E.A. Avaliação fitotécnica de cinco variedades de cana-de-açúcar para o município de Salinas – MG. 2005. 70p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Fitotecnia) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, 2005.

BARBOSA, M. 2012. 1a usina de etanol celulósico do país entra em operação em 2013. Folha de São Paulo 12.

BARROS, G. Brazil: The Challenges in Becoming an Agricultural Superpower. In: Brazil as an economic superpower? Understanding Brazil s changing role in the global economy, BRAINARD L.; MARTINEZ-DIAZ, L. (Ed.).Brookings Institution Press, 2009. 146p.

BENOÎT, C. Note sur une méthode de résolution des équations normales provenant de l application de la méthode des moindres carrés à un système d'équations linéaires en nombre inférieur a` la résolution d un système défini d équations linéaires (Procédé du Commandant A.-L. Cholesky). Bulletim of the Geoderm, Kansas, v.2, p.67–77, 1924.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, Chichester, v. 6, n.3, p. 279–298, 1992.

BEZUIDENHOUT, C.N.; O LEARY, 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, cidade, v.76 p.589–599, (2003), Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00076-8.

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, Australia. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2013.

BOMBARDI, R.J., ; CARVALHO,L.M.V. de Variabilidade Do Regime de Monções Sobre O Brasil: O Clima Presente E Projeções Para Um Cenário Com 2xCO2 Usando O Modelo MIROC . Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos, v.23, p. 58–72, 2008.

BONNETT, G.D. Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. Functional Plant Biology, Victoria, v. 25, p.829–834, 1998.

BOOTE, K.; JONES, J.W,; PICKERING, N.B. Potential Uses and Limitations of Crop Models , Agronomy Journal, cidade, v.88),p.704–716, 1996.Disponível em: http://dx.doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x.

BORGES, U.; FREITAG, H.; HURTIENNE, T.; NITSCH, M. PROALCOOL: economia política e avaliação sócio-econômica do programa brasileiro de biocombustível. Aracajú: UFS, 1988. 125p.

BRESSAN FILHO, A. Os Fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil. In: Companhia Nacional de Abastecimento. Os fundamentos da crise do setor sucroalcooleiro no Brasil. Brasília: CNP, 2009. 86p.

BRISSON, N.; GOUACHE, P.G.D.; CHARMET, F.X.O.G.; HUARD, F. Why Are Wheat Yields Stagnating in Europe? A Comprehensive Data Analysis for France. Field Crops Research, Amsterdan, v.119 p.201–212, 2010.

BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdan, v. 31, p. 159–166, 1984.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. Geoderma, Amsterdan, v. 124, p. 3–22, 2005.

BRUINSMA, J. World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO Perspective (Earthscan/James & James, 2003) <http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=2yd868WG6V4C&oi=fnd&pg=PR1&dq=World+Agriculture:+Towards+2015/2030&ots=0I2RS-YnNL&sig=LipUVS3HYoi0aj-f87ejAK5EsNI> [accessed 14 June 2013].

BULL, T.A.; E GLASZIOU, K.T. The evolutionary significance of sugar accumulation in Saccharum. Australian Journal of Biological Sciences, Melobourne, v. 16, n. 4, p.737–742, 1963.

CANABRAVA, A.P. História econômica: estudos e pesquisas. Unesp, 2005. 785p.

CANDELA, A.; NOTO, L.V.; ARONICA, G. Influence of Surface Roughness in Hydrological Response of Semiarid Catchments. Journal of Hydrology, Amsterdan, v.313, (p.119–131, 2005.

CANDOLLE, A. L´origine des plantes cultivées. 12 ed. 1883.

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 doi:10.1590/S0103-90162013000600011.

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

CASSMAN, K.G.; MUNNS, D.N. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture temperature and depth. Soil Scienceo f the Society American Journal, London, v. 44, p. 1233-1237, 1980.

CELARIER, C. Cytotaxonomy of Andropogoneae. 1. Subtribes Dimeriinae and Sacharinae. Cytologia, Tokyo, v.21, p.272-291, 1956.

CESNIK, R; MIOCQUE, J. Melhoramento de Cana-de-açúcar. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 307p.

CHEEROO-NAYAMUTH, F.C.; ROBERTSON, M.J.; WEGENER, M.K; NAYAMUTH, A.R.H. Using a Simulation Model to Assess Potential and Attainable Sugar Cane Yield in Mauritius. Field Crops Research, Amsterdan, v.66, p.225–243, 2000.

CLEMENTS, H.F.; AWADA, M. Experiments on the artificial induction of flowering in sugarcane. Proceedings of International Society of Sugar Cane Technology, New York, v.12, p. 795–812, 1967.

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

COLEMAN, R.E. Effect of temperature on flowering in sugarcane. International Sugar Journal, Glamorgan, v. 6, p. 351–353, 1963.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dez. 2014. Brasília: Conab, 2014. 20p.

CONCEICAO, M.A.F.; MARIN, F.R. Avaliaçao de Modelos Para Estimativa de Valores Diários Da Radiaçao Solar Global Com Base Na Temperatura Do Ar . Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.15, p.103–108, 2007.

COSTA, L.G. da Simulação do efeito de palhada e adubação nitrogenada na produtividade de cana-de-açúcar. 2012. 245p. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, Araras-SP, 2012.

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 Agricola e Ambienta. 2014. v.18, n.5, p.469–474, 2014.

DAMATTA, F.M.A. GRANDIS, A.B.C.; BUCKERIDGE, M.S. Impacts of Climate Changes on Crop Physiology and Food Quality. Food Research International, 2009.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO. J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campína Grande, v. 10, n.2, p. 283-288, 2006.

DE VRIES, F.W.T.; BRUNSTING, A.H.M.; VAN LAAR, H.H. Products, Requirements and Efficiency of Biosynthesis a Quantitative Approach , Journal of Theoretical Biology, London, v. 45, p.339–377, 1974.

DEERR. D. Cane Sugar. Manchester, England: Norman Rodger (publisher), 1911.

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na Região Sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., 1988, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Copersucar, 1988. p.33-40.

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

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, K. ;REICHARDT, D.R.; NIELSEN, J.A. ;FRIZZONE, ; 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.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of Crop Modelling and Simulation: II. The Implications of the Objective in Model Development .Scientia Agricola, Piracicaba, v.55, p.51–57, 1998.

DRAKE, B.G.; GONZÀLEZ-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. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.609.

EBRAHIM M.K., ZINGSHEIM O., EL-SHOURBAGY M.N., MOORE P.H., KOMOR E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. Journal of Plant Physiology, Stuttgart, v.153, v.5/6, p. 593-602, 1998.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema de informações de solos brasileiros. Disponível em: < http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 10 jan. 2012.

EVANS, L.T. Crop Evolution, Adaptation, and Yield. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993. 345p.

EWERT, F.; VAN ITTERSUM, M.K.; HECKELEI, T. Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, London, v.142, p.6–17, 2011.

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.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.2007. (Reviews of Geophysics, 45).

FERREIRA, E.A.B.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C.; RAMOS, M.L.G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no Cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 31, p. 625–1635, 2007.

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

FOLHA DE SÃO PAULO, Folha de S.Paulo - Mercado - Desaceleração Econômica Acelera Recuperação Judicial No Brasil - 28/08/2012, Folha online, 2014 <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/1144457-desaceleracao-economica-acelera-recuperacao-judicial-no-brasil.shtml> [acesso em 26 Mar. 2014].

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO). Report on the agro-ecological zones project. FAO, Rome, 1978.

FRANKS, S.W.; GINESTE, P.H.; BEVEN, K.J.; MEROT, P.H. On constraining the predictions of a distributed model: the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process. Water Resources Research, Washington, v.34, p.787-797, 1998.

FREITAS, S. G. Análise de dados longitudinais em experimentos com cana-de-açúcar. 2008. 75p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba, 2008.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*.). Scientia Agricola, Piracicaba, v.54, p.62-68, 1997. doi: 10.1590/S0103-90161997000100009.

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.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

GHANNOUM O, VON CAEMMERER; 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.

GLASZIOU, K.T. Accumulation & Transformation of Sugars in Stalks of Sugar Cane. Origin of Glucose & Fructose in the Inner Space , Plant Physiology, Washington, v. 36, n.175, 1961.

GLEICK, P.H. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. Journal of Hydrology, Amsterdan, v. 88, p. 97–116, 1986.

GLOVER, J. Changes in sucrose % cane and yield of sucrose per unit area associated with cold, drought and ripening. Proceedings of the South African Sugarcane Technologists Association, 46. SASTA, Durban, South Africa, 1971. p. 158-164.

GLOVER, J. The dark respiration of sugar-cane and the loss of photosynthate during the growth of a crop. Annals of Botany, London, v.37, 845–852, 1973.

GODFRAY, H.C.J.; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.R. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science, Washington, v. 327, p.812–818, 2010.

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.

GRANTZ, D.A.; MEINZER, F.C. Stomatal Response to Humidity in a Sugarcane Field: Simultaneous Porometric and Micrometeorological Measurements. Plant, Cell and Environment, London, v.13, p.27–37, 1990.http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01296.x
.

GRASSINI, P.; YANG, H.; CASSMAN, K.G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: a simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. Agricultural And Forest Meteorology, Amsterdan, v.149, p.1254–1265, 2009.

GRASSINI, P.; YANG, H.; CASSMAN, K.G. Limits to Maize Productivity in Western Corn-Belt: A Simulation Analysis for Fully Irrigated and Rainfed Conditions. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdan, v.149, p.1254–1265, 2009.

HE, J.; PORTER, C.; WILKENS, P.; MARIN, F.R.; HU, H.; JONES, J.W. Guidelines for Installing and Running GLUE Program. DSSAT v 4.5 users guide. 2010. 11p.

HE, J.; MICHAEL, D.; DUKES, G.J.; HOCHMUTH, J.W.J.; WENDY D. GRAHAM, Identifying Irrigation and Nitrogen Best Management Practices for Sweet Corn Production on Sandy Soils Using CERES-Maize Model . Agricultural Water Management, Amsterdan, v.109, p.61–70, 2012.

HEATON, E.A; DOHLEMAN, F.G.; LONG, S.P. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. Global Changing Biology, Amsterdan, v. 14, 15 p. 2008.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; SILVA, S.C. Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agronômica. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 26p.

HORRIDGE, H.; MADDEN, C.; WITTWER, J. The impact of the 2002-2003 drought on Australia. Journal of Policy Modeling, New York, v. 27, n. 3, p.285-308, 2005.

HOWDEN, S.M.; SOUSSANA, J.F.; TUBIELLO, F.N.; CHHETRI, N.; DUNLOP, M.; MEINKE, H. Adapting agriculture to climate change. Proceedings of National American of Science, London, v.104, p. 19691–19696, 2007.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Dados de produtividade média da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: 10 ago. 2011.

INMAM-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interseptation of sugarcane. Field Crops Research, London, v.36, p. 41-51, 1994.

INMAN-BABER, 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., 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.

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 Soil, Pretoria, v.8, p.93–99, 1991.

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: IBSNAT, University of Hawaii, 1997.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane response to water deficits. Field Crops Research, London, v.92, pp.185-202, 2005.

INTERNACIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. 1979. Farm-Level Constraints to High Rice Yields in Asia: 1974–1977. Los Baños, Laguna, Phillipinas: Int. Rice Res. Inst. 422p. http://books.irri.org/9711040387 content.pdf

IRVINE, J.E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugarcane yield. Crop Science, London, v. 15, p. 671–676, 1975.

ISSCT Sugarcane Breeders Newsletter, v.3, p. 23, 1958.

IVO, W.M.P.M.; SILVA, W.C.; SANTIAGO, A.D.; SILVA, P.A. Produção de raízes de cana-de-açúcar, variedade RB83594, submetida à colheita de cana crua e queimada. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, ÁREA AGRÍCOLA – FITOTECNIA E FISIOLOGIA, 9, 2008.Maceió. Proceedings... Maceió,2008. p. 675-680.

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

JANZEN, H.; CAMPBELL, C.; IZAURRALDE, R.; ELLERT, B.; JUMA, N., MCGILL, W.; ZENTNER, R. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. Soil and Tillage Research, Dordrecht, v. 47, p.181–195, 1998.

JARVIS, P.G.; MCNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. Advances in Ecological Research, Dordrecht, v.15, p.49, 1986.

JESWIET The development of selection and breeding of sdugarcane in Java. Proceedings of International Society Sugar Cane Technology, London, v. 3, p.44-57, 1929.

JOHNSON, M.G.; KERN, J.S. Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. Soil Science Society of America Journal, London, v. 57, p. 200–210, 1993.

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

JONES, C.A.; BLAND, W.L.; RITCHIE, J.T.; WILLIAMS, J.R. 1991. Simulation of root growth. In: HANKS, R.J.; RITCHIE, J.T.(Ed.). Modeling plant and soil systems. Madison, ASA-CSSA-SSSA, 1991. p. 91-123. (Agronomy Monographs, 31).

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

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, MI: 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.

JONES, J.W.; KEATING, B.A.; PORTER, C. Approaches for modular model development. Agricultural System, Dordrecht, v.70, p. 421-444, 2001.

JONES, M.; PORTER, C.; JONES, J.W. ; HOOGENBOOM, G. ;SINGELS, A. ;SHINE, J.; NAYAMUTH, R. ; KINGSTON, G. ; CHINORUMBA, S. ; VAN DEN BERG, M. Incorporating the DSSAT/CANEGRO sugarcane model into the DSSAT V4 crop modelling system. Proceeding International Society Sugar Cane Technology, Dordrecht, v. 26, p. 438 – 443, 2007.

JONES, M.; SINGELS, A. DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO Sugarcane Plant Module. User Documentation. International Consortium for sugarcane Modelling. South African Sugarcane Research Institute, Mount Edgecombe, South Africa, 2008. 57p.

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy, London, v.18, p.267–288, 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 Agronomy, London, v. 18, p. 267-288, 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.

KENDY, E.; GÉRARD-MARCHANT, P.; TODD WALTER, M. ZHANG, Y.; LIU, C.; STEENHUIS, T.S. A Soil-water-balance Approach to Quantify Groundwater Recharge from Irrigated Cropland in the North China Plain. Hydrological Processes, London, v.17, p. 2011–2031, 2003.http://dx.doi.org/10.1002/hyp.1240.

KIMBALL, B.A.; BERNACCHI, C.J. Evapotranspiration, Canopy Temperature, and Plant Water Relations in Managed Ecosystems and CO2, ed. by Prof Dr Josef Nösberger, Prof Dr Stephen P. Long, Prof Dr Richard J. Norby, Prof Dr Mark Stitt, Prof Dr George R. Hendrey, and Dr Herbert Blum, Ecological Studies, 187 (Springer Berlin Heidelberg, 2006), pp. 311–324 <http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-31237-4_17> [accessed 14 March 2014].

KLADIVKO, J.E.; KEENEY, D.R. Soil nitrogen mineralization as affected by water and temperature interaction. Biology Fertilizer Soils, Dordrecht, v. 5, p. 248-252, 1987.

KNOX J.W.; RODRÍGUEZ DÍAZ, J.A.; NIXON, D.J.; MKHWANAZI, M. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. Agricultural Systems, Dordreecht, v.103, v.2, p. 63–72, 2010.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. Field Crops Research, London, v. 114, p.45-78, 2009.

LANDELL, M.G.A.; MACHADO, R.S.; SILVA, D.N.; SCARPARI, M S.; XAVIER, M.A.; CRESTE, S.; ANJOS, I.A.; PRADO, H.; PINTO, L.R.; BIDÓIA, M.A.P. A interação da cana-de-açúcar e os ambientes de produção estressantes. In: CRUSCIOL, C. A. C. Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 43-48.

LARCHER, W. Ecofisiologia Vegetal. São Carlos: RIMA, 2000. 531p.

LEAKEY, A.D.B Rising Atmospheric Carbon Dioxide Concentration and the Future of C4 Crops for Food and Fuel. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, v.276 p.2333, 2009.

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,Amsterdan, v. 140,p. 779, 2006.

LEGATES, D.R.; WILLMOTT, C.J. Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation. International Journal of Climatology, London, v.10, p.111–127, 1990. http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370100202.

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

LICKER, R.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J.A. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the yield gap of croplands around the world? Global Ecology and Biogeography, Amsterdan, v. 19, p. 769–782, 2010.

LINEU, C. Species plantarum: exhibentes plantas rite cognitas, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas. Holmiae: Impensis Laurentii Salvii, 1753. v. 1. p. 54.

LISSON, 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. WORKSHOP PROCEEDING, UNIVERSITY OF QUEENSLAND, 1995. St. Lucia, Brisbane. Proceedings… St. Lucia, Brisbane, 1995. p.25–29.

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

LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD, C.B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. Annual Review of Environment and Resources, Amsterdan, v.34, p.179–204, 2009.

LONG, S. P.; ZHU, X.-G.; NAIDU, S. L.; ORT, D. R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? Plant, Cell & Environment, London, p.315-330, 2006.

LOPEZ-HERNANDEZ, J.A. The quality of flowering cane. Sugar Azucar, London, v.60, p.41-42, 1965.

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

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 44, p.1575–1582, 2009.

MAHERALI, H.; REID, C.D.; POLLEY, H.W.; JOHNSON, H.B.; JACKSON, R.B. Stomatal Acclimation over a Subambient to Elevated CO2 Gradient in a C3/C4 Grassland , Plant, Cell & Environment, Amsterdan, v. 25, 557–566, 2002.

MANGELSDORF, 1958. Mangelsdorf, A.J. Physiology of sucrose formation, transport, and storage Manzato, C., E. D Assad, J.F.M. Bacca, M.J. Zaroni;S.E.M. Pereira. Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açucar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

MANZATO, C., ASSAD, E.D., BACCA, J.F.M., ZARONI, M.J., PEREIRA, S.E.M., 2009. Zoneamento agroecológico da cana-de-açucar. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

MARCHIORI JUNIOR, M.; MELO, W.J. de. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. Pesquisa agropecuária Brasileira, Brasília, v. 35, n. 6, p.123-168,2000.

MARCHIORI, P.E.R. Variação da fotossíntese no dossel de variedades de cana-de-açúcar. 2010. 178p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2010.

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.; 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.; CARVALHO, G.L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasilia, v. 47, p.149–156, 2012.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 43, p.1449–1455, 2008.

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.R., RIBEIRO, R.V., MARCHIORI, P.E.R. 2014. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. Theorethical and Experimental Plant Physiology. p. 1–15. doi:10.1007/s40626-014-0006-2

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.E valuation 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. Anais... São Paulo, 2013.

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 1–10. doi:10.1007/s12355-013-0265-2.

MARTINÉ, J.F. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. 2003. 131p. Applications du modèle. (PhD Thesis) - Institut national agronomique, Paris, 2003.

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.

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T.; COSTA, A.A.; ROSA, F.V. Efeito residual das leguminosas sobre o rendimento físico e econômico da cana-planta. Campinas: IAC, 1994. 15 p. (Boletim científico IAC, 32).

MCCOWN, R.L.; WILLIAMS, J.; AUSIM: A cropping system model for operational research. BIENNIAL CONFERENCE ON MODEL LING AND SIMULATION CANBERRA, 1989 Proceedings… SSA IMACS: Australian National University, 25-27, 1989.

MCCOWN, R.L. Systems modeling. Disponível em: < http://www.bob-mccown.com/?page_id=676>. Acesso em: 10 abr. 2012.

MCCOWN, R.L.; HAMMER, G.L.; HARGREAVES, J.N.G.; HOLZWORTH, D.; HUTH, M.I. APSIM: an agricultural production system simulation model for operational research. Mathematics and Computaters in Simulation, 39 1995. p. 225-231.

MCCREE, K.J. Carbon balance as a function of plant size in sorghum plants. Crop Science, Madison, v.23, p.1173–1177, 1983.

MCCREE, K.J. Sensitivity of sorghum grain yield to ontogenetic changes in respiration coefficients. Crop Science, Madison, v. 28, p.114–120, 1988.

MCMASTER, G.S.; WILHELM, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdan, v. 87, p.291–300, 1997.

MEEHL, G.A. The WCRP CMIP3 multimodel ensemble – A new era in climate change research. Bulletin of the American Meteorological Society, Amsterdan, v. 88, p.1383-1394, 2007.

MILLER, J.D.; GILBERT, R.A. Sugarcane Botany: A Brief View. University of Florida IFAS extension. Disponível em: <http: //edis.ifas.ufl.edu/SC034>. Acesso em: 06 dez.2011.

MIRANDA, C.C.; CANELLAS, L.P.; TRINDADE NASCIMENTO, M. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. Revista Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, v. 31, n. 5, p.278-299, 2007.

MONTEITH, J.L.; MOSS, C.J. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain [and Discussion] , Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, London, v. , p.277–294, 1977. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.1977.0140.

MOORE, P.H. Sugarcane Biology, Yield and Potential for Improvement. In: BIOEN WORKSHOP ON SUGARCANE IMPROVEMENT.2009. São Paulo.Proceedings… São Paulo: FAPESP, 2009.

MOORE, P.H. Temporal and Spatial Regulation of Sucrose Accumulation in the Sugarcane Stem, Functional Plant Biology, Amsterdan, v. 22 , p.661–679, 1995.

MORGAN, J.A.; DANIEL, R.; PENDALL, E.; DANA, M.; BLUMENTHAL, BRUCE, ; 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.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. Atualização em produção de cana-de-açúcar, Atualização em produção de Cana-de-Açúcar. Piracicaba: - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz , Universidade de São Paulo, 2006. p.11-18.

MUCHOW, R.C.C.I.; EVENSEN, R.V.; OSGOOD, M.J.; ROBERTSON, M.J. Yield accumulation in irrigated sugarcane: II. Utilization of intercepted radiation. Agronomy Journal, London, v. 89, n 4 646, 1997.

MUCHOW, R.C.; Spillman, M.F.; Wood, A.W.; Thomas, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. Australian Journal of Agricultural Research, Amsterdan, v. 45, n 1, p.37–50, 1994.

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, Brasilia, v.41, p.759–778, 2012.

NASCIMENTO, F.N. do; OLIVEIRA NETO, 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 7. 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 Ciências – Física do Ambiente) - Escola Superior de Agricultura – Universidade de São Paulo, 2010.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; COSTA, L.G. Evapotranspiration and Transpiration Coupling to the Atmosphere of Sugarcane in Southern Brazil: Scaling Up from Leaf to Field. Sugar Tech 1–5. 2013.

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.

NEVES, M.F.; TROMBIN, V.G.; CONSOLI, M. Mapeamento e quantificação do setor sucroenergético 2008. Ribeirão Preto: MARKESTRAT/ FUNDACE/ UNICA, 2009.

NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J. Residual fertilizer nitrogen as influenced by timing and nitrogen forms in a silty clay soil under sugarcane Mauritius. Fertilizer Research, Amsterdam, v.14, p.219-226, 1987.

O 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.

O LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models in their prediction of sucrose yield. Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass., 1999, p. 73.

OLIVEIRA, E. Fecha a 1ª Usina Vítima Da Quebra Da Safra de Cana , Folha de São Paulo (São Paulo, 2012), section Mercado <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/mercado/24459-fecha-a-1-usina-vitima-da-quebra-da-safra-de-cana.shtml> [accesso 26 Mar. 2014]

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. (Dissertação de Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; DOURADO-NETO, D.; TRIVELIN, P.C.O.; TOMINAGA, T.T.; NAVARRO, R. DE C.; PICCOLO, M. DE C.; CÁSSARO, F.A.M. Nitrogen dynamics in a soil-sugar cane system. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 57, p. 467–472, 2000.

OMETTO, J.C. Uma equacao para a estimativa de evapotr. Potencial. Sua aplicacao no calculo das necessidades hidricas e do rendimento agro-industrial da cana-de-acucar na regiao de Piracicaba (SP), 1974. 129p. (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

ORLANDO FILHO, J. Nutrição e Adubação da Cana-de-Açúcar. IAA/PLANALSUCAR. Superintendência Geral, Piracicaba, 1983. 369p.

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.

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.

Padbury, G.; Waltman, S;, Caprio, J.; Coen, G.; McGinn, S.; Mortensen, D.; Nielsen, G.; Sinclair, R. Agroecosystems and land resources of the northern Great Plains. Agronomy Journal, London, v. 94, p.251–261, 2002.

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 Cargil, 1987. v. 1, p. 56–87.

PARRIS, J.W. The Liberal. 12 Fev.1959.

PARTON, W.J.; LOGAN, J.A. A Model for Diurnal Variation in Soil and Air Temperature , Agricultural Meteorology,London, v.23, p.205–216, 1981.

PENMAN, H.L.; LONG, I.F. Weather in wheat : An essay in micrometeorology. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, London, v.86, p.16–50, 1960.

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, London, v.16, p.3786–3802, 2012.

PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. Agricultural and Forest Meteorology, London, v.97, p.141–150, 1999.

PINTO, H.M.S.; MARIN, F.R. Efeito das mudanças climáticas para cana-de-açúcar com base no modelo APSIM/Sugarcane. Resumo. Mostra de Estagiários da Embrapa Informática Agropecuária. Embrapa. Campinas:Brasilia. 2013. p. 195-198.

PRESS, WILLIAM H.; SAUL A. TEUKOLSKY, WILLIAM T. VETTERLING, BRIAN P. FLANNERY (1992). 2nd ed. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press. 994p. ISBN 0-521-43108-5

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters, Monthly weather review, 100, 1972. p.81–92.

PRIMAVESI, A. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo:Ed. Nobel, 1979. 245p.

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.

RABBINGE, R. The ecological background of food production. In: CHADWICK, D.J.; MARSH, J. (Ed.). Crop Protection and Sustainable Agriculture. Ciba Foundation Symposium, v. 177. Chicester: John & Wiley,1993. p. 2–29.

RAE, A.L.; GROF, C.P.L.; CASU, R.E.; BONNET, G.D. sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation. Field Crop Research, Amsterdam, v.92, p.159-168, 2005.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane variedades. Journal of Agronomy and Crop Science, London, n. 4, v.185, p. 249-258, 2000.

RAMIREZ-VILLEGAS, J.; CHALLINOR, A.J. Assessing Relevant Climate Data for Agricultural Applications. Agricultural and Forest Meteorology, London, v.121, p.26-45, 2012.

RATTO, M.; TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. Sensitivity Analysis in Model Calibration: GSA-GLUE Approach, Computer Physics Communications, London, v.136 p.212–224, 2001. http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4655(01)00159-X.

REGO, A.J. A routine to find product of two matrices. Disponível em https://github.com/ashwith/workspace/blob/master/fortran/matrixmultiply.f90. Acesso em: 5 Mar. 2014.

REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J. Horizontal infiltration into layered soils. Proc. of Soil Sci. of America, Madison, v. 36, n.6, p. 858-863, 1972.

RICHARDSON, C.W.; WRIGHT, D.A. WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables . ARS, v.8, p.83, 1984.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Ed.). Understanding options for agricultural production. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1998. p. 41-53.

ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C. Growth of Sugarcane under High Input Conditions in Tropical Australia. I. Radiation Use, Biomass Accumulation and Partitioning, Field Crops Research, London v.48 ,p.11–25, 1996.

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, p. 819-828, 1998.

RODRIGUES, J.D. Fisiologia da Cana-de-açúcar. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, Instituto de Biociências, Campus Botucatu, 1995. 101p.

ROGERS, H.H.; THOMAS, J.F. ; BINGHAM, G.E Response of Agronomic and Forest Species to Elevated Atmospheric Carbon Dioxide . Science, London, v.220, p.428, 2012.

ROMANOWICZ, R.J.; BEVEN, K.J. Comments on Generalised Likelihood Uncertainty Estimation. Reliability Engineering & System Safety, Barking, v.91, p.1315–1321, 2006.

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, 170, 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, 2013. p.1-6. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222463110.

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

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, Amsterdan, v. 133, p.23–36, 2012.

SANTOS, A.C.A.S. Avaliação de genótipos de cana-de-açúcar para as condições edafoclimáticas de Aparecida do Taboado. 2002. 189p. (MS. Master Thesis) Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquitas Filho Ilha Solteira, 2002.

SANTOS, D.L.; SENTELHAS, P.C. Climate Change Scenarios and Their Impact on Water Balance and Sugarcane Yield in Southern Brazil. Sugar Tech 1–10. 2013. DOI 10.1007/s12355-013-0293-y.

SANTOS, M.A.L. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): um modelo de análise de decisão para o estado de Alagoas. 2005.

SCARPARE, F.V.; JONG VAN LIER, Q.; RUIZ-CORREA, S.T.; BARROS, A.H.C.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P. Modelos de crescimento da cana-de-acúcar e sua parametrização. Revista de Agricultura, Piracicaba, v. 87, p. 66-80, 2012.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 882p.

SCARPARI, M.S. PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado. 2005. 120p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SECEX. Exportações de Etanol e Açúcar do Brasil em 2010. Principais Destinos. São Paulo, 2010.

SEMENOV, M.A.; STRATONOVITCH, P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. Climate research (Open Access for articles 4 anoss old and older) 41, 1. 2010.

SHIKIDA, P.F.A., AZEVEDO, P.F. DE, VIAN, C.E. DE F. Desafios da agroindústria canavieira no Brasil pós-desregulamentação: uma análise das capacidades tecnológicas. Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília, v.49, p.599–628, 2011.

SILVA, A.S.; SANTOS, C.M.; ARANTES, M.T.; PINCELLI, R.P. Fenologia da cana-de-açúcar. p.8-21. 2010. In: In: CRUSCIOL, C. A. C. Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 43-48.

SILVA, D. K. T.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no noroeste do paraná na safra de 2002/2003. Scientia Agrária, Piracicaba, v. 6, p.47–53, 2005.

SILVA, L.C.F.; CASAGRANDE J.C. Nutrição Mineral da Cana-de-Açúcar: Macronutrientes. In: ORLANDO FILHO, J. Nutrição e Adubação da Cana-de-Açúcar. IAA/PLANALSUCAR. Superintendência Geral, Piracicaba, 1983. 369p.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. Agronomy Journal, Madison, v.88,p. 698–704, 1996.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE, J.R.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. Field Crops Research, Madison, v.88, p. 171-178, 2004.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A New Method of Simulating Dry Matter Partitioning in the Canegro Sugarcane Model. Field Crops Research, Amsterdan, v.78 151–164, 2002. http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00118-1.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. Field Crops Research, Amsterdan, v.92, p.291–303, 2005.

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 1–9, 2013. doi:10.1007/s12355-013-0274-1.

SINGELS, A.; JONES, M.; THORBURN, P.J.; OLIVIER, F.C.; MARIN, F.R. Improving the Suitability of the DSSAT Canegro Model for Simulating Sugarcane Responses to Climate Change. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. 2014. Tampa, Florida. Proceedings… Tampa, 2014. 345p.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. DSSAT v4. 5-Canegro Sugarcane Plant Module. SASRI, 2008.

SINGELS, A.; KENNEDY, A.J.; BEZUIDENHOUT, C.N. Irricane: A simple computerised irrigation scheduling method for sugarcane. Proceeding of South African Sugar Technology Association. p. 117–122, 998.

SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. The effect of crop start date, crop class and variedade on sugar cane canopy development and radiation interception. Field Crops Research, Amsterdan, v.92, p.249-260, 2005.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO Sugarcane Plant Module. Scientific Documentation. International Consortium for sugarcane Modelling, South African Sugarcane Research Institute, Mount Edgecombe, South Africa, 2008. 34p.

SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. Biotecnologia do solo: Fundamentos e perspectivas. Brasília, MEC; ABEAS; ESAL; FAEPE, 1988. 236p.

SMITH, J.H.; DOUGLAS, C.L. Wheat straw decomposition in the field. Soil Science Society. American Proceeding, Madison, v. 35, p. 269-272, 1971.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. Field Crops Research, Amsterdan, v.98, p.97-260, 2006.

SOARES, H.M.P.; MARIN, F.R. Projeções futuras de produtividade de cana-de-açúcar no brasil baseadas em cenários de mudanças climáticas. 2013. 213p. (Trabalho de conclusão de curso). Pontifícia Universidade Católica, Campinas, 2013.

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.

STANHILL, G. A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. Journal of Applied Meteorology, Boston, v. 8, 509–513, 1969.

STEHLE, H. The principal agronomic aspects of the flowering of sugar cane: growth, methods of cultivation, maturity, deterioration, after arrowing, upper point of cutting. Proceedings of the meeting of British West Indies Sugar Technologists held at the Marine Hotel, Barbados under the auspices of the British West Indies Sugar Association, November/ 1955. p. 49-58.

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, v.66, p.50–53, 1992.

STEVENSON, G. Cross Genetics and Breeding of Sugar Cane. , Genetics and breeding of sugarcane. 1965 <http://www.cabdirect.org/abstracts/19661601262.html> [accesso em 14 Mar. 2014]

STOLF, R.; THURLER, A.M.; BACCHI, O.S.B.; REICHARDT, K. Method to Estimate Soil Macroporosity and Microporosity Based on Sand Content and Bulk Density. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.35, p. 447–459, 2011.

SUBEDI, M.; FULLEN, M.A. Temporal Changes in Soil Temperature at the Hilton Experimental Site, Shropshire, UK (1982–2006): Evidence of a Warming Trend? Archives of Agronomy and Soil Science, v. 55, p. 105–113, 2009. http://dx.doi.org/10.1080/03650340802343159.

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

SZMRECSÁNYI, T.; MOREIRA, E.P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira no Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. Estudos Avançados, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 57-79, 1991.

TASSO Jr., L.C. Agrotechnology characterization of sugarcane cultivars (Saccharum spp.) in central-north region of State of São Paulo, 2007.141p. [Abstract in English].(PhD Dissertation in Plant Production) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho , Jaboticabal, 2007.

TAUSSKY, O.; TODD, J. Cholesky, Toeplitz and the triangular factorization of symmetric matrices. Numerical Algorithms, Basel, v.41, p.197–202, 2006.

TEH, C. Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth: How the Equations Are Derived and Assembled into a Computer Model. Boca Raton: Brown Walker Press, 2006. 345p.

TERAUCHI, T.; MATSUOKA, M. Ideal characteristics for the early growth of sugarcane. Japanese Journal of Crop Science, Tokyo, v.69, p. 286–292, 2000.

THORBURN P.J.; PROBERT M.E.; ROBERTSON F.A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue. Field Crops Research, Amsterdan, v. 70, p. 223-232, 2001.

THORBURN, P.J.; HORAN, H.L.; BIGGS, J.S. Nitrogen Management Following Crop Residue Retention in Sugarcane Production 3rd. Super Soil, 2004.

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

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

THORBURN, P.J.; VAN ANTWERPEN, R.; MEYER, J.H.; BEZUIDENHOUT, C.N. The impact of trash management on soil carbon and nitrogen: I Modelling long-term experimental results in the South African sugar industry. Proceedings of South African Sugar Technology Association, 2002. p. 260–268.

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. 669p.

THORNTON, P.K., PETER G.J.; ALAGARSWAMY, G.; ANDRESEN, J. Spatial Variation of Crop Yield Response to Climate Change in East Africa. Global Environmental Change, Guildford, v. 19, p.54–65, 2009.

TILMAN, D.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, London, p. 418, 671–677, 2002.

TOEPLITZ, O. Die Jacobische Transformation der quadratischen Formen von unendlich vielen Vera¨nderlichen. Nachr. Akad. Wiss. Goettingen, Math.-Phys., v.2, p.101–110, 1907.

TOLBERT, N.E.; ZELITCH, I. Carbon Metabolism. In: American Association Advance Science. SYMPOSIUM. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RISING ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE AND PLANT PRODUCTIVITY, 1982. Athens.Anais...Athens, 1983. 1v.

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, Amsterdan,v. 64, p.327, 2000.

TRENBERTH, K.E.; JONES, P.D. AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN A.Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor and HL Miller. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

TRIVELIN, P.C.O. Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com uso do traçador 15N. 2000. 143p. (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FERREIRA, D.A.; VITTI, A.C.; FORTES, C. Impact of Sugarcane Trash on Fertilizer Requirements for São Paulo, Brazil. Scientia Agricola, Piracicaba, v.70, n.5, p. 345–352, 2013. http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162013000500009.

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIQUES, J.C. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e aplicado ao solo em complemento à vinhaça. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.30, n.12, p.1375-1385, 1995.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da ureia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). Understanding options for agricultural production. Norwell: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998. 325p.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. Setor Sucroenergético - Histórico. Disponível em: <http://www.unica.com.br/content/default.asp?cchCode={C2B8C535-736F-406B-BEB2-5D12B834EF59}>. Acesso em: 01 abril 2012.

UYS, L.; BOTHA, F.C HOFMEYR, J.H.S; ROHWER, J.M. Kinetic Model of Sucrose Accumulation in Maturing Sugarcane Culm Tissue. Phytochemistry, New York, v. 68, p.2375–2392, 2007.

VALE, D.W.; PRADO, R.M.; AVALHÃES, C.C.; HOJO, R.H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. Revista Brasileira Ciência Agrária, Recife, v.6, n.2, p.189-196, 2011.

VALE, D.W.; PRADO, R. de 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, AW. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. Soil and Tillage Research Amsterdan, v.38, p.115–132, 1996.

VAN DILLEWIJN, C. Botany of Sugarcane. Waltham, Mass: Chronica Botanica, 1952. 371p.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Amsterdan, v.44, p.892-898, 1980.

VAN ITTERSUM, M.K.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, ZYield gap analysis with local to global relevance–a review. Field Crop Research. 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009.

VAN ITTERSUM, M.K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. Field Crops Research, Amsterdan, v.52, p.197–208, 1997.

VAN KEULEN, H.; SELIGMAN, N.G. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Wageningen: Pudoc, 1987. 310p.

VAN LIER, Q.J.; METSELAAR, K.; VAN DAM, J.C. Root Water Extraction and Limiting Soil Hydraulic Conditions Estimated by Numerical Simulation. Vadose Zone Journal, Amsterdan, v.5, p.1264, 2006.

VAN OIJEN, M.; THOMSON, A.; EWERT, F. Spatial Upscaling of Process-Based Vegetation Models: An Overview of Common Methods and a Case-Study for the UK, StatGIS 2009 Proceedings, v.1 (2009). Disponível em: https://www.stat.aau.at/Tagungen/statgis/2009/. Acesso em: 12 mar. 2014.

VAN WART J,: VAN BUSSEL WOLF J, L.G.J. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field Crops Research, Amsterdan, v.143, p.44-55, 2013a.

VENKATARAMANA, S.; GURURAJA RAO, P.N.; NAIDU, K.M. The Effects of Water Stress during the Formative Phase on Stomatal Resistance and Leaf Water Potential and Its Relationship with Yield in Ten Sugarcane Varieties. Field Crops Research, Amsterdan, v.13, p. 345–353, 1986. HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/0378-4290(86)90035-3.

VERRET, J.A. the effect of heat on the germination of the sugarcane cuttings. Haw. Plant. Rec. v.31, p.112-115, 1927.

VIAN, C.E.; BELIK, W. Os desafios para a reestruturação do complexo agroindustrial canavieiro do Centro-Sul. Economia, São Paulo, v. 4, p.153–194, 2003.

VILEGAS, F.D.; DAZA, O.H.; JONES, J.W.; ROYCE, F.S. CASUPRO: an industry-driven sugarcane model. In: ASAE Annual International Meeting. Presented at the Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, Tampa. 2005.

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, Amsterdan, 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, Amsterdan, v.171, p. 123–131, 2006.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G.; MOORE, P.H.; SOUZA, G.M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose contet. Plant Biotechnology journal, Oxford, p. 263-276, 2010.

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, Amsterdan, n.4, v.93, p.757-766, 2001.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W. Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. 449p.

WEBSTER AJ, THORBURN, P.J. ROEBELING, P.C.; HORAN. H,L.; BIGGS, J.S. The expected impact of climate change on nitrogen losses from sugarcane to the Great Barrier Reef is small. Marine and Freshwater Research 60, 1159-1164. 2009.

WHITBREAD, AM; ROBERTSON, MJ; CARBERRY, PS; DIMES; JP (2010). How farming systems simulation can aid the development of more sustainable smallholder farming systems in southern Africa. European Journal Agronomy, Whasington 32, p. 51–58, 2010.

WHITE, J.W. Bringing Genetics and Genomics to Crop Simulations: Experiences with Wheat, Sorghum and Common Bean in Solving the GEM-to-P Problem. In Crop Modeling and Decision Support, organizado por Weixing Cao, Jeffrey W. White, e Enli Wang, 44–53. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

WIEDENFELD, R.P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. Agricultural Water Management, v.43, p.173-182, 2000.

WIEDENFELD. B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irri-gation and nitrogen in semiarid south texas. AgronomyJournal, v. 100, p. 665-671. 2008.

WILBY, R.L.; CHARLES, S.P. ZORITA, E. ;TIMBAL, B. ; WHETTON, P. ;MEARNS, L.O. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods, 2004 <http://www.narccap.ucar.edu/doc/tgica-guidance-2004.pdf> [accesso em 16 Mar. 2014].

WILLMOTT, C.J. On the Validation of Models. Physical Geography, v. 2, p.184–194, 1981.

WILLMOTT, C.J.; ACKLES, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDEMMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O´DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. Journal of Geophysical Research, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WING, I.S. 2004. Computable general equilibrium models and their use in economy-wide policy analysis. Technical Note of MIT Global Change 50.

WOOD, S.; PARDEY, P.G. Agroecological aspects of evaluating agricultural R and D. Agriculture System, Dordrecht, v. 57, p.13–41, 1998.

WRAY, L. The practical sugar planter; a complete account of the cultivation and manufacture of the sugar-cane, according to the latest and most improved process... London, 1848. 415p.

ZAFALON, M. 2013. Com terra mais disputada, futuro reserva carne mais cara ao Brasil -. Folha online B8. 5 jul.2013.

ZHOU, M.M.; SINGELS, A. ; SAVAGE, M.J. Physiological Parameters for Modelling Differences in Canopy Development between Sugarcane Cultivars, in Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 2003, lxxvii,p. 610–621. <http://www.sasta.co.za/wp-content/uploads/Proceedings/2000s/2003_zhou_PHYSIOLOGICAL%20PARAMETERS%20FOR%20MODELLING.pdf> [accessed 14 March 2014]

ZISKA, L.H.; BUNCE, J.A. Plant Responses to Rising Atmospheric Carbon Dioxide. Plant Growth and Climate Change, p. 17–47, 2006.

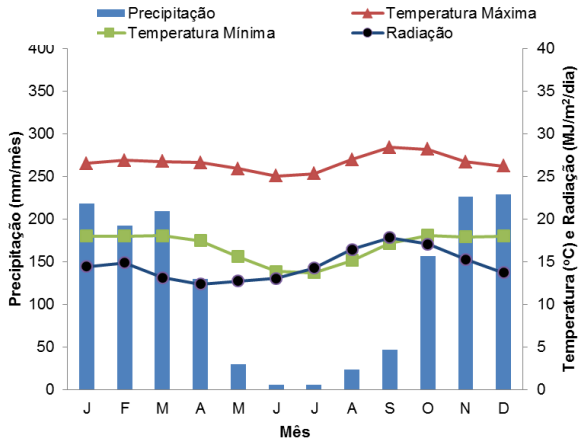
ZISKA, L.H.; BUNCE, J.A. Influence of Increasing Carbon Dioxide Concentration on the Photosynthetic and Growth Stimulation of Selected C 4 Crops and Weeds. Photosynthesis Research, v.54 p.199–208, 1997.

ANEXOS

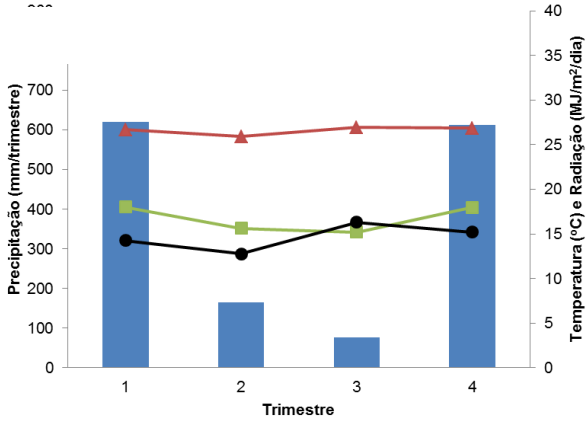
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA RESUMIDA DA SÉRIES HISTÓRICAS REFERENTE À LINHA DE BASE – CENÁRIO ATUAL

a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Brasília/DF.

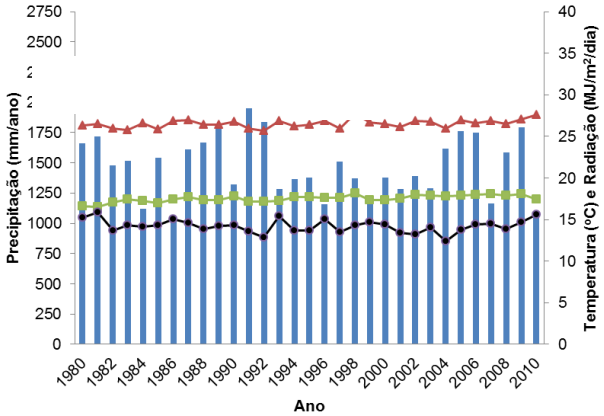
a)



b)

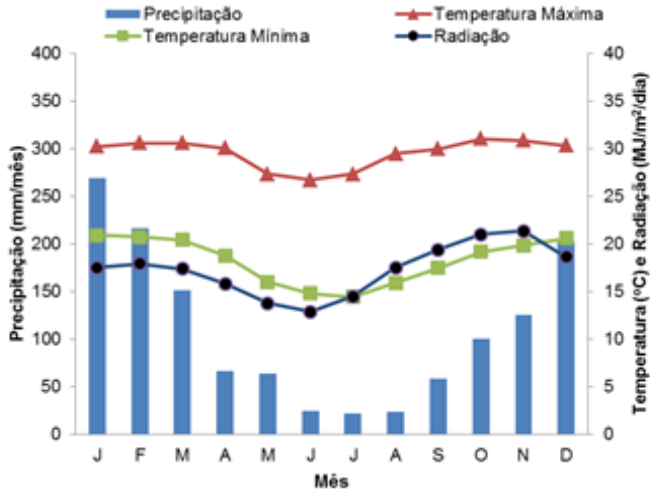


c)

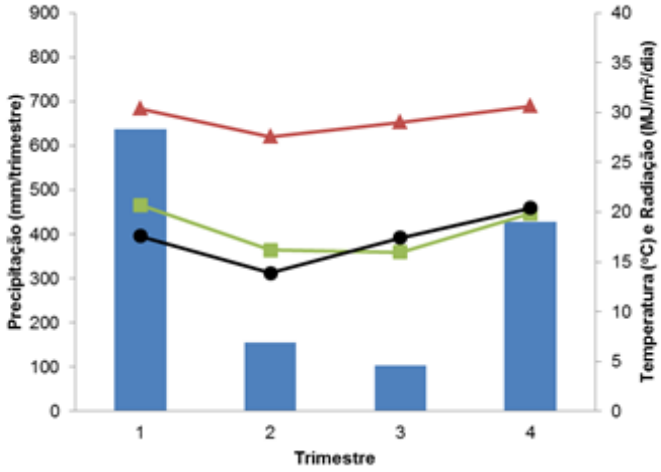


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínim Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Catanduva/SP.

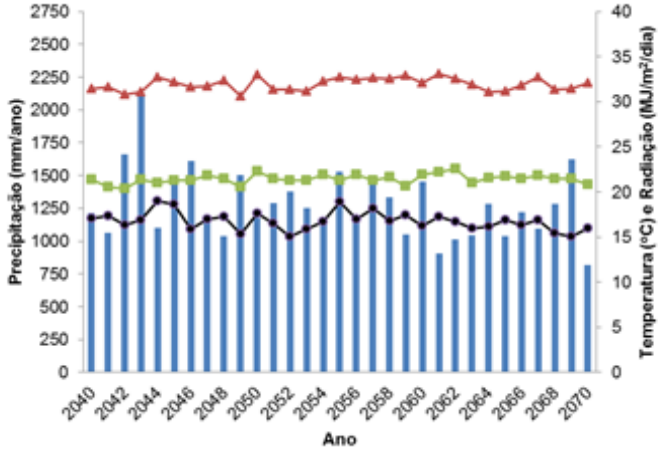
a)



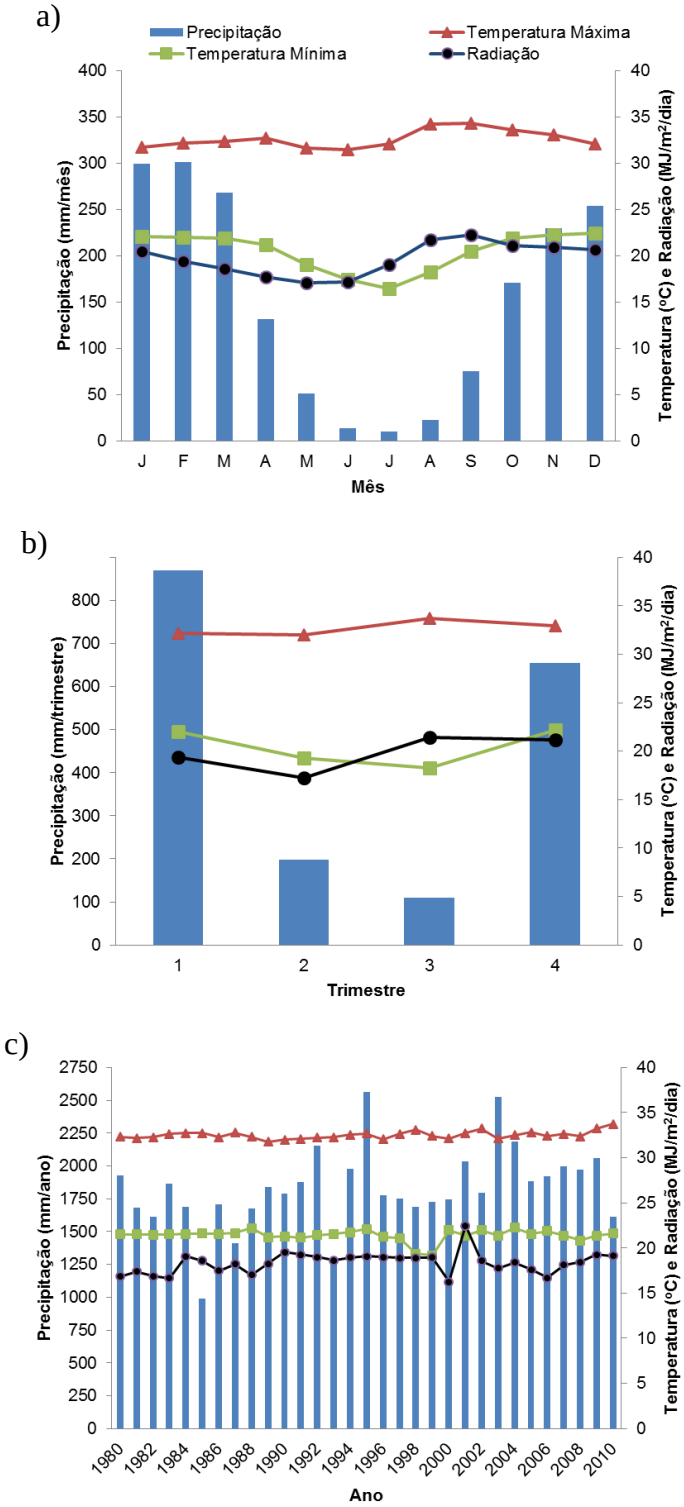
b)



c)

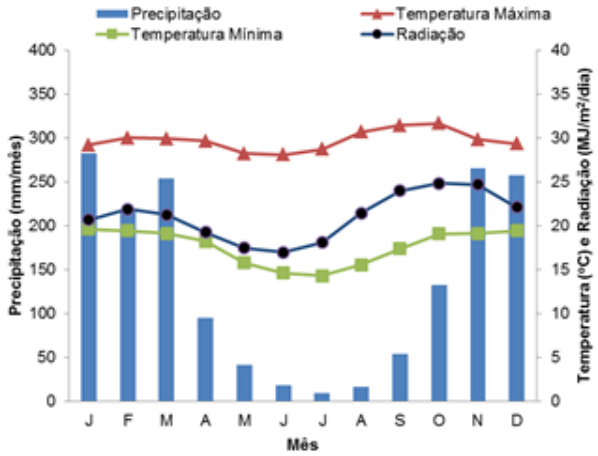


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Diamantino/MT.

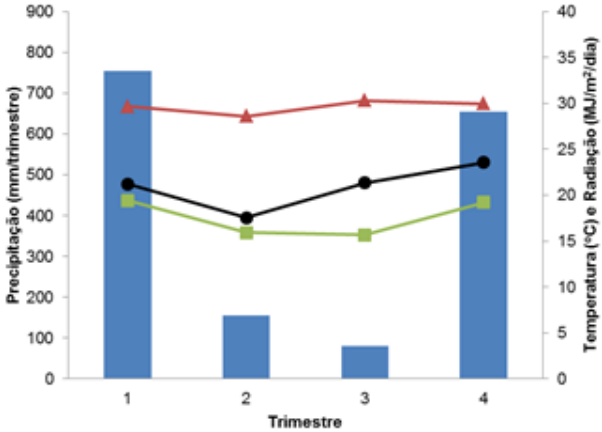


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Rio Verde/GO.

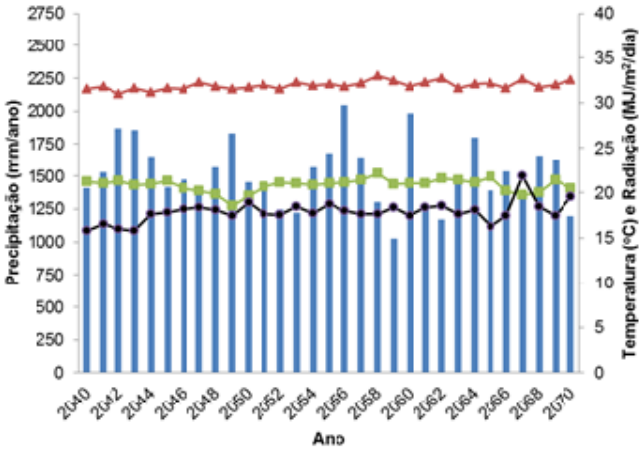
a)



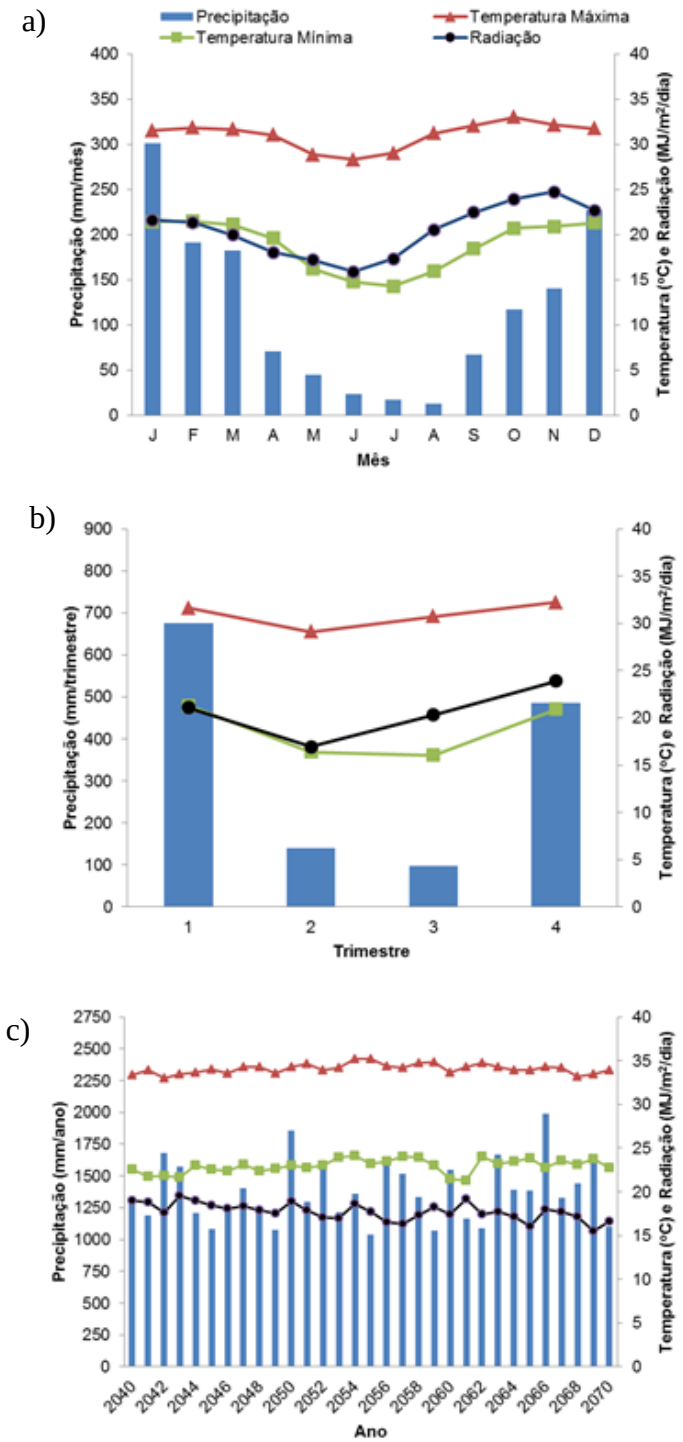
b)



c)

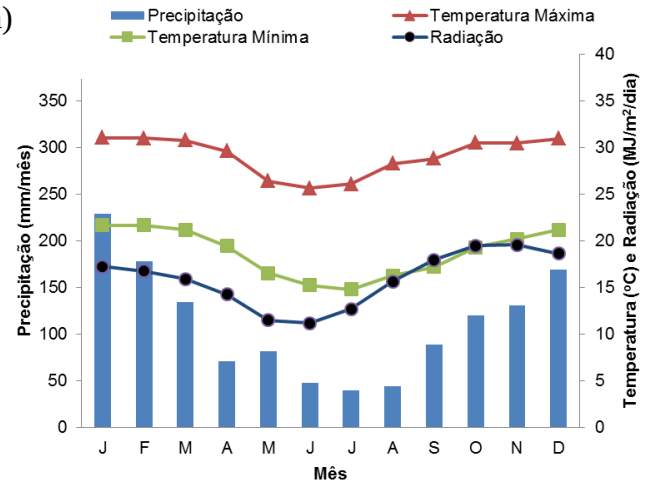


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Paranaíba/MS.

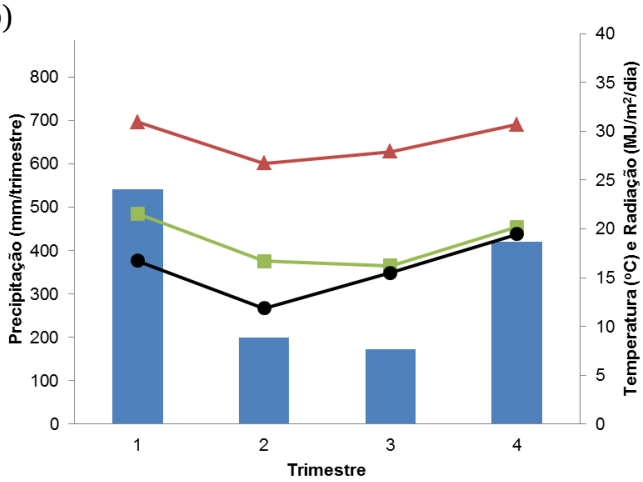


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Presidente Prudente/SP.

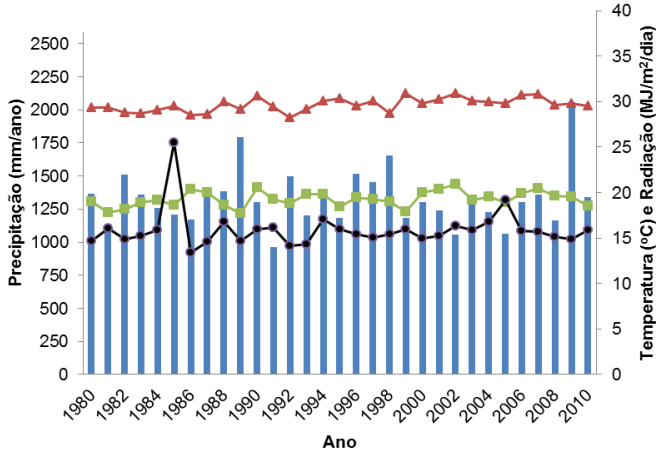
a)



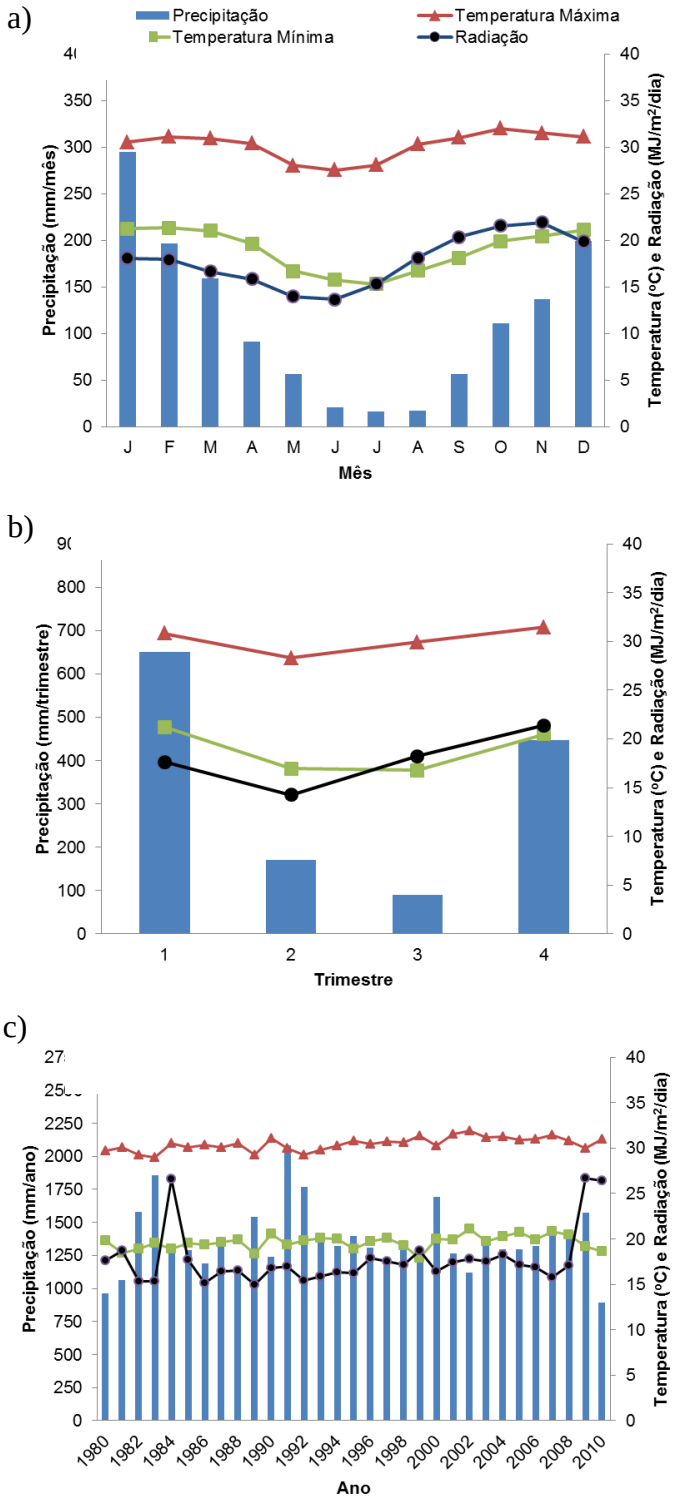
b)



c)

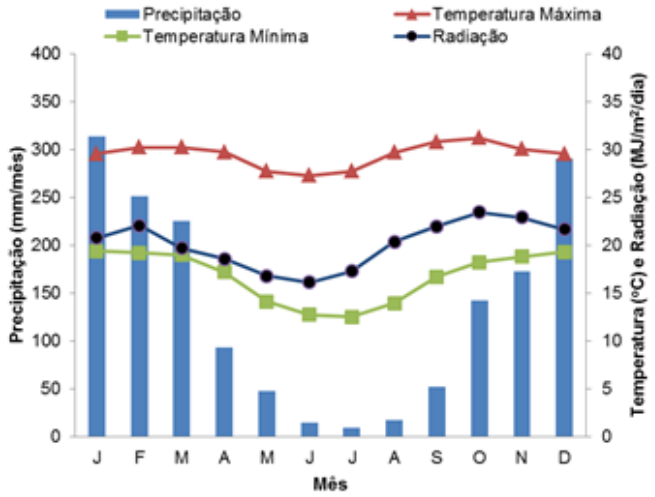


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Votuporanga/SP.

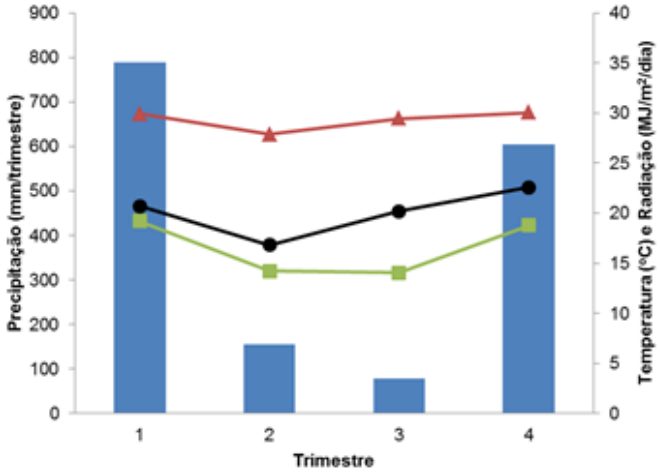


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Uberaba/MG.

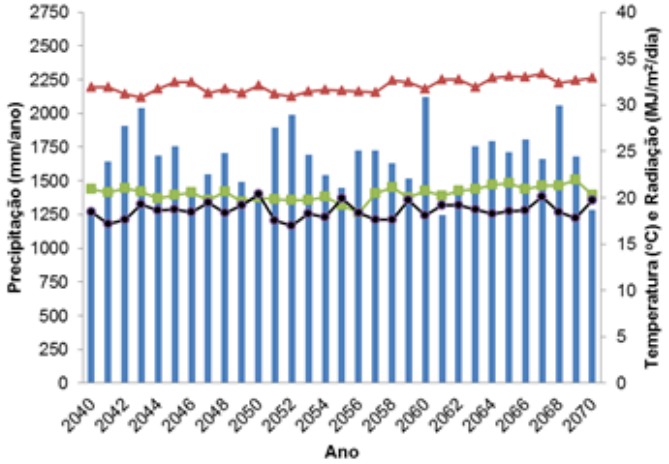
a)



b)

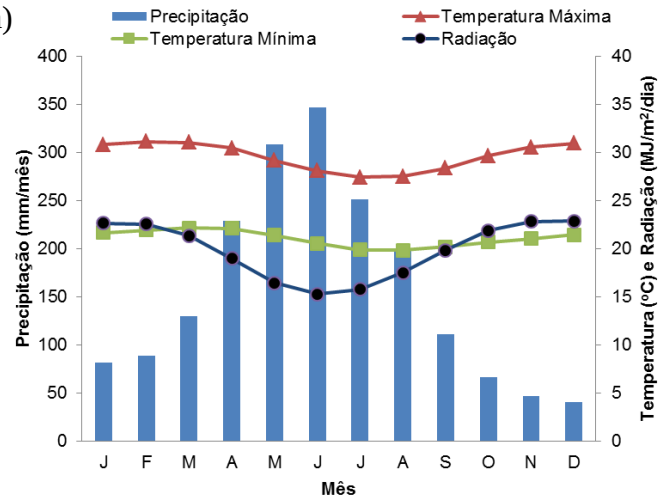


c)

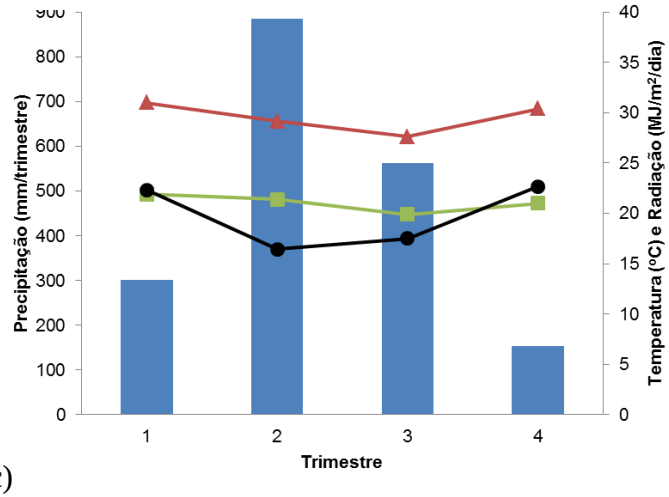


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série histórica de 1980 a 2010 para o município de Maceió/AL.

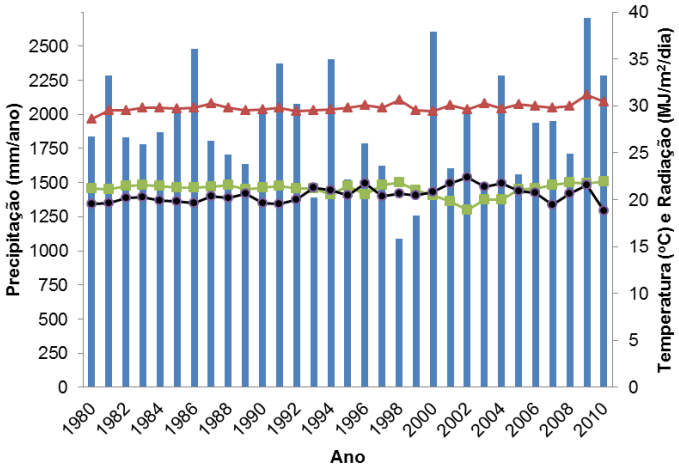
a)



b)



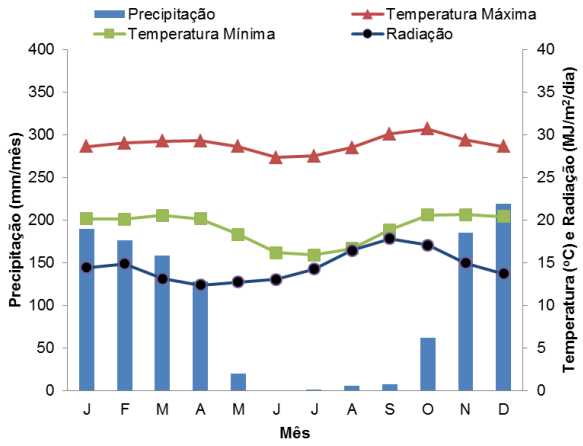
c)



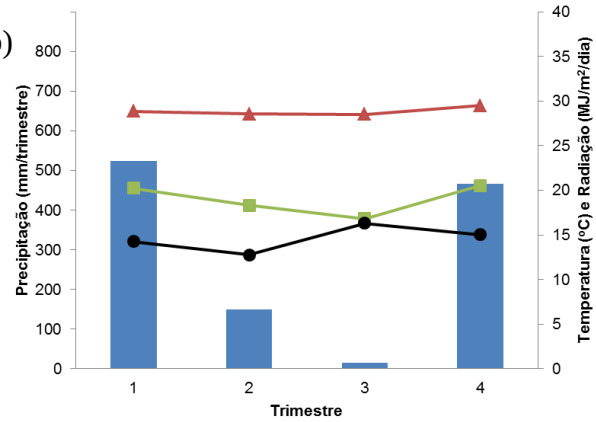
ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS DE NOVE LOCAIS NO BRASIL COM DADOS GERADOS POR TRÊS MODELOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL PARA O CENÁRIO DE EMISSÕES A2

a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município de Brasília/DF.

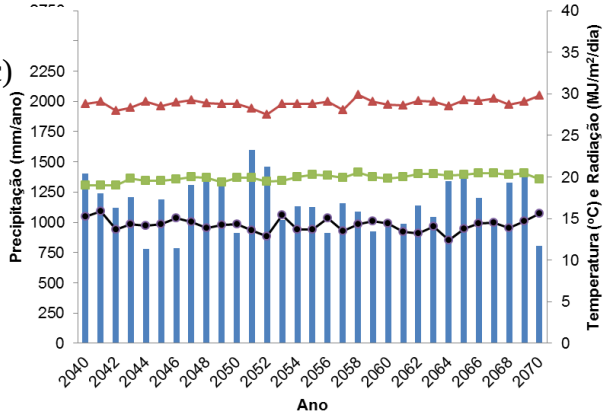
a)



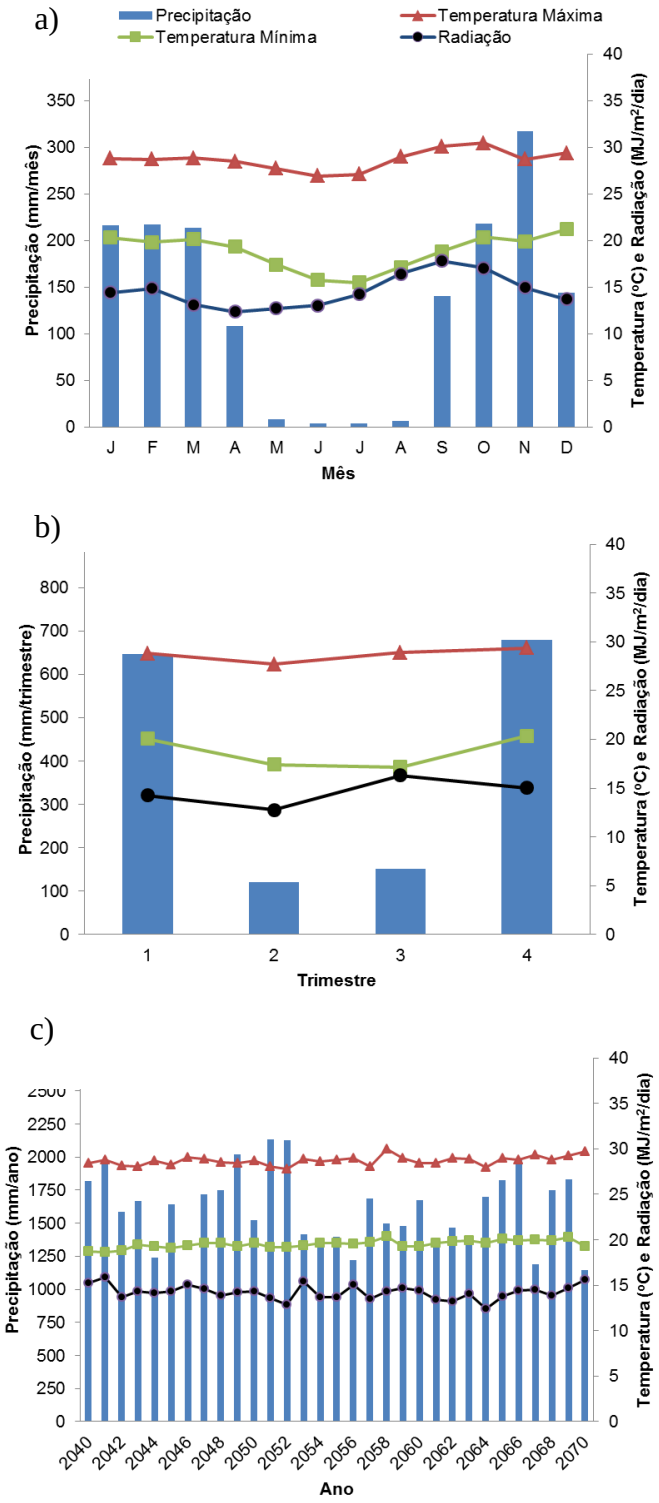
b)



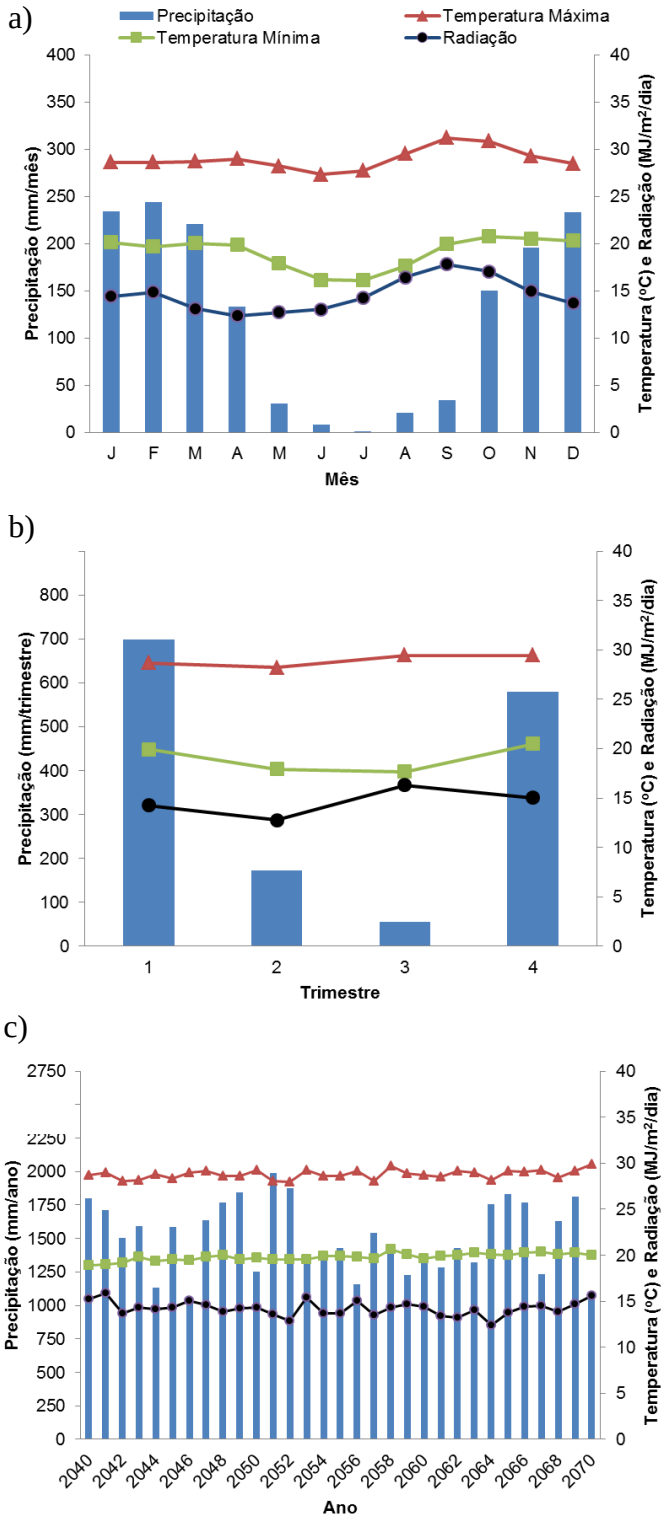
c)



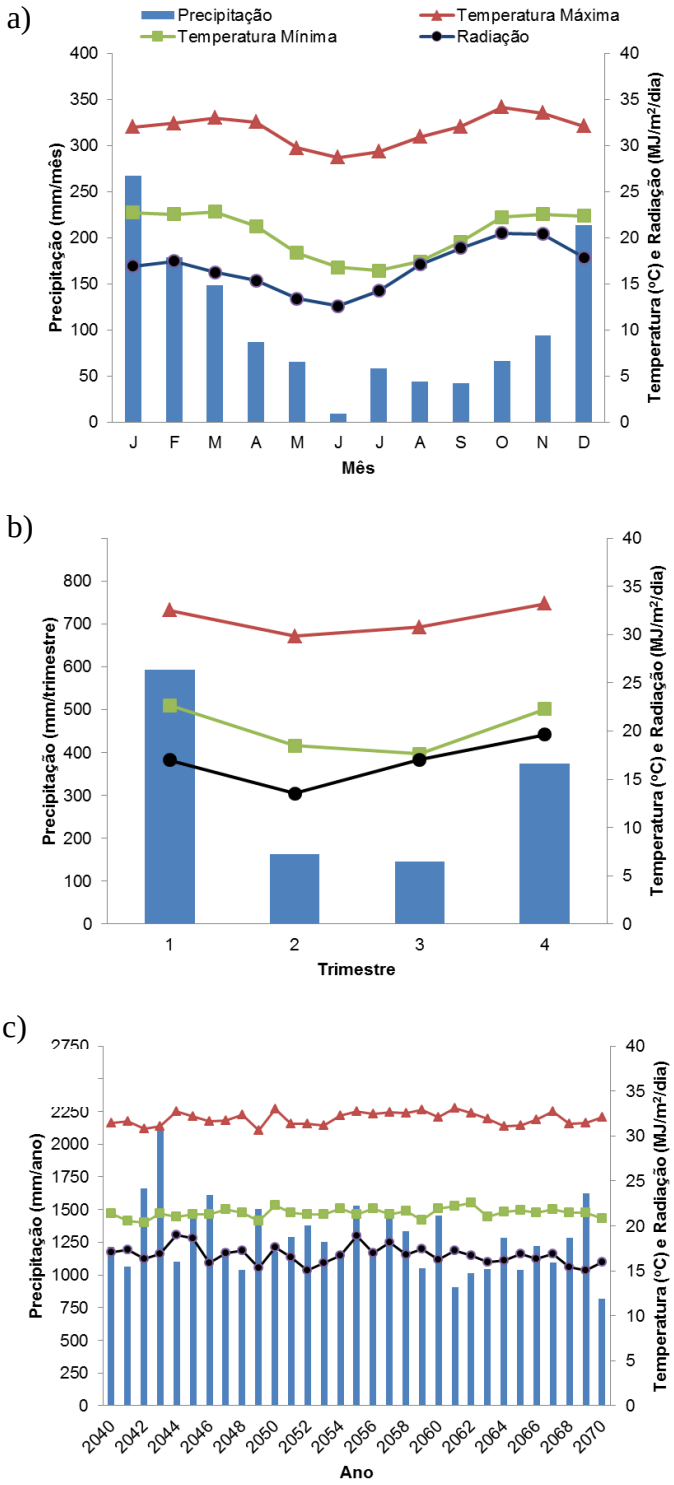
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município de Brasília/DF.



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município de Brasília/DF.

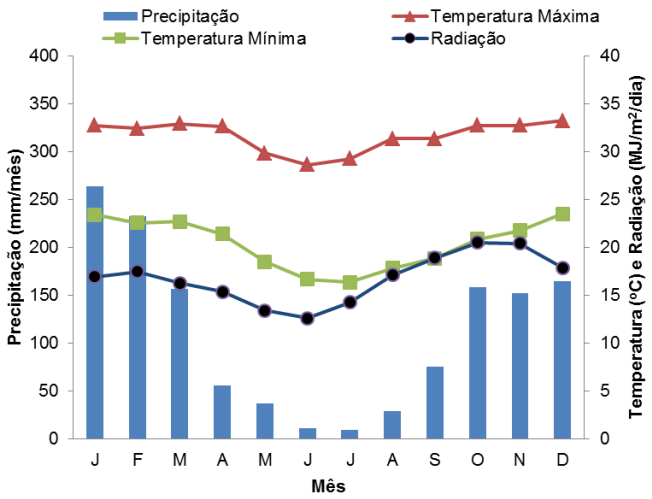


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município Catanduva/SP.

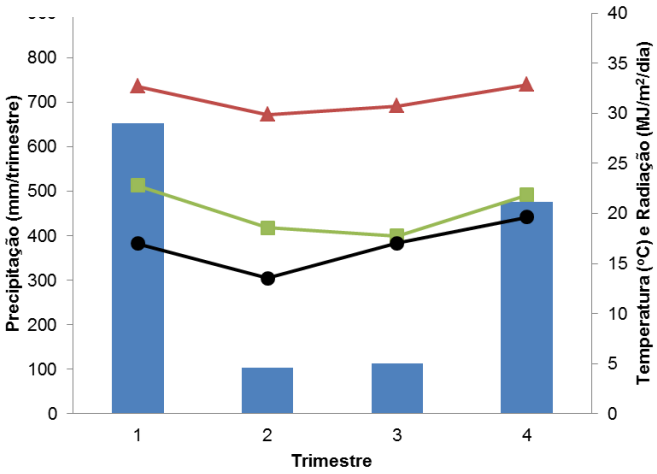


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município Catanduva/SP.

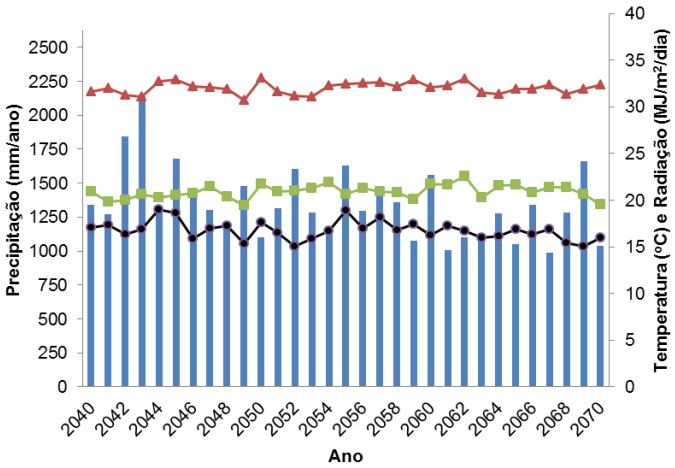
a)



b)

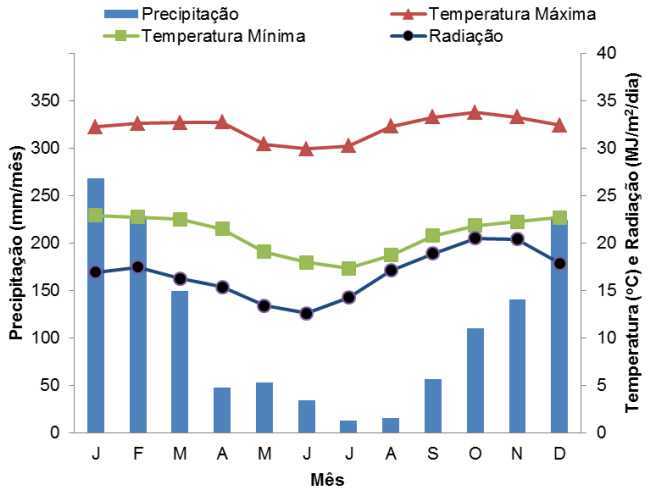


c)

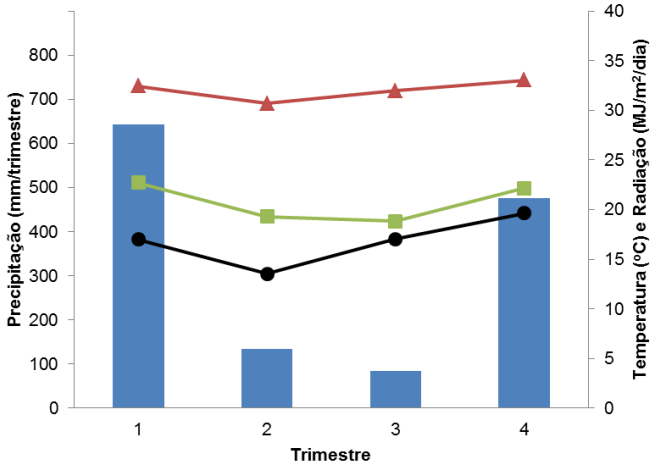


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município Catanduva/SP.

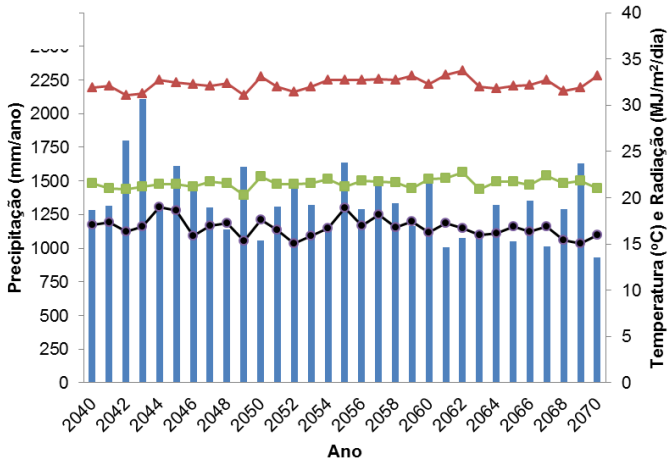
a)



b)

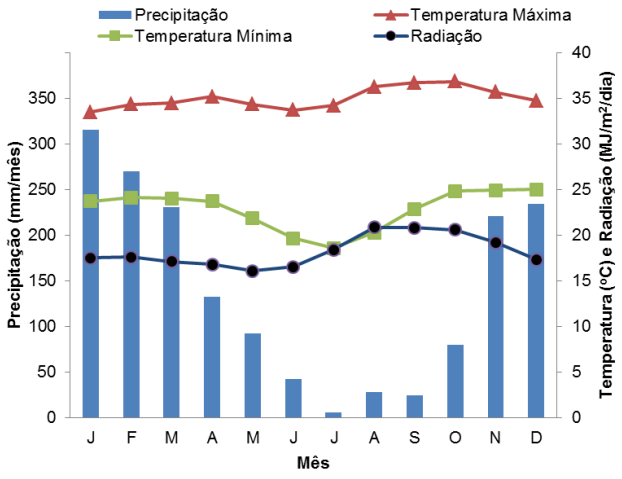


c)

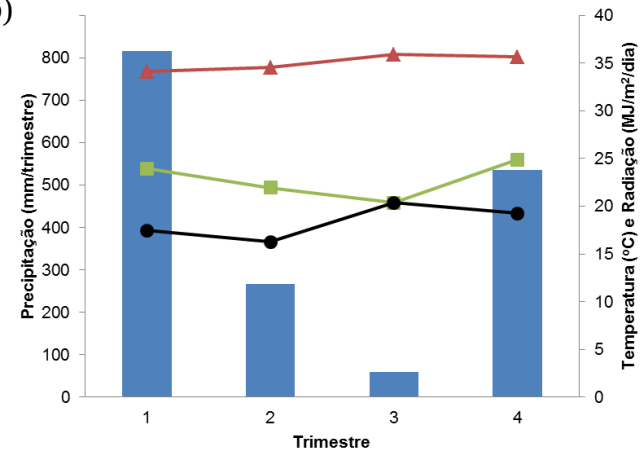


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município Diamantino/MT.

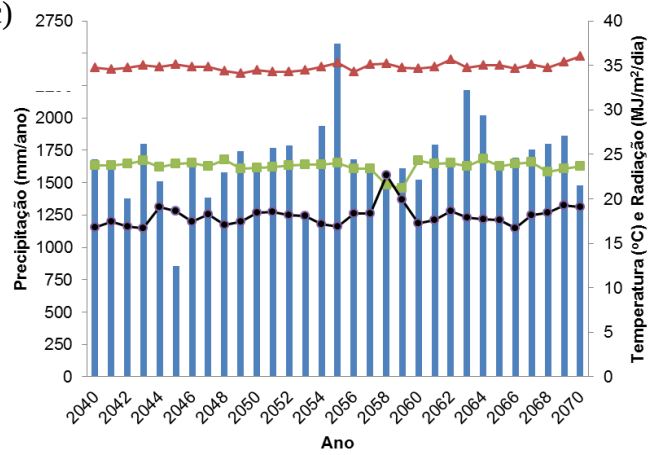
a)



b)

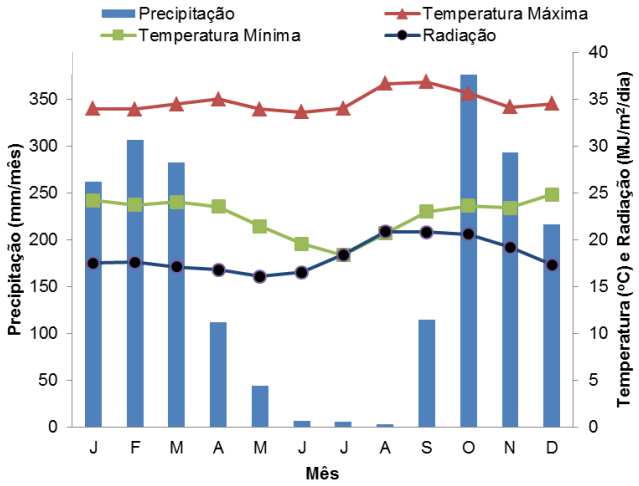


c)

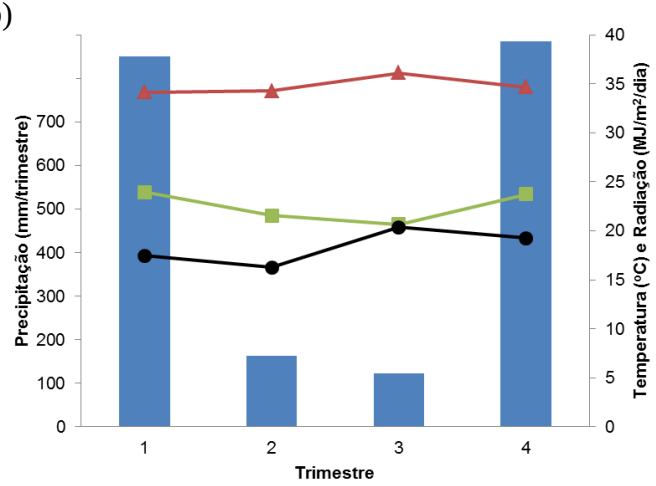


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município Diamantino/MT.

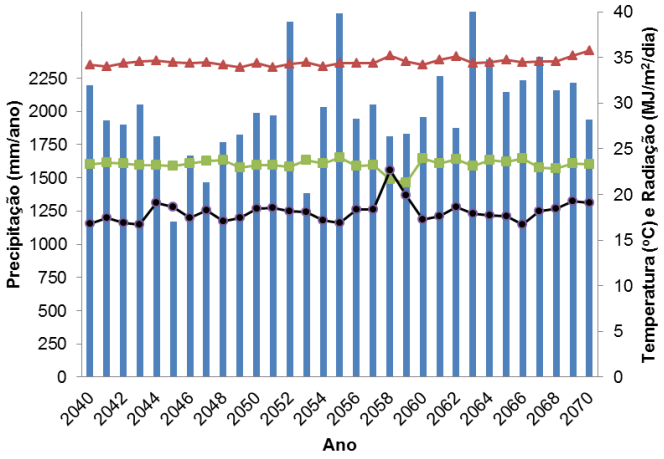
a)



b)

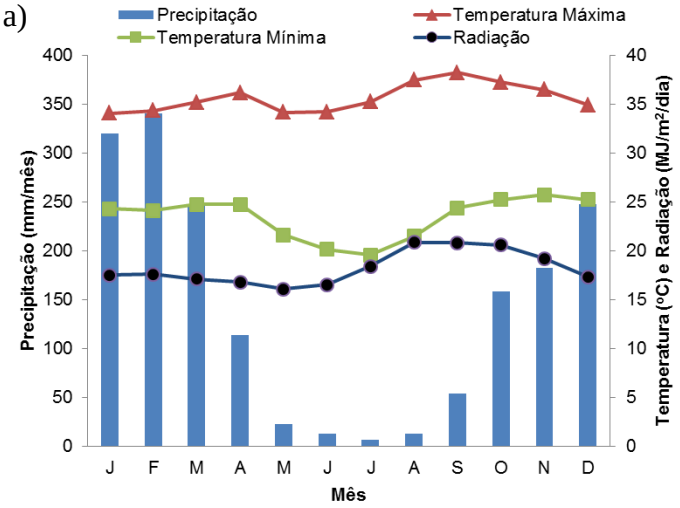


c)

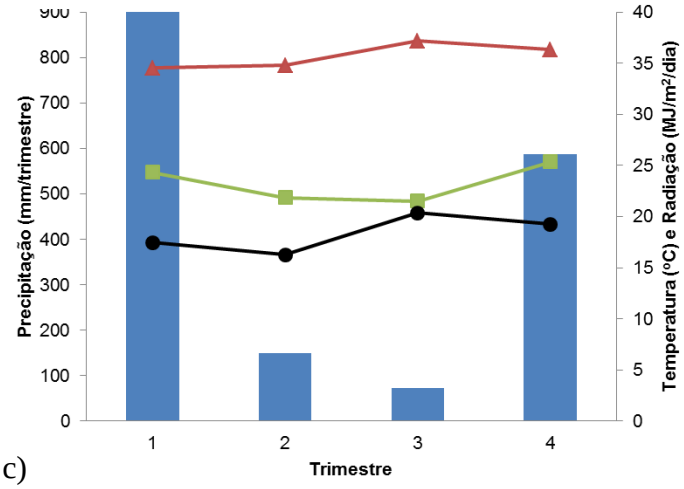


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município Diamantino/MT.

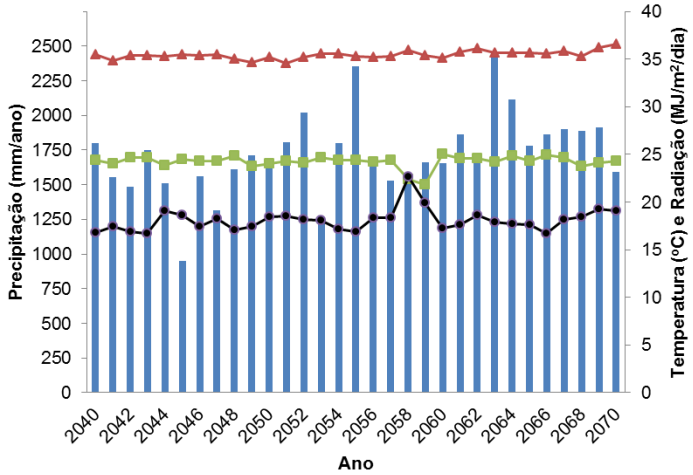
a)



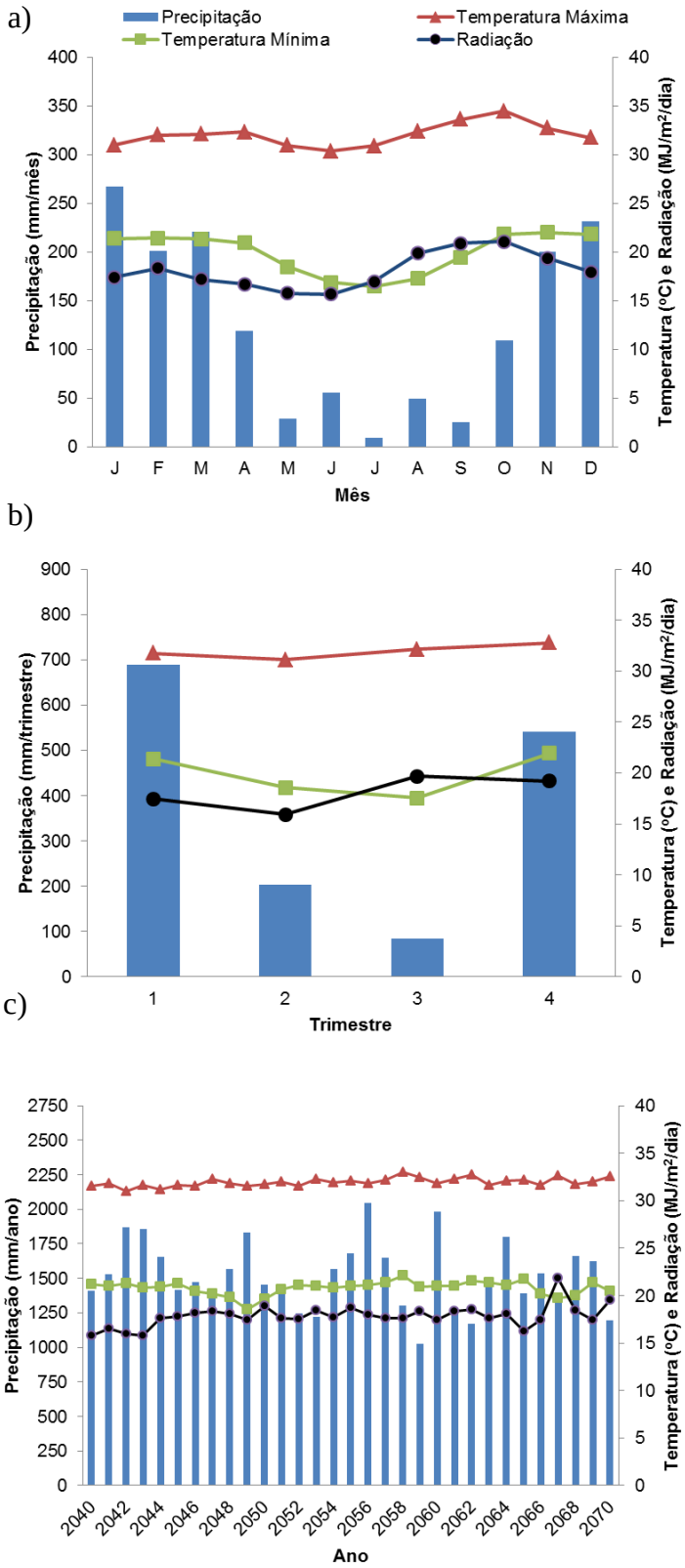
b)



c)

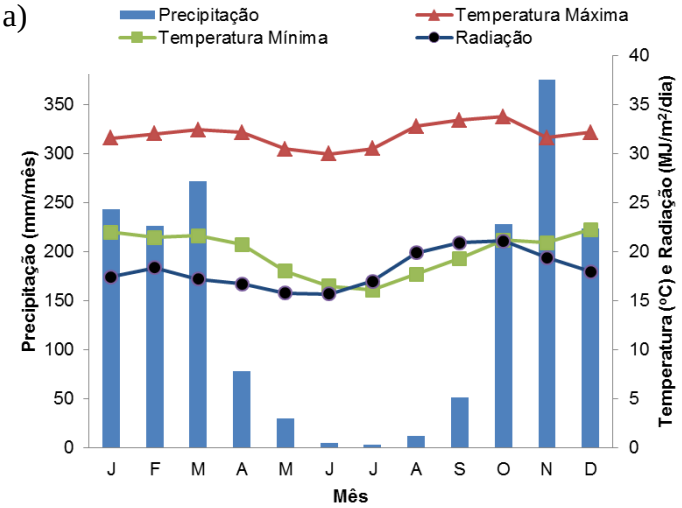


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município Rio Verde/GO.

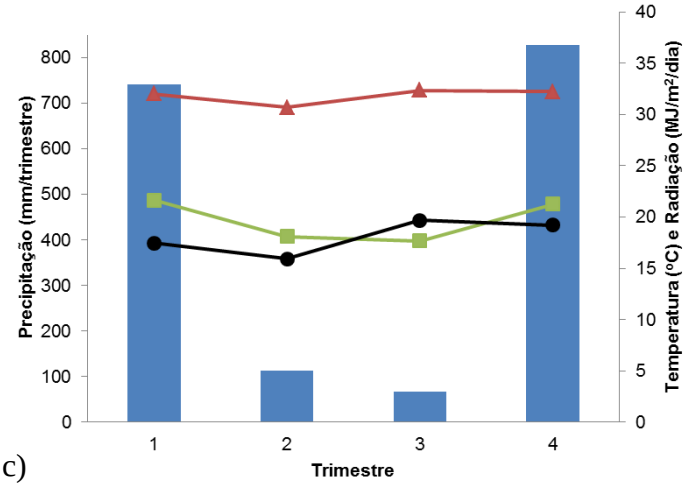


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município Rio Verde/GO.

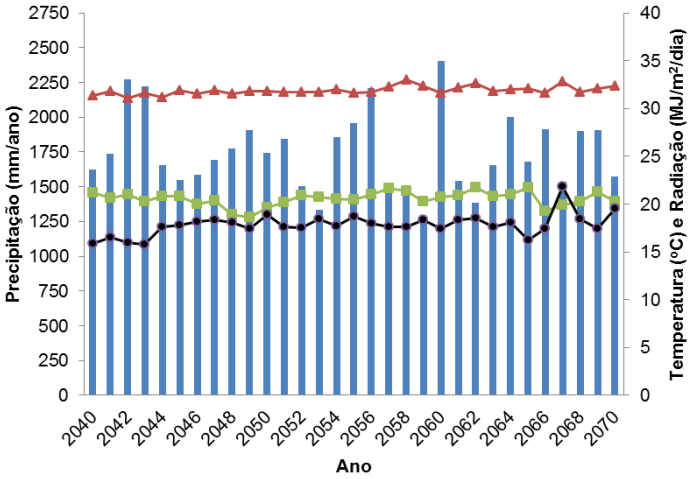
a)



b)

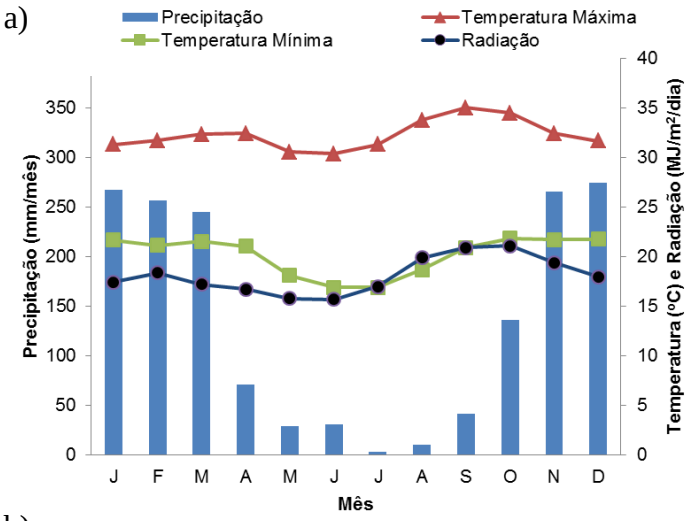


c)

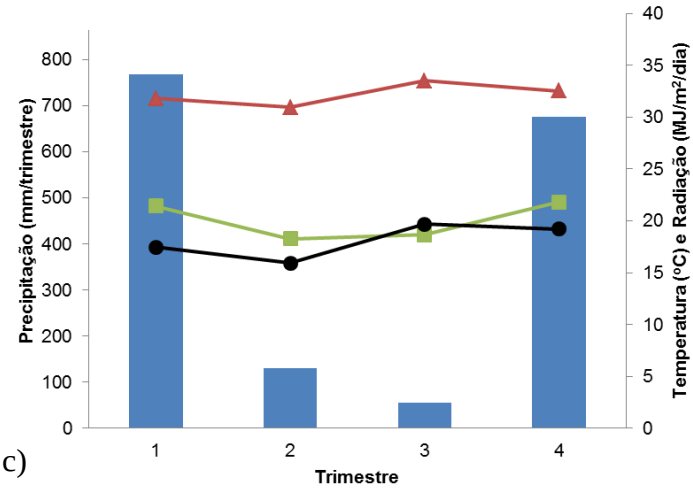


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município Rio Verde/GO.

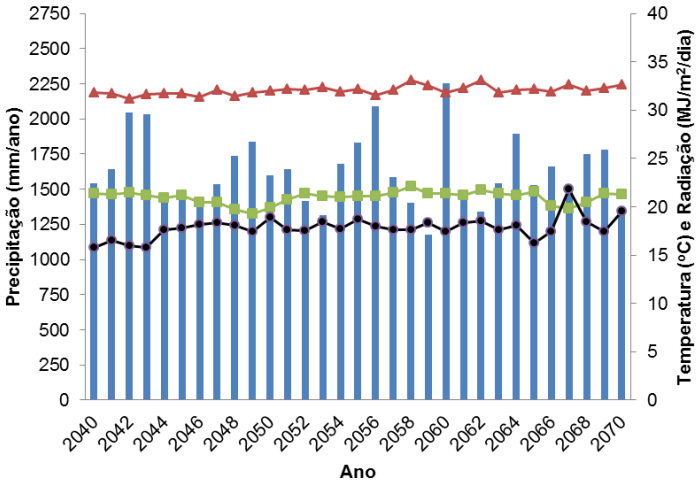
a)



b)

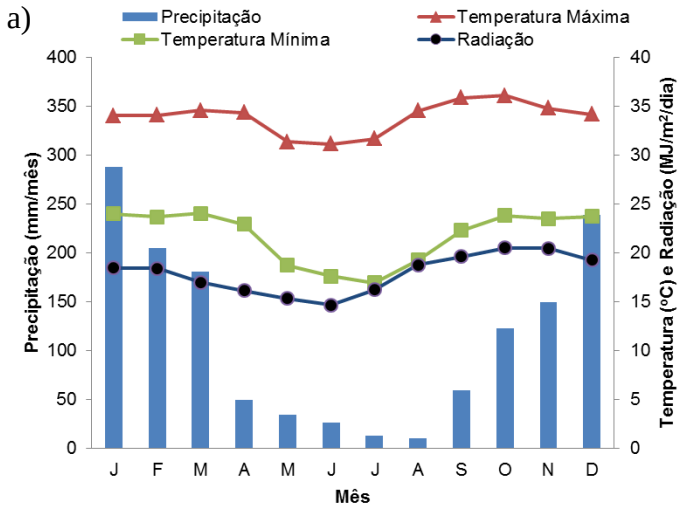


c)

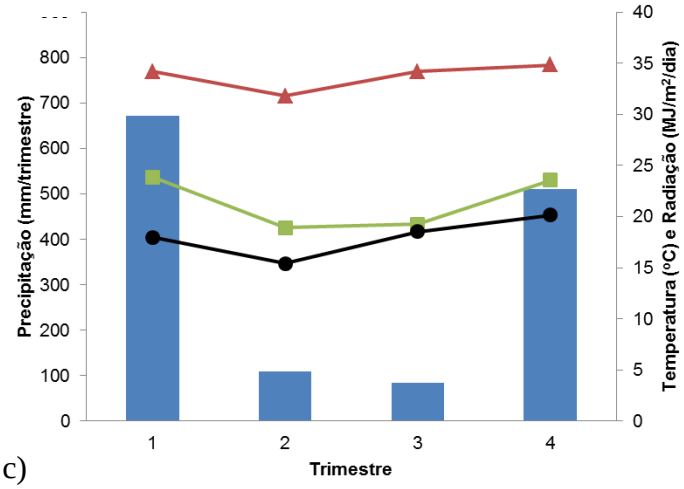


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município de Paranaíba/MS.

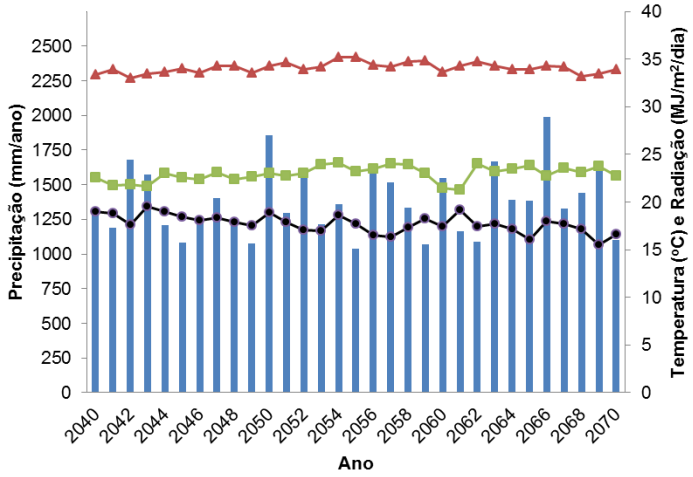
a)



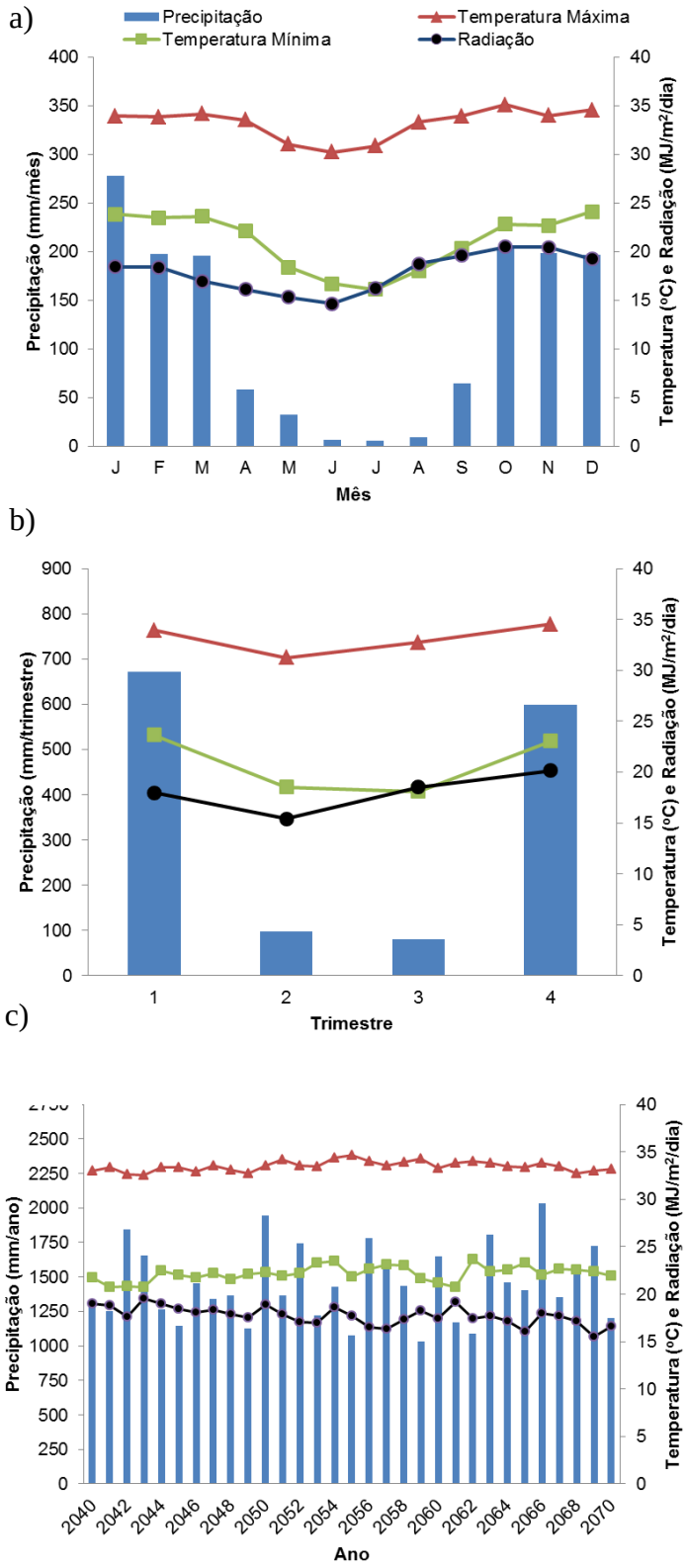
b)



c)

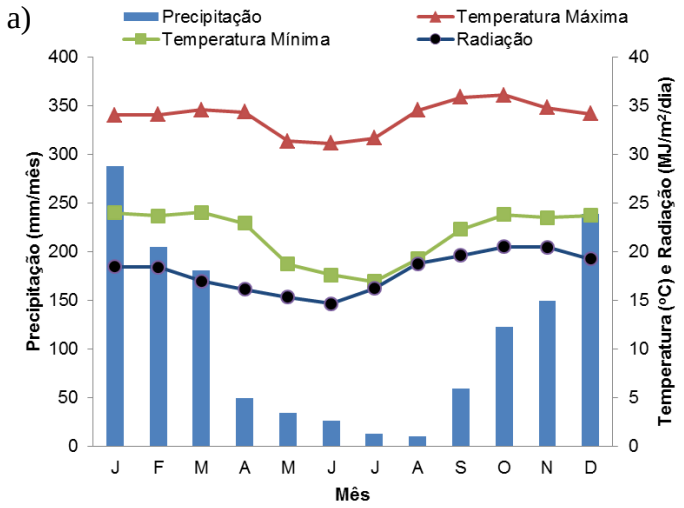


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município de Paranaíba/MS.

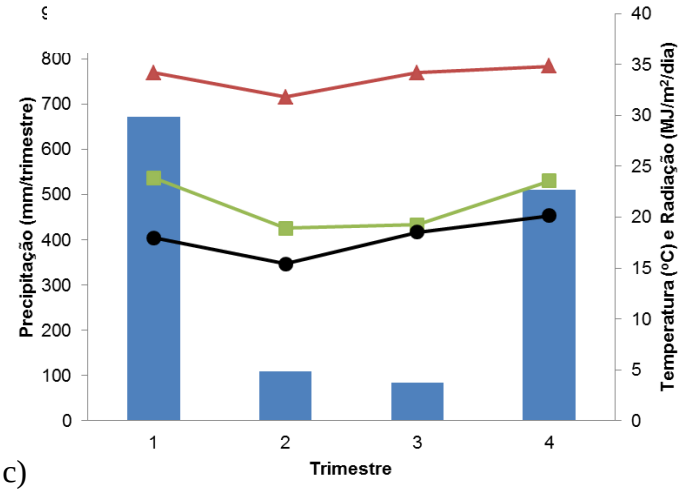


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município de Paranaíba/MS.

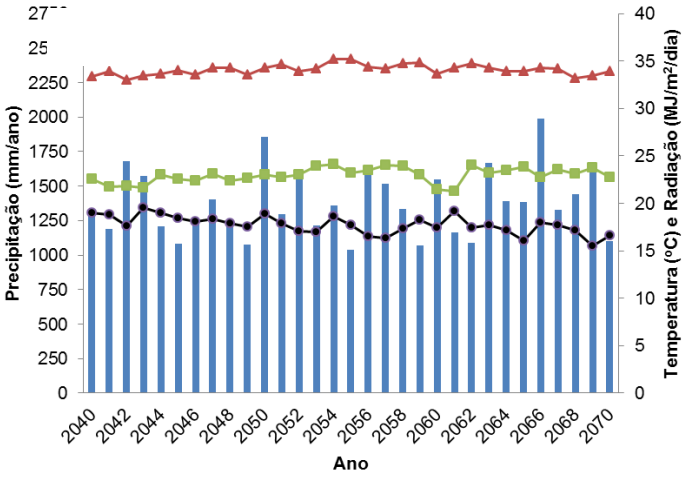
a)



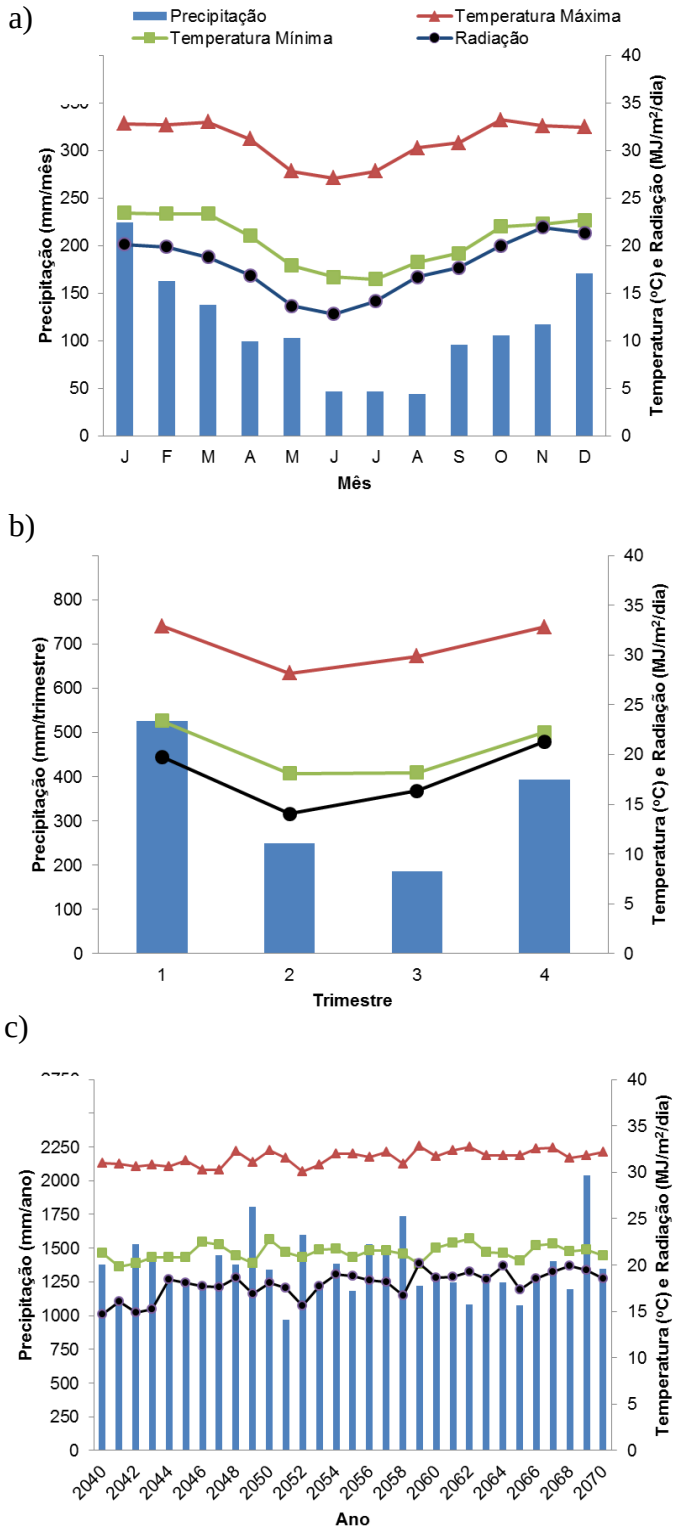
b)



c)

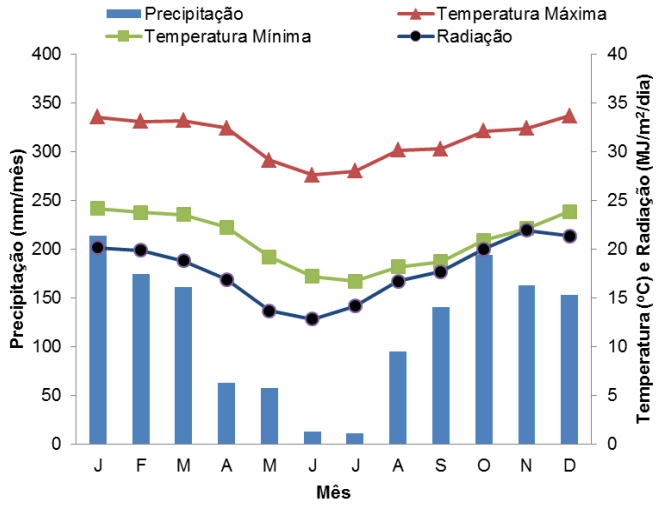


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município de Presidente Prudente/SP.

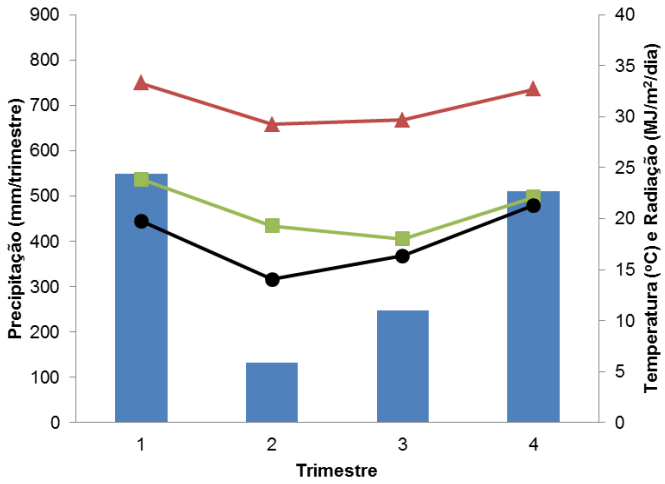


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município de Presidente Prudente/SP.

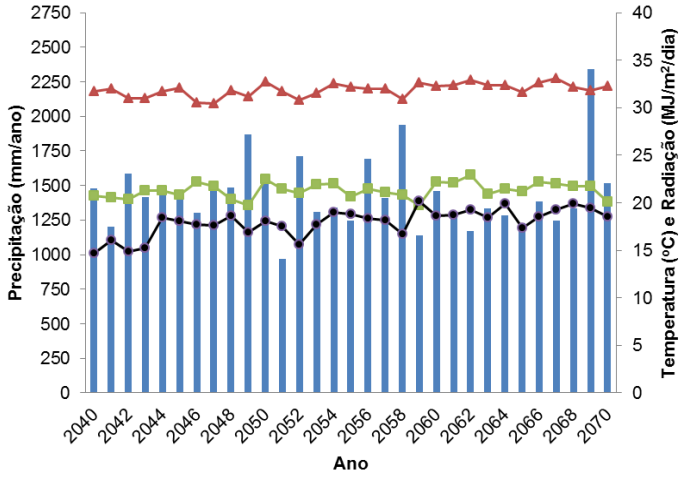
a)



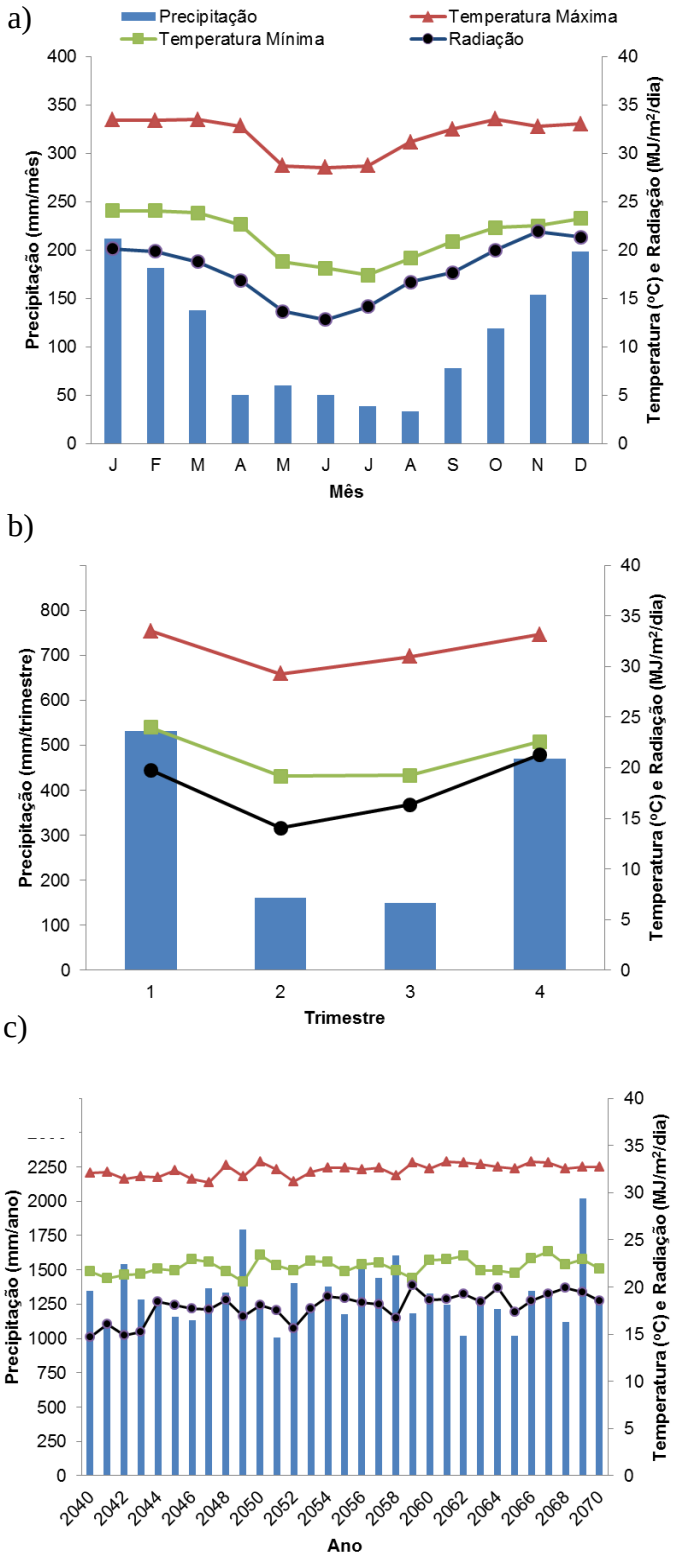
b)



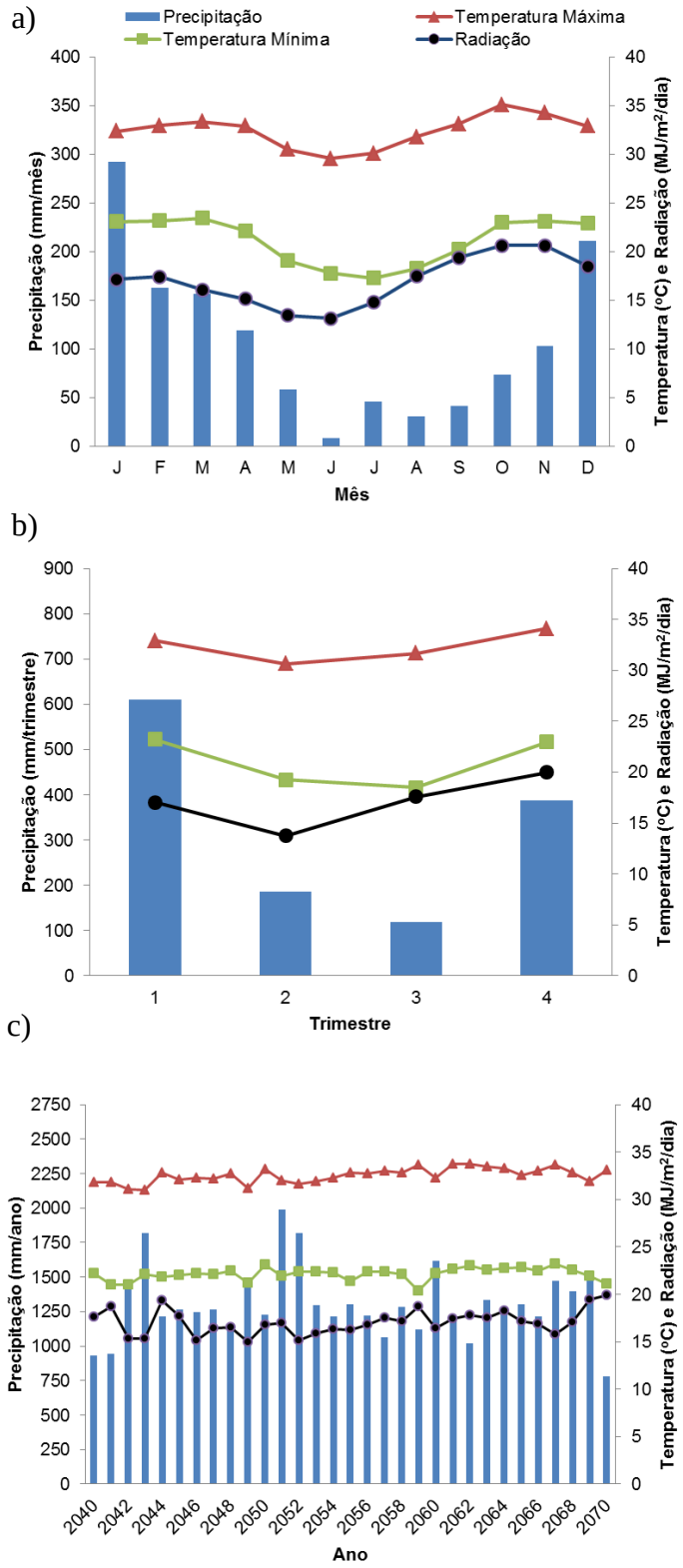
c)



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município de Presidente Prudente/SP.

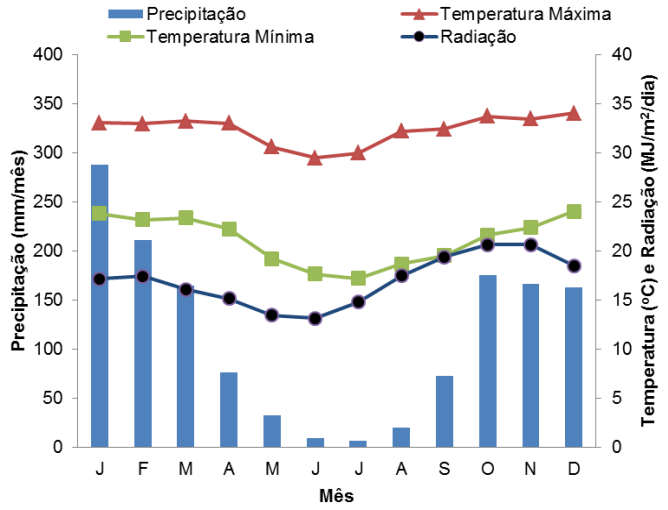


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município de Votuporanga/SP.

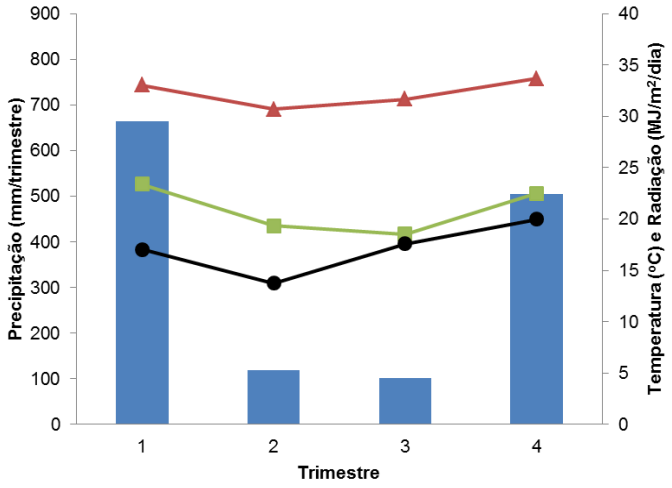


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município de Votuporanga/SP.

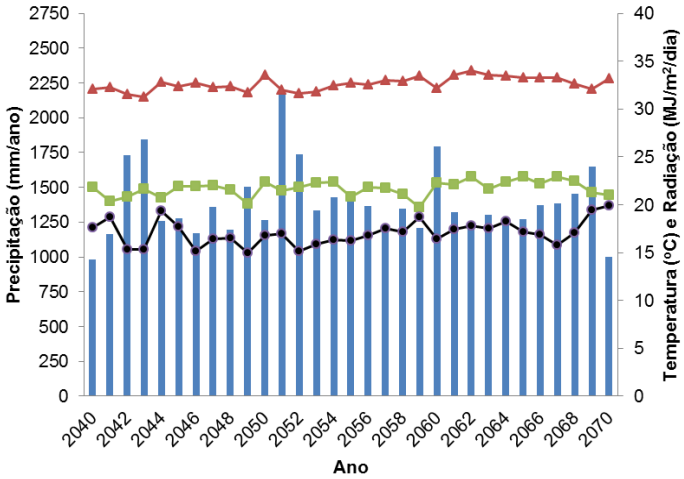
a)



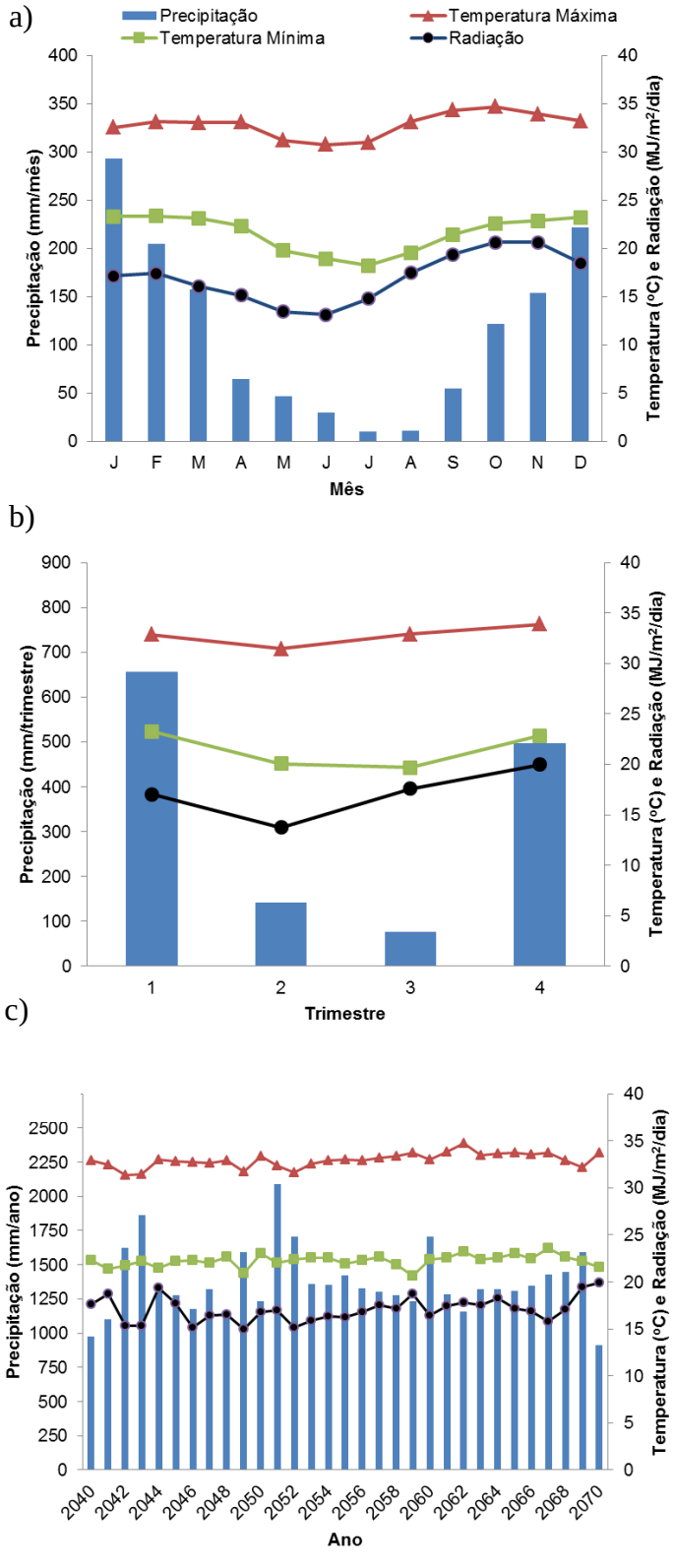
b)



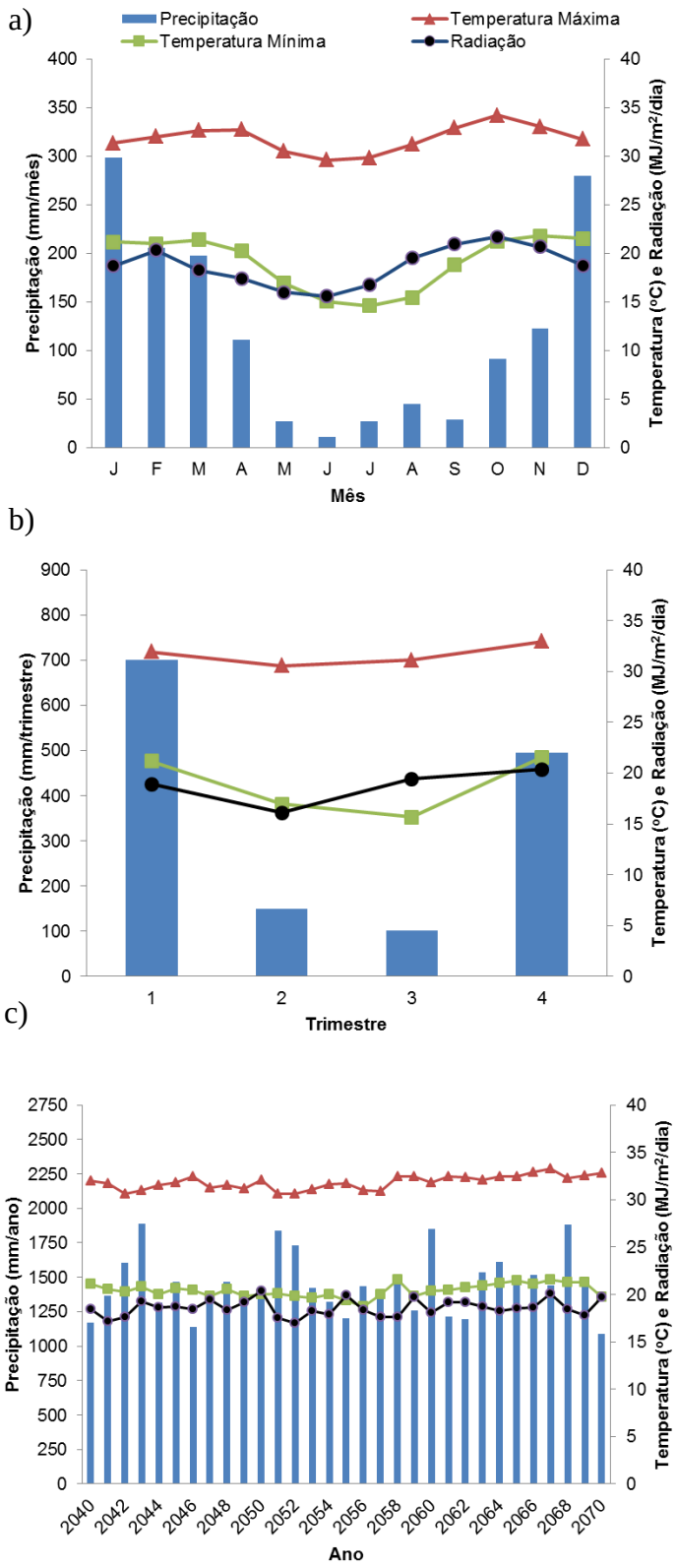
c)



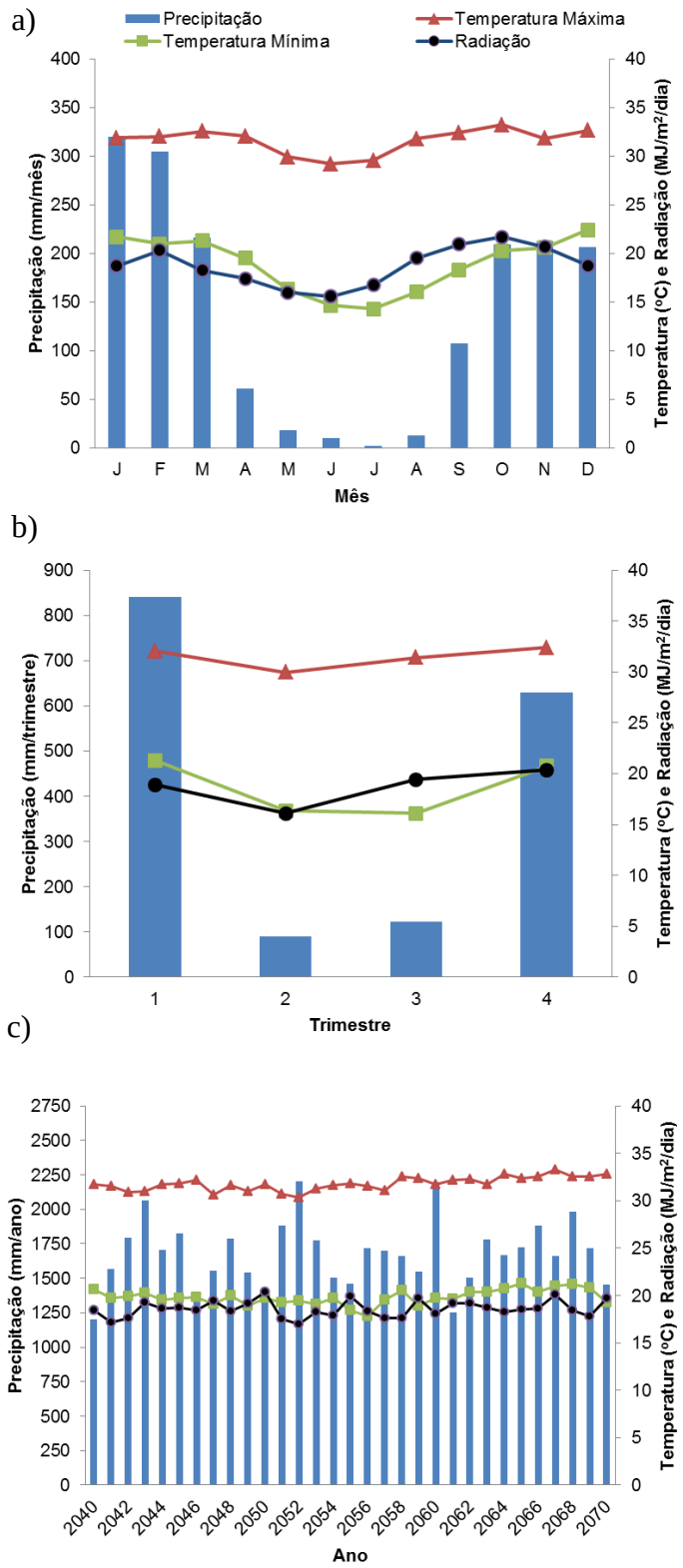
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município de Votuporanga/SP.



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município de Uberaba/MG.

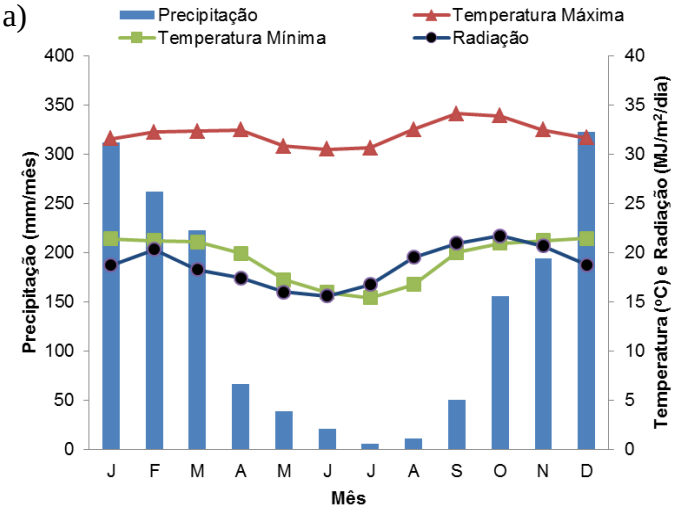


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município de Uberaba/MG.

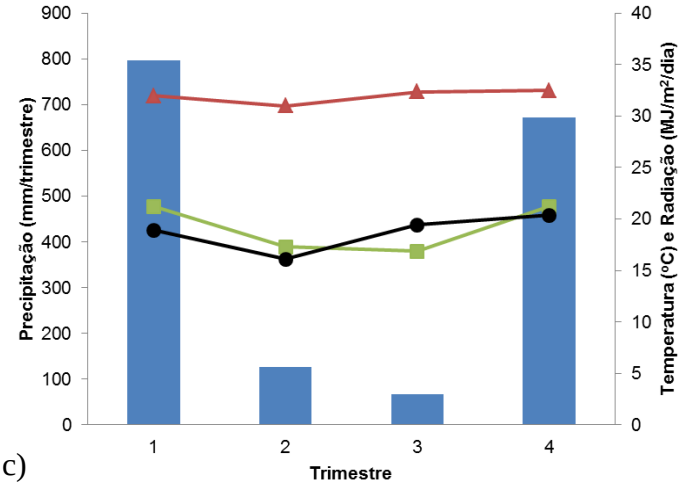


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município de Uberaba/MG.

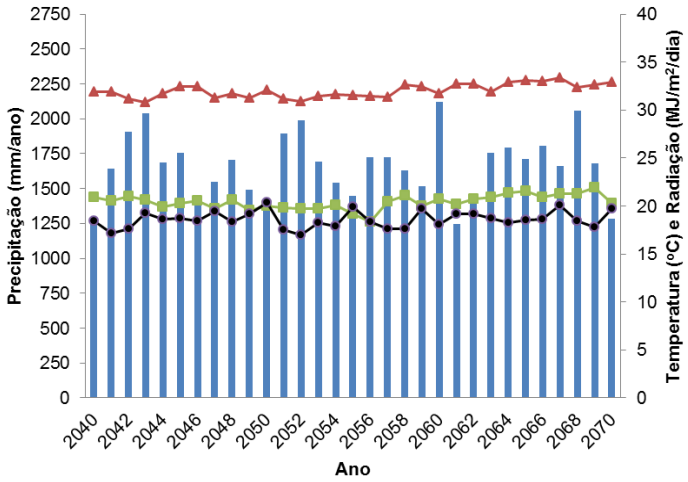
a)



b)

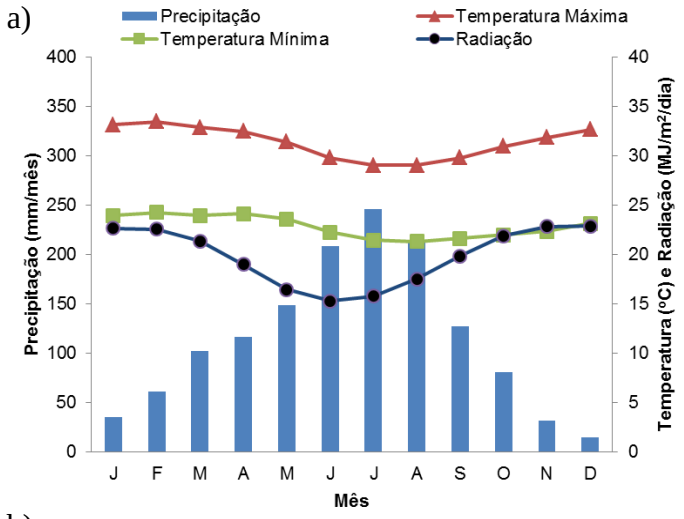


c)

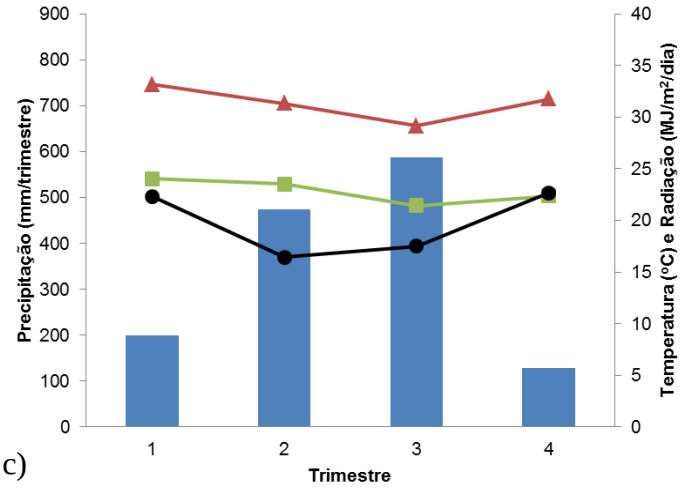


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM E, para o município de Maceió/AL.

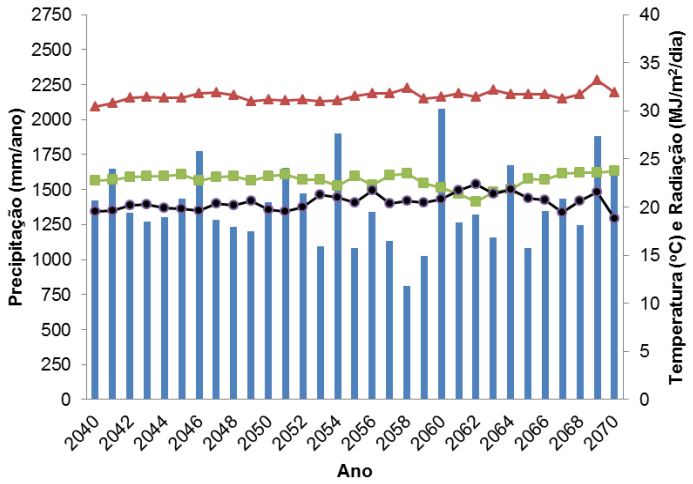
a)



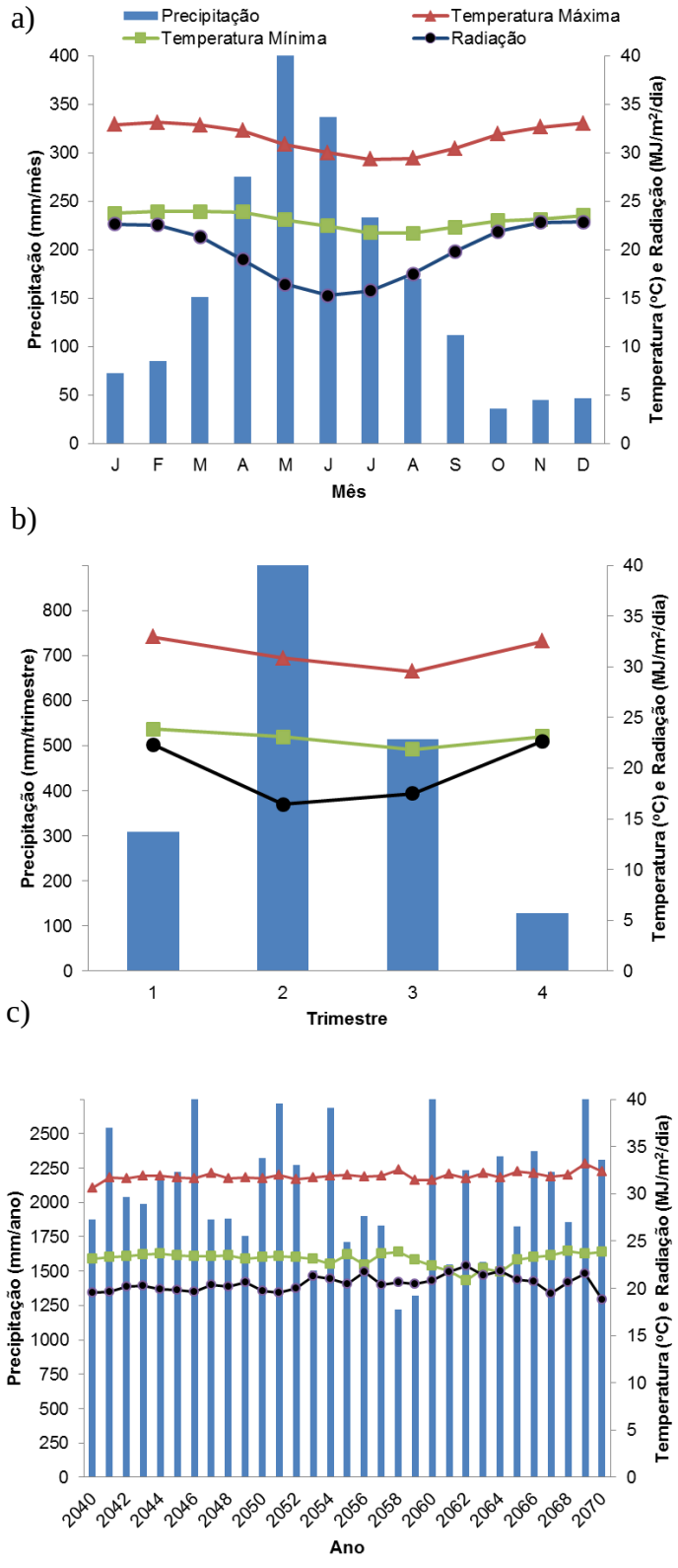
b)



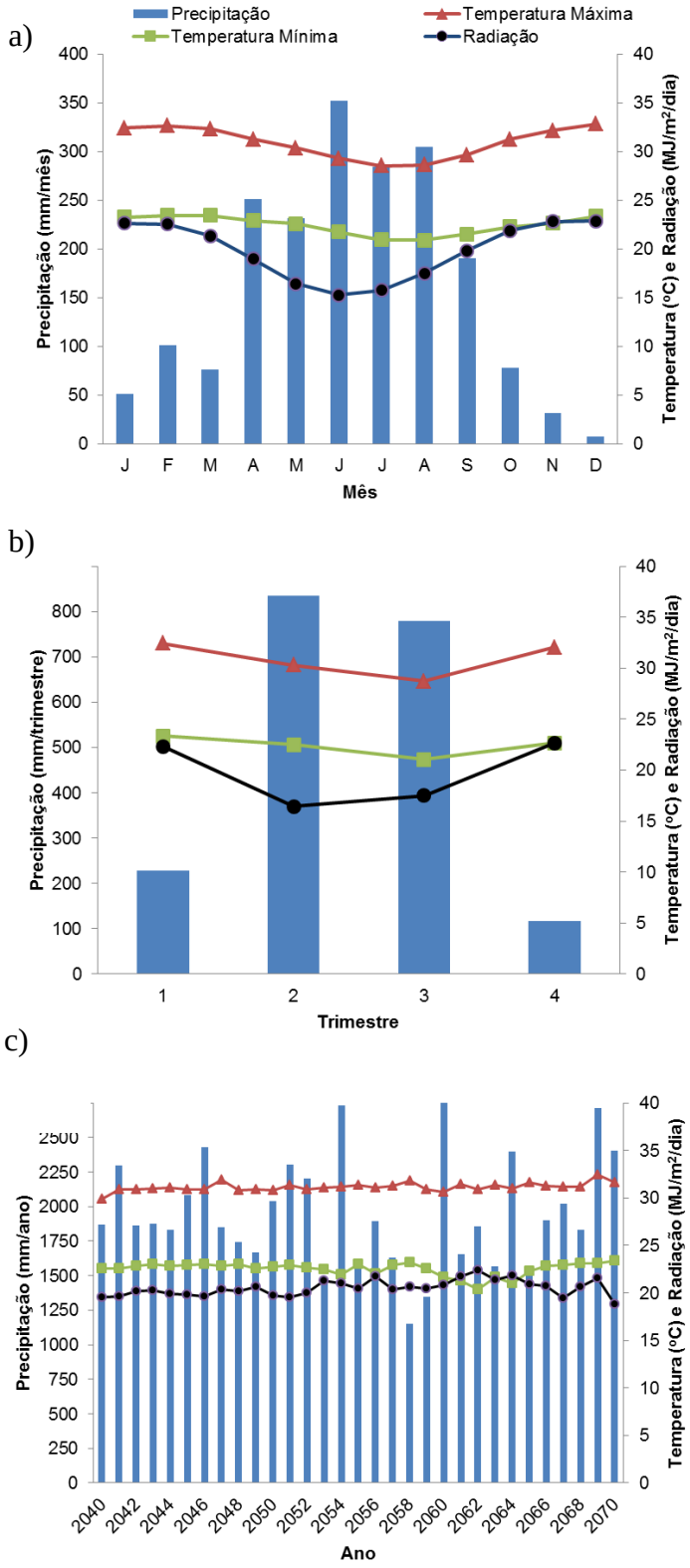
c)



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM I, para o município de Maceió/AL.



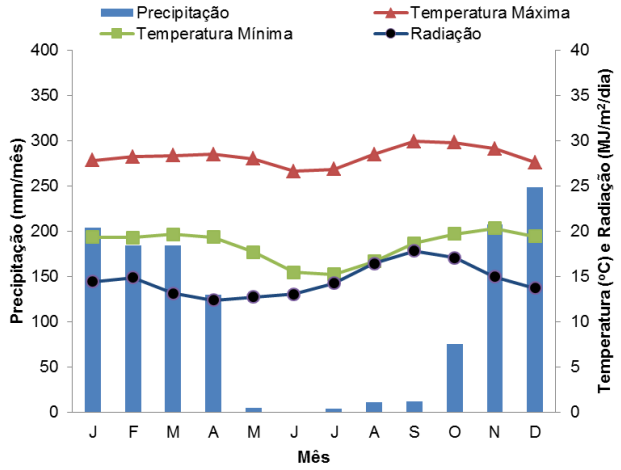
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação Solar mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação solar trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário A2 - GCM P, para o município de Maceió/AL.



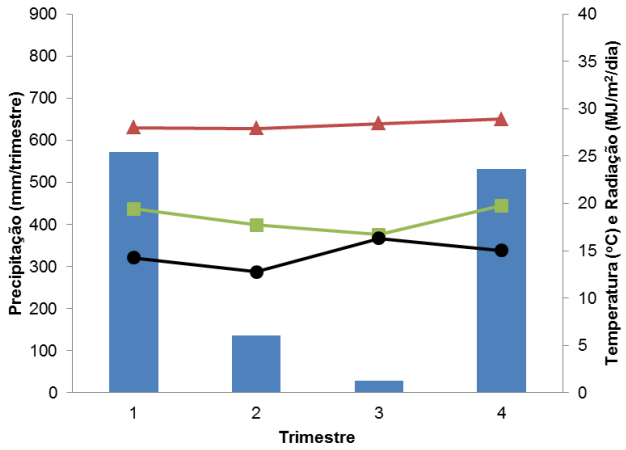
ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS DE NOVE LOCAIS NO BRASIL COM DADOS GERADOS POR TRÊS MODELOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL PARA O CENÁRIO DE EMISSÕES B1

a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM E, para o município de Brasília/DF.

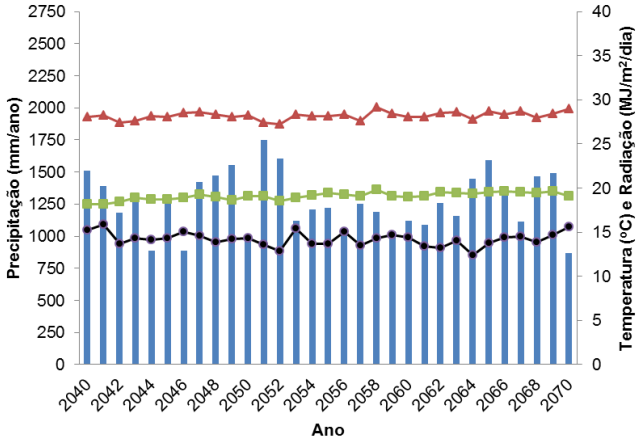
a)



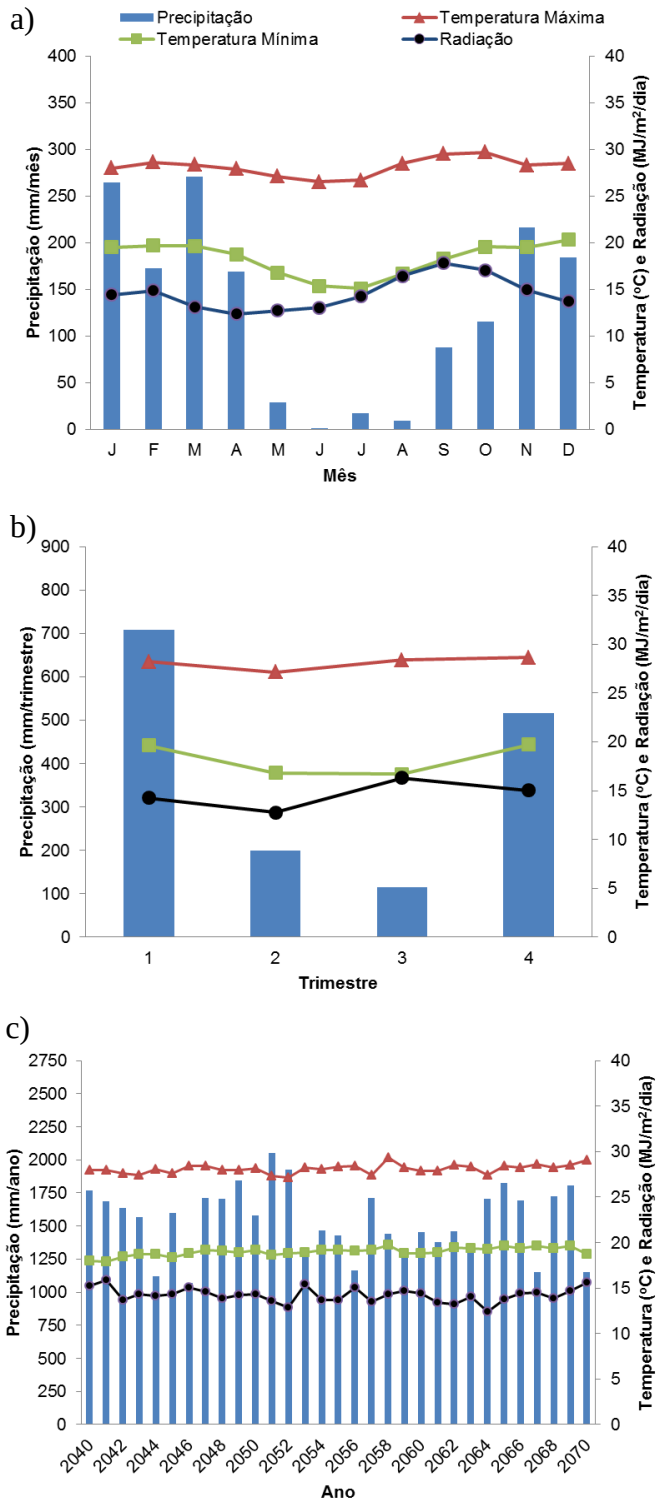
b)



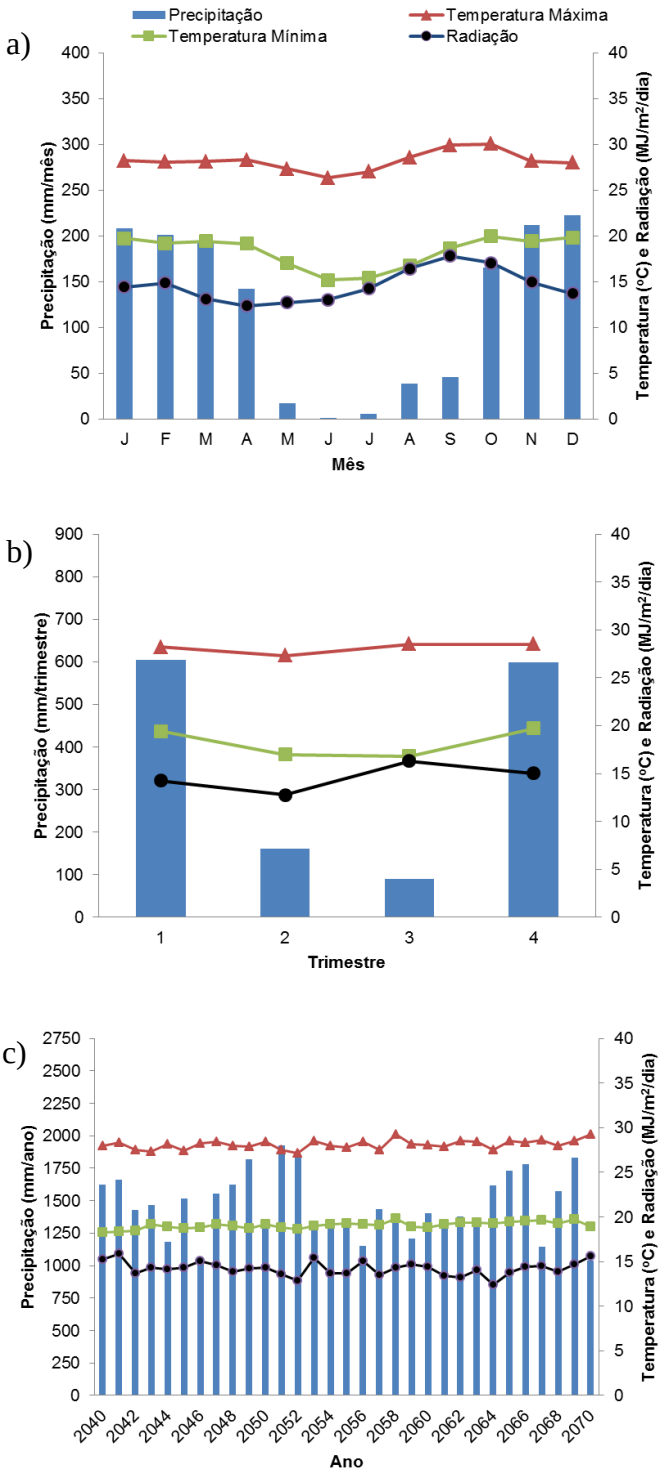
c)



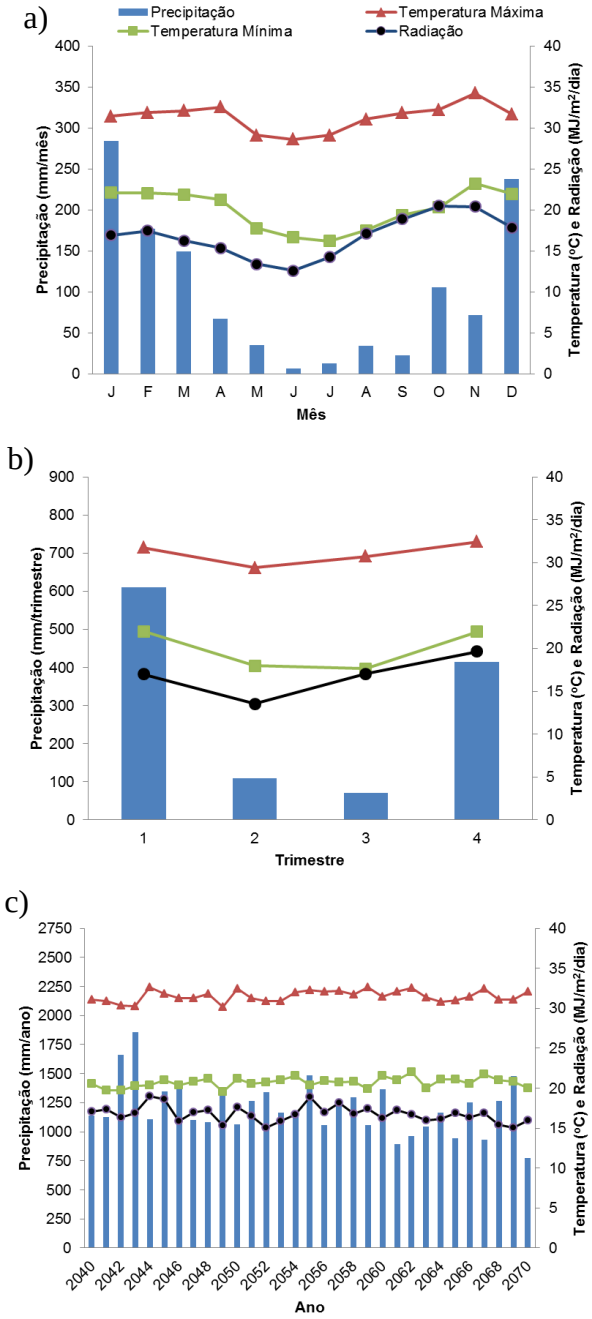
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM I, para o município de Brasília/DF.



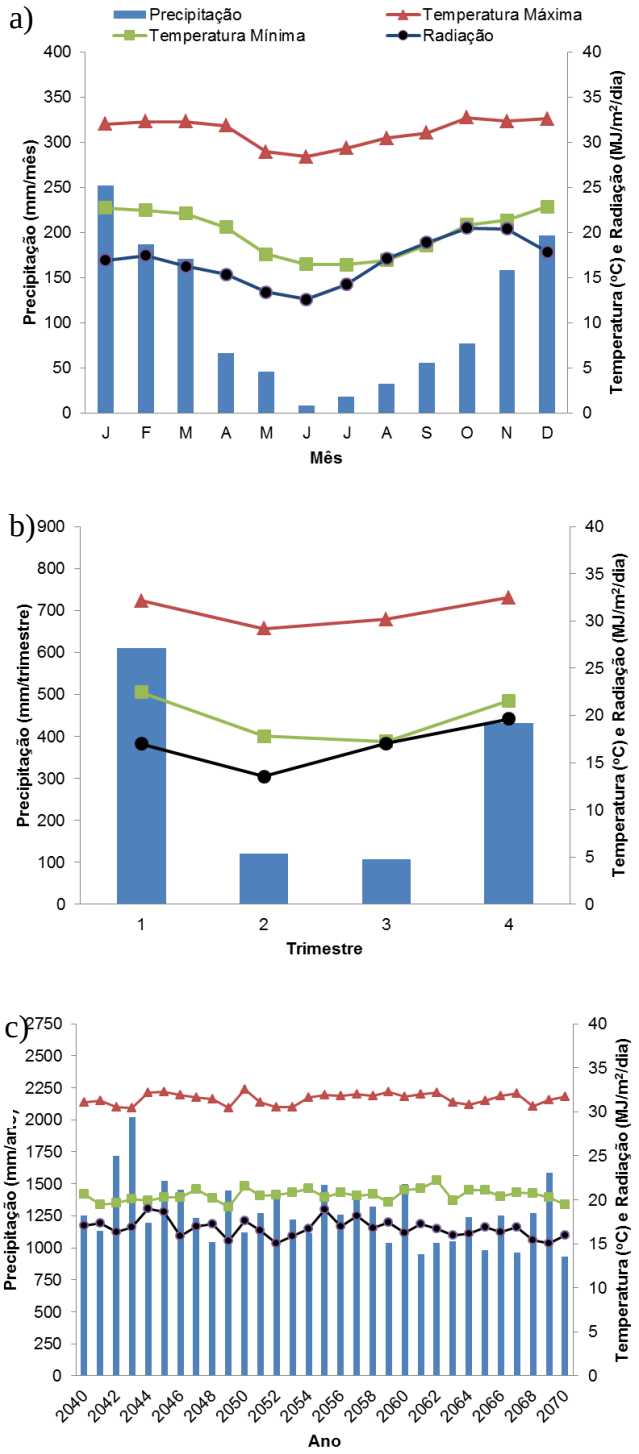
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM P, para o município de Brasília/DF.



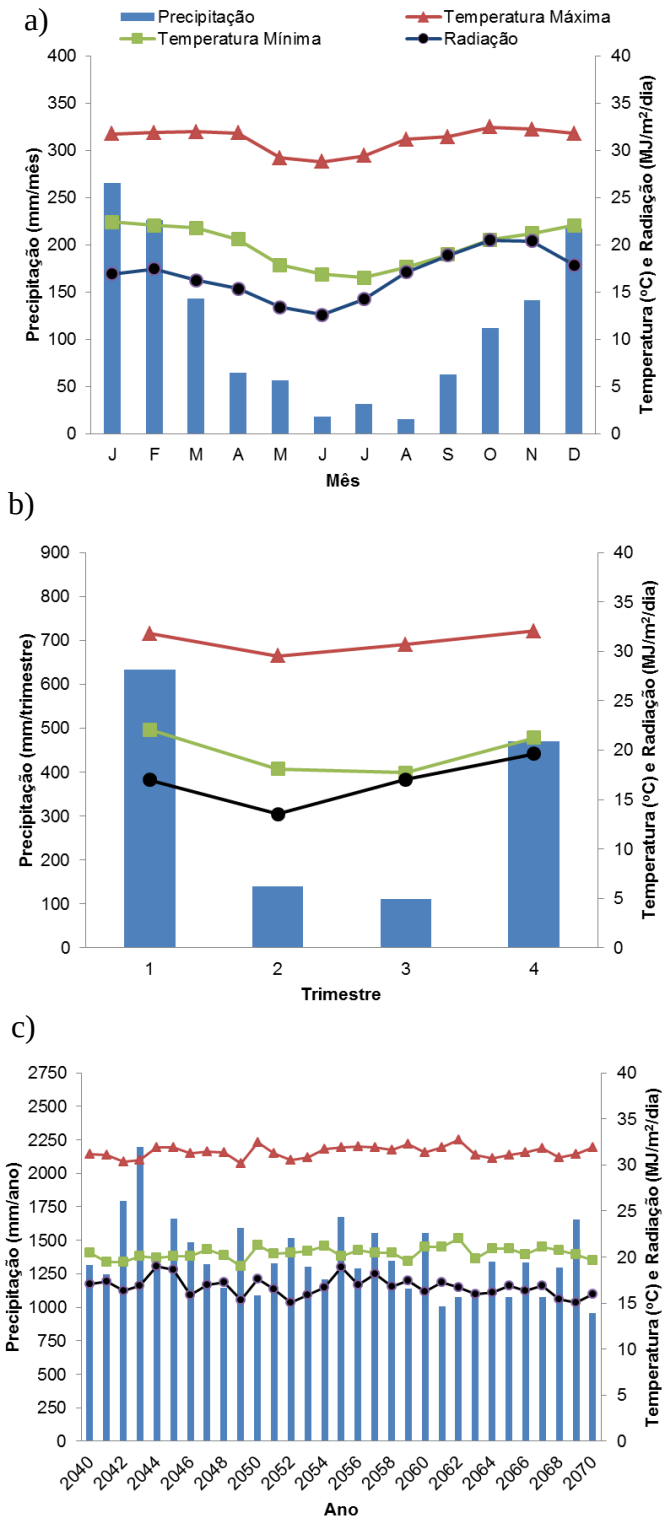
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM E, para o município de Catanduva/SP.



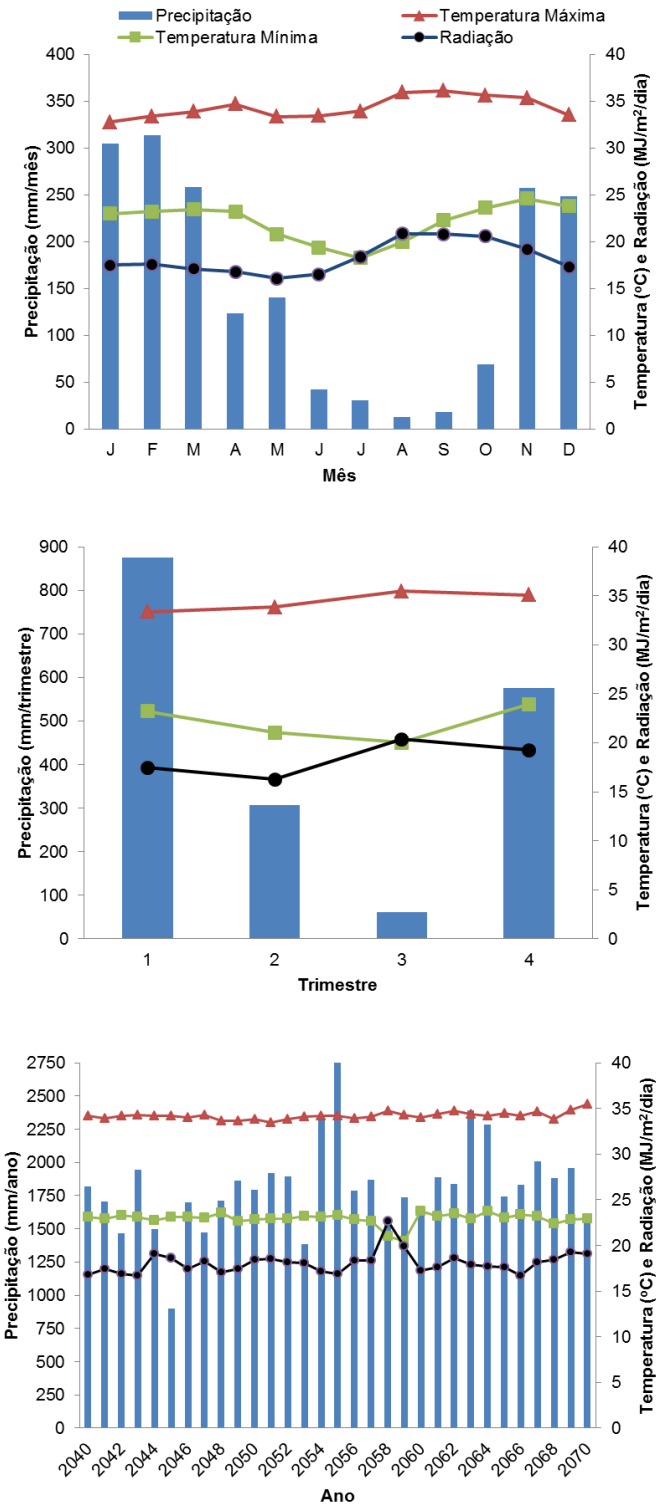
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM I, para o município de Catanduva/SP.



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM P, para o município de Catanduva/SP.

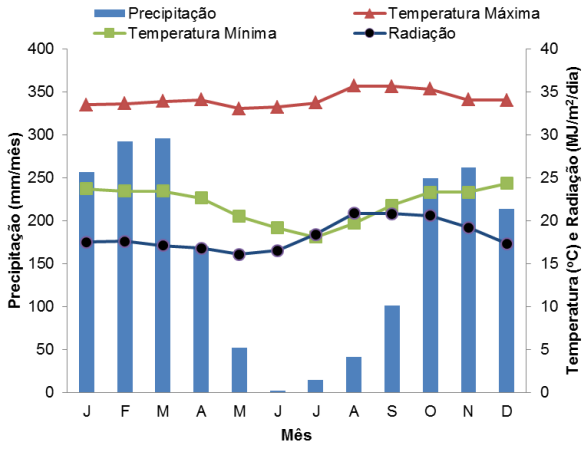


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM E, para o município de Diamantino/MT.

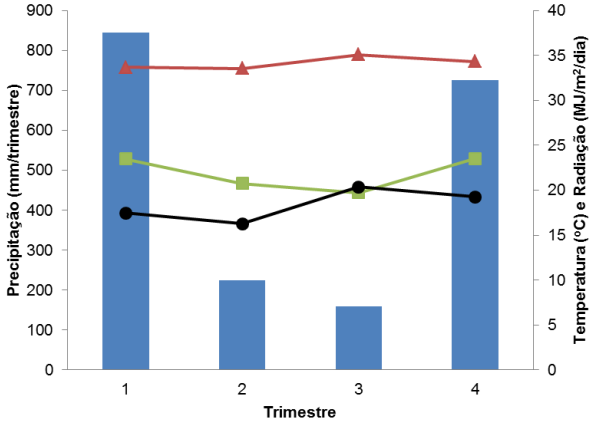


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM I, para o município de Diamantino/MT.

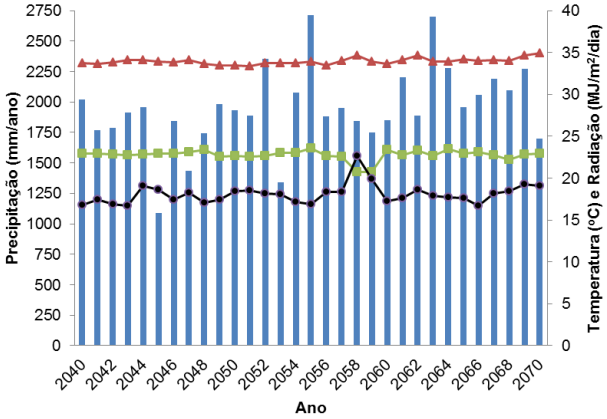
a)



b)

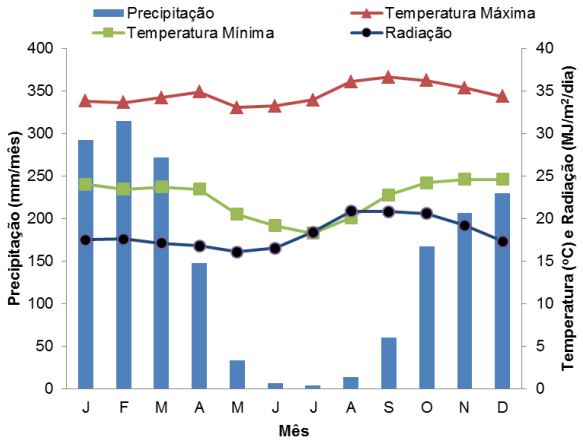


c)

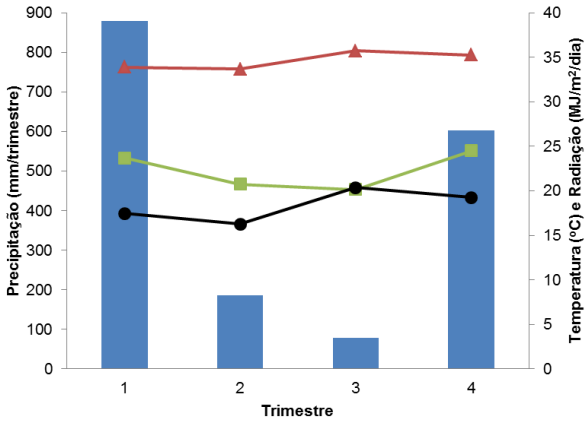


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM P, para o município de Diamantino/MT.

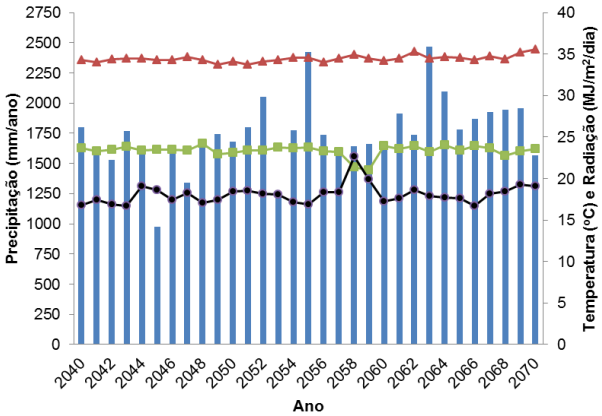
a)



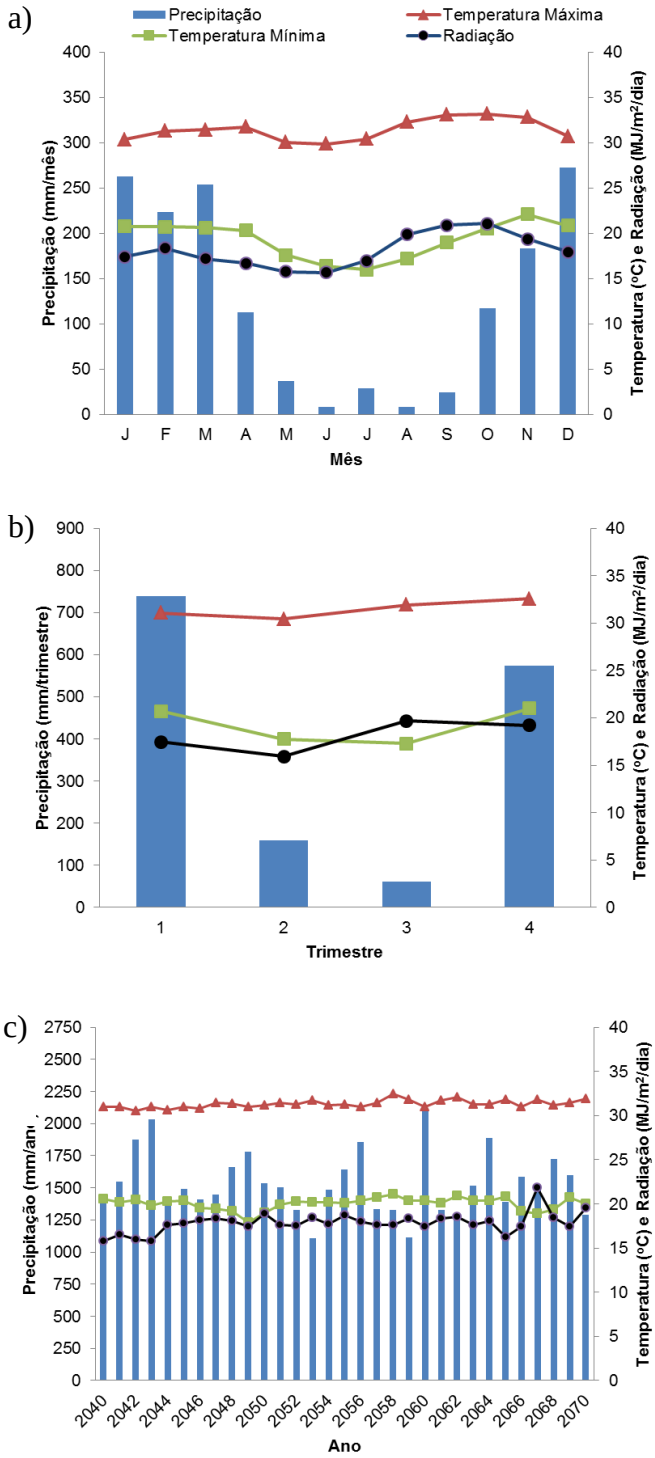
b)



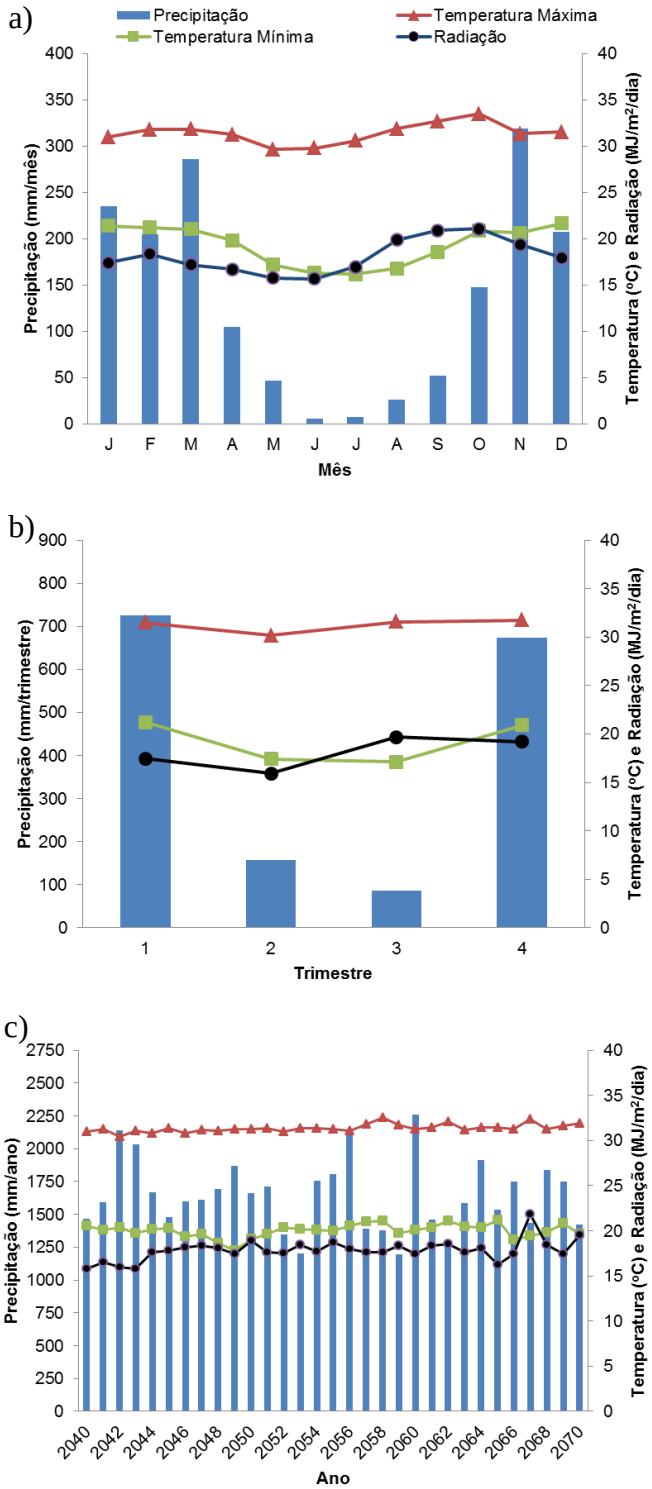
c)



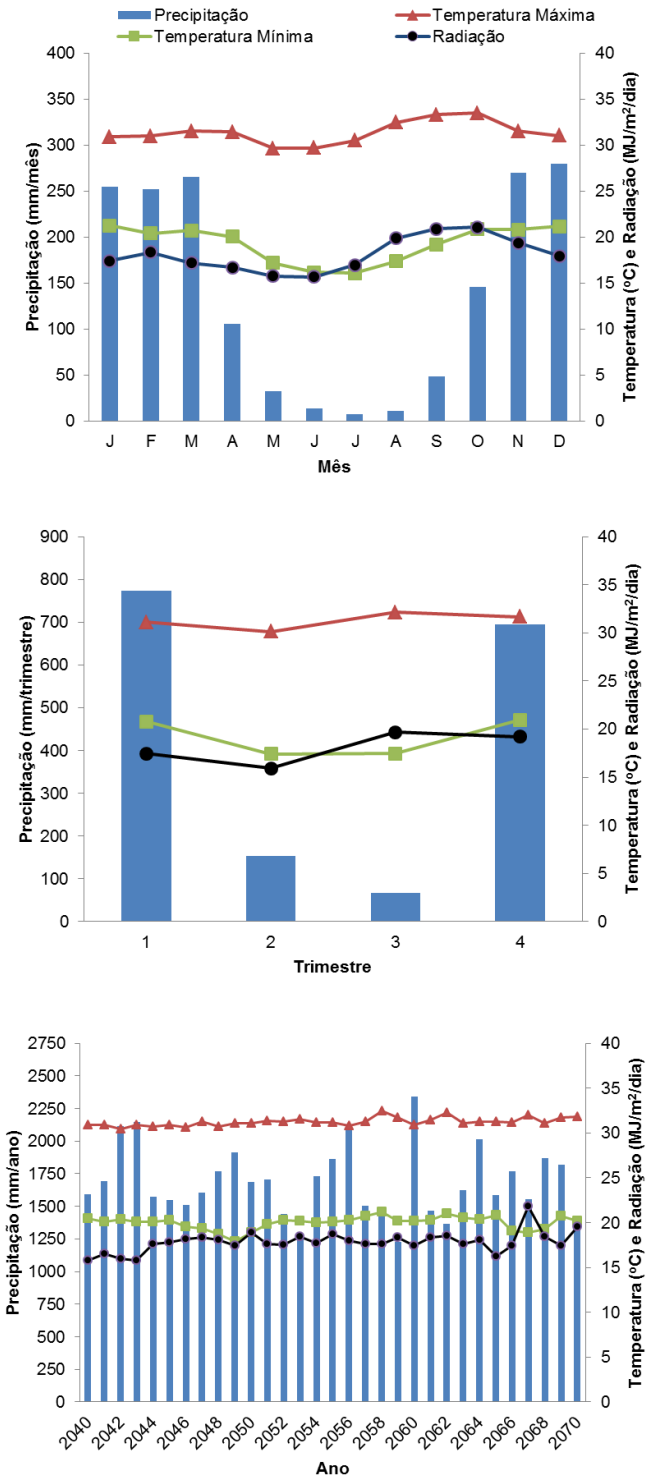
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM E, para o município de Rio Verde/GO.



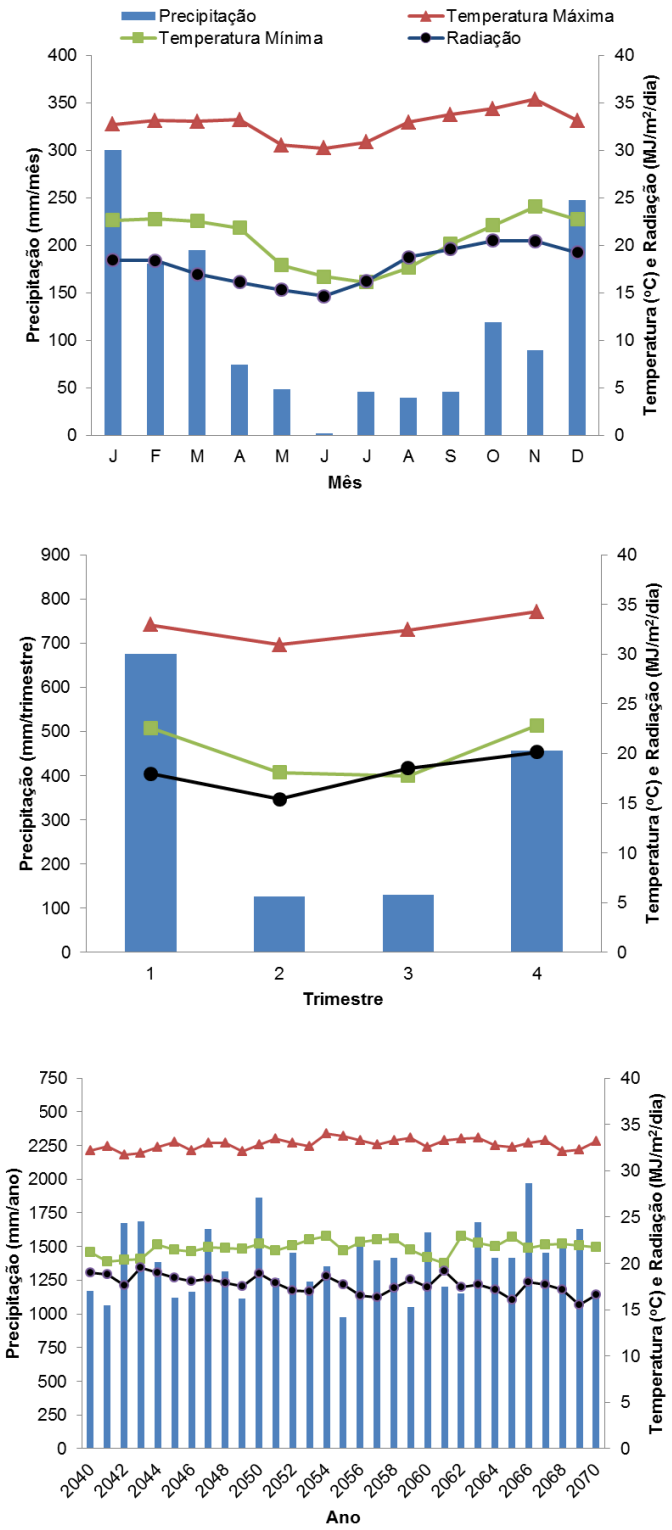
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM I, para o município de Rio Verde/GO.



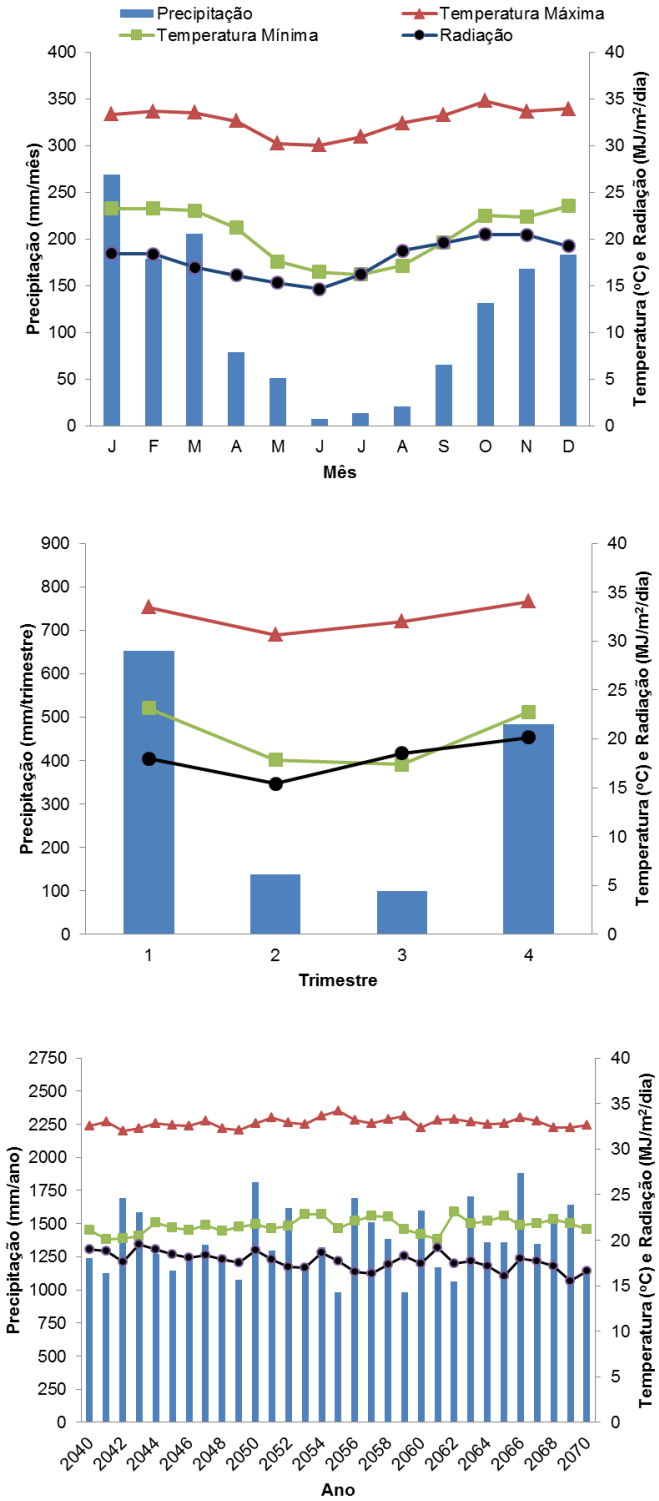
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM P, para o município de Rio Verde/GO.



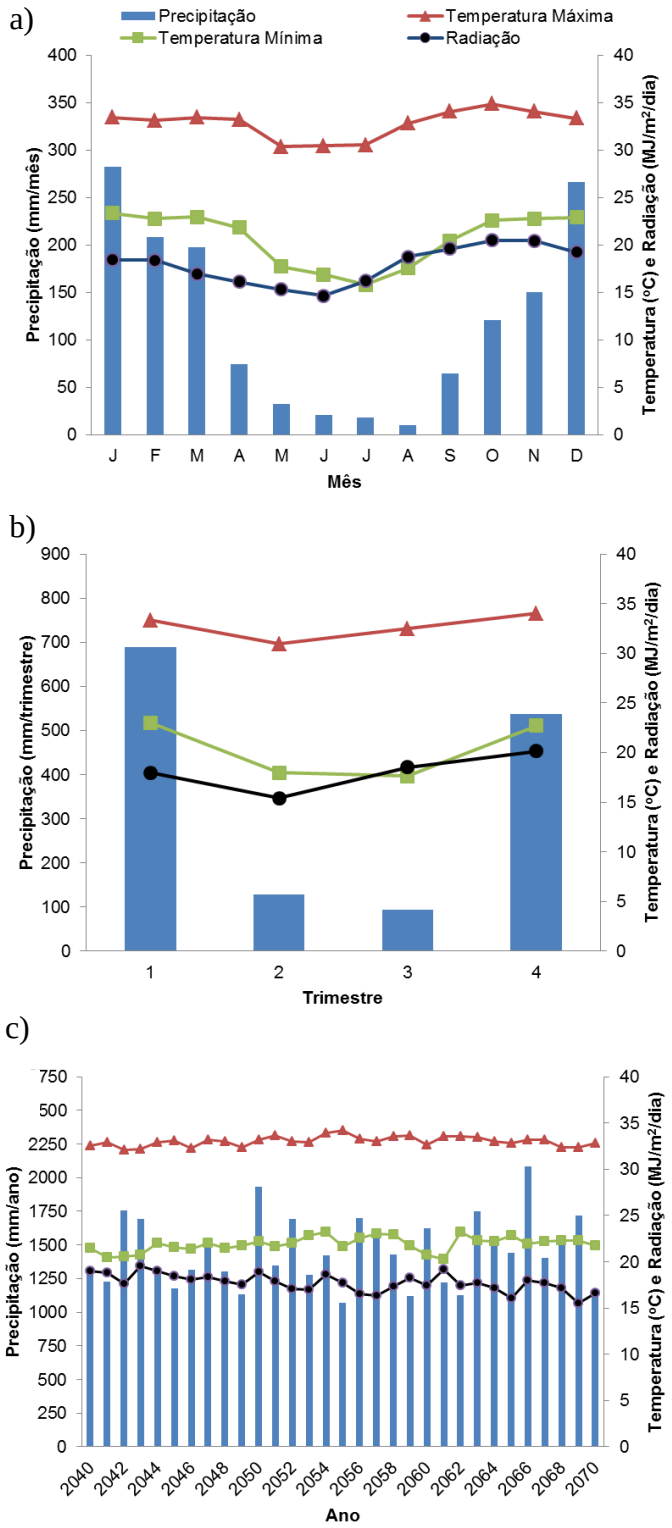
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM E, para o município de Paranaíba/MS.



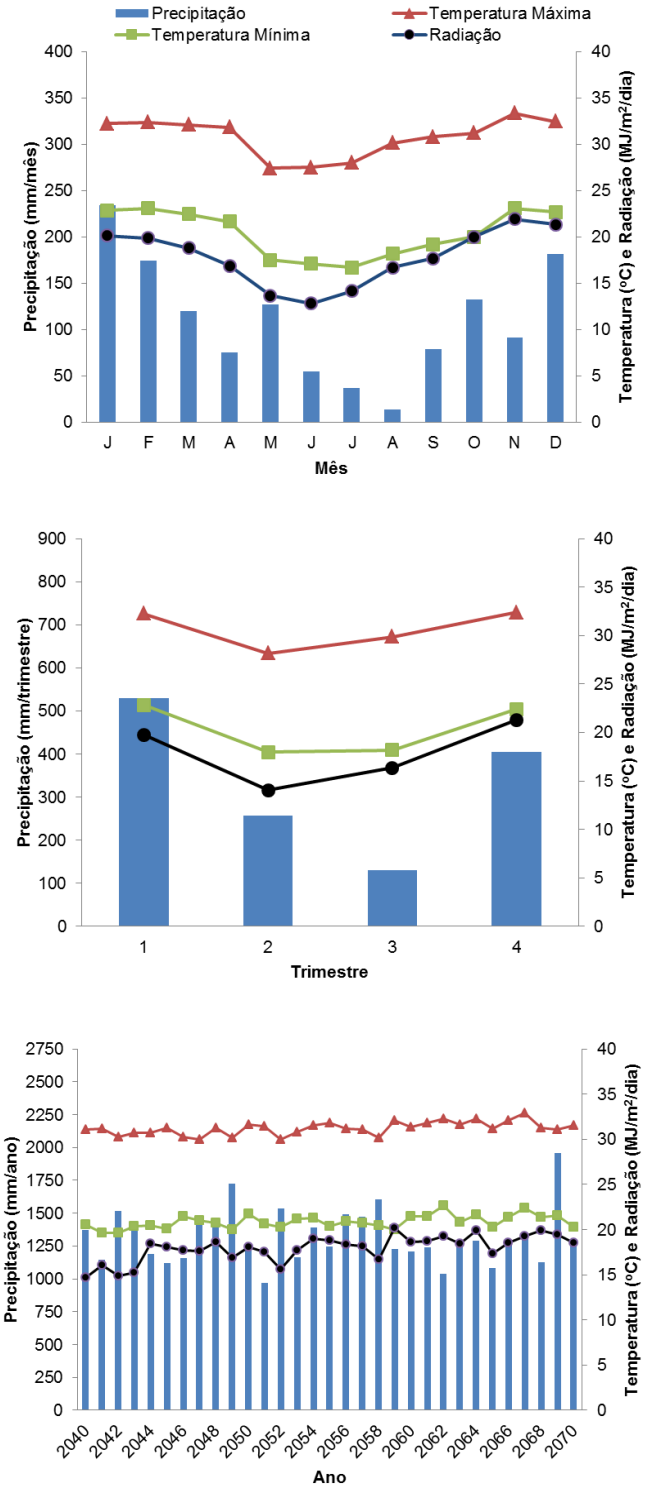
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM I, para o município de Paranaíba/MS.



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM P, para o município de Paranaíba/MS.

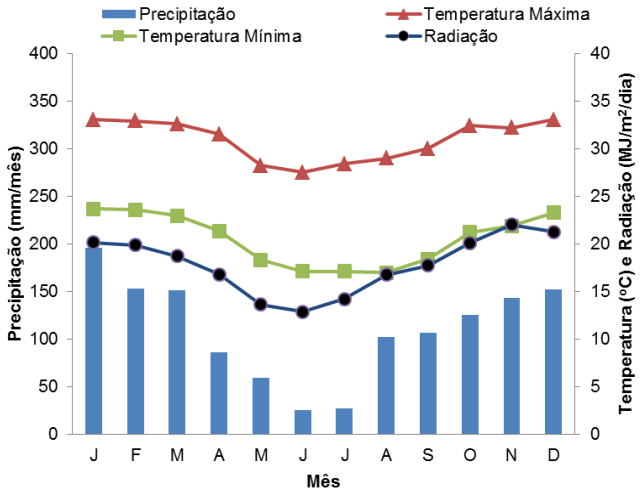


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM E, para o município de Presidente Prudente/SP.

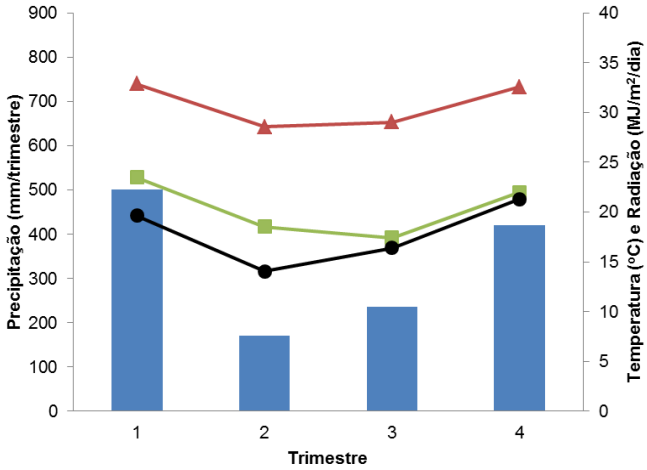


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM I, para o município de Presidente Prudente/SP.

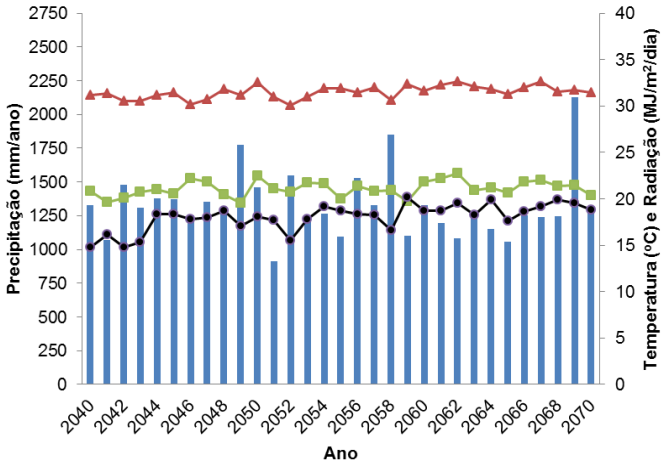
a)



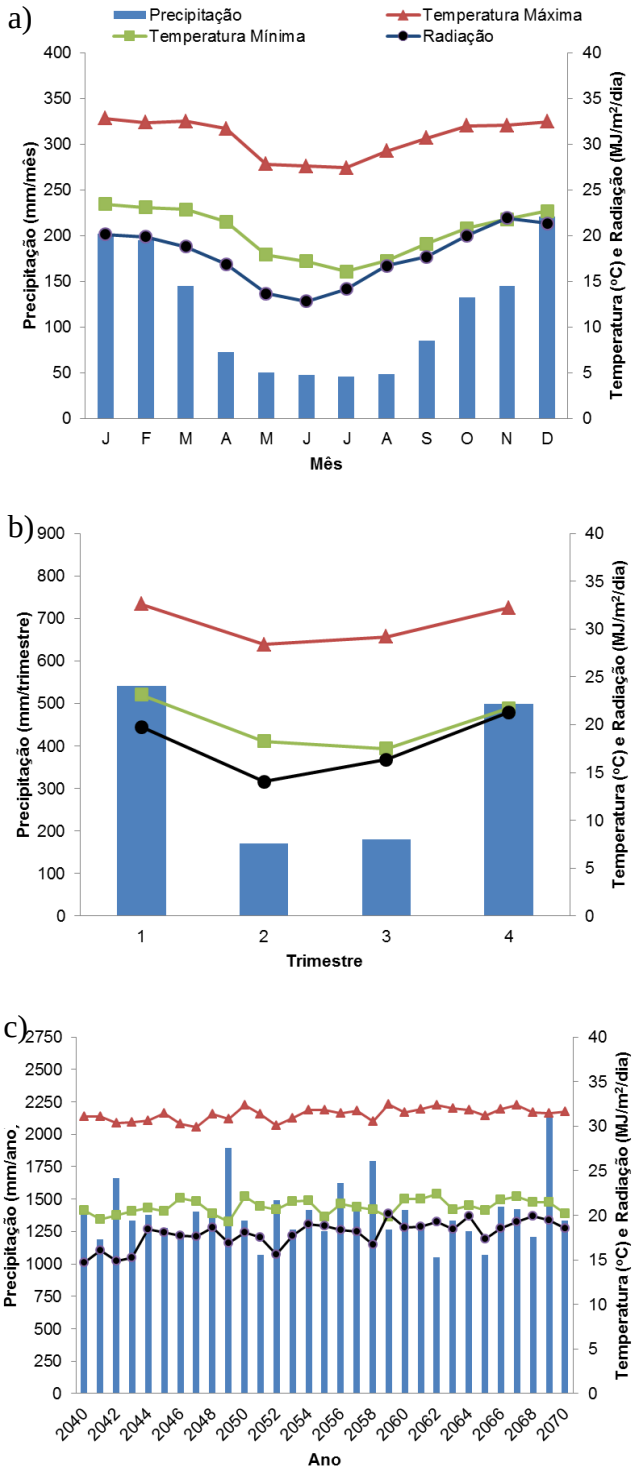
b)



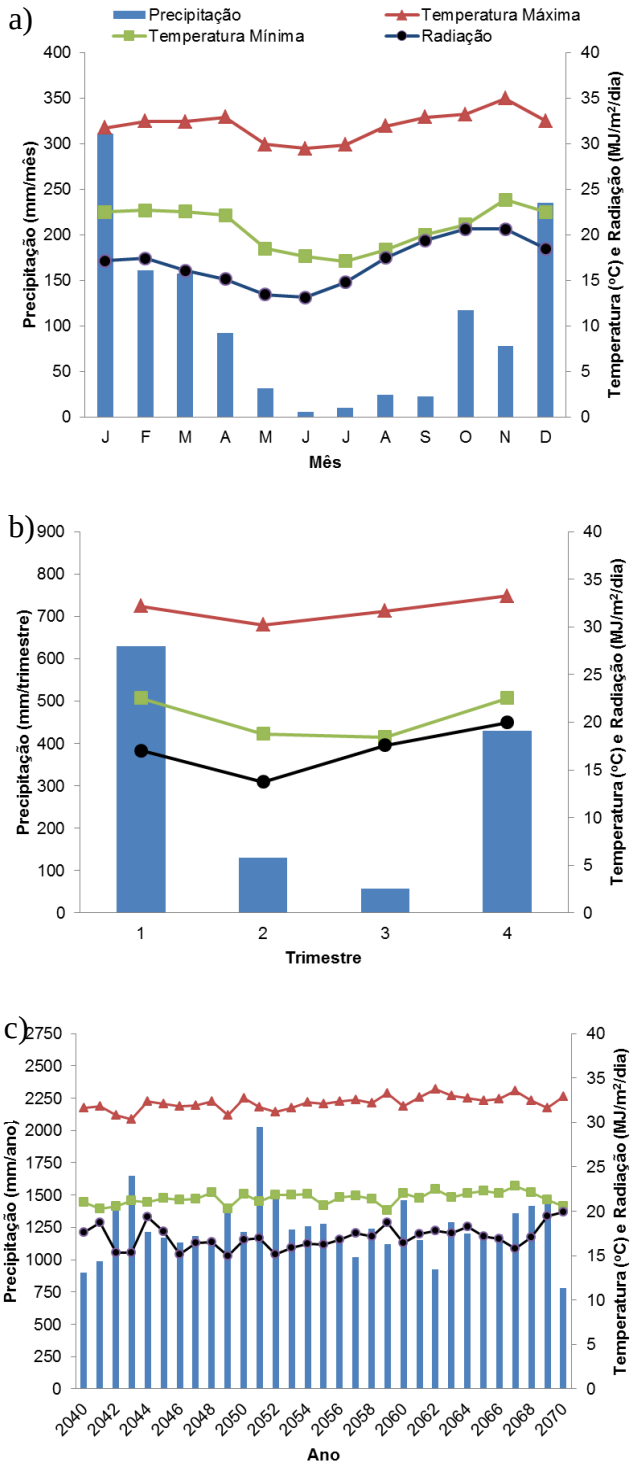
c)



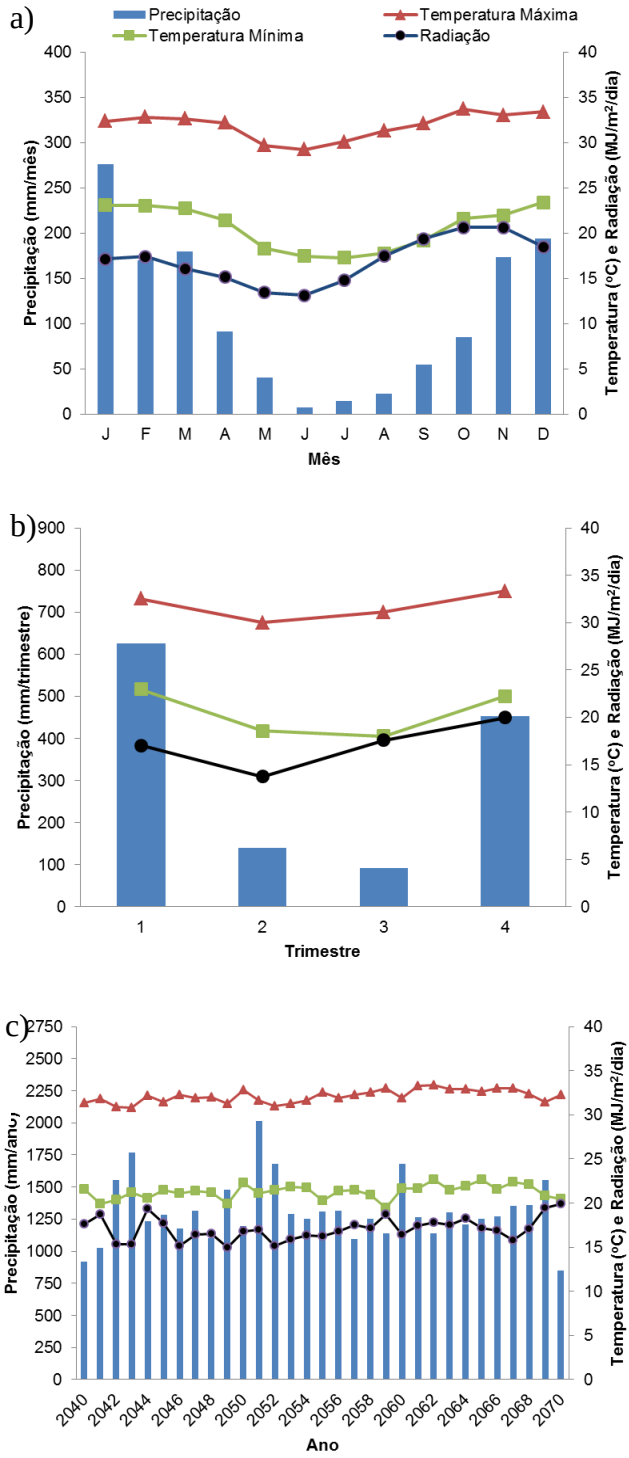
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 - GCM P, para o município de Presidente Prudente/SP.



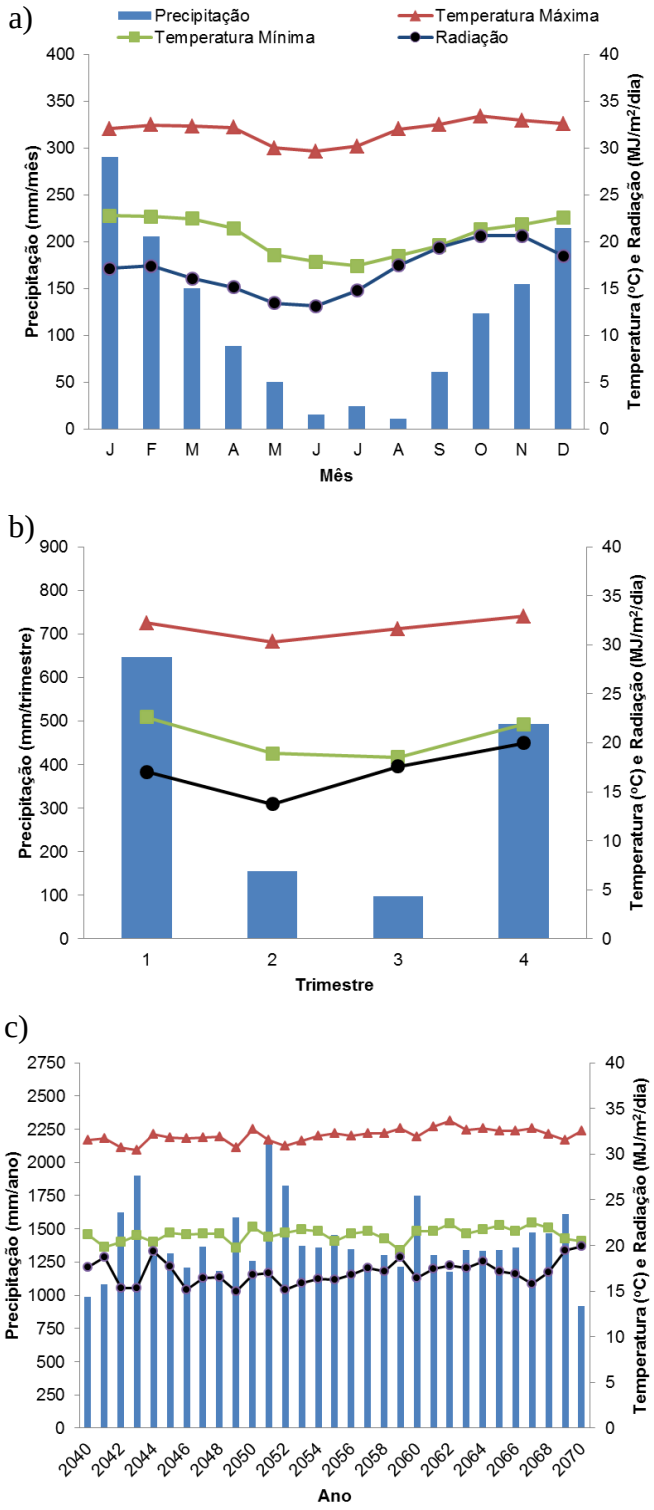
a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM E, para o município de Votuporanga/SP.



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM I, para o município de Votuporanga/SP.

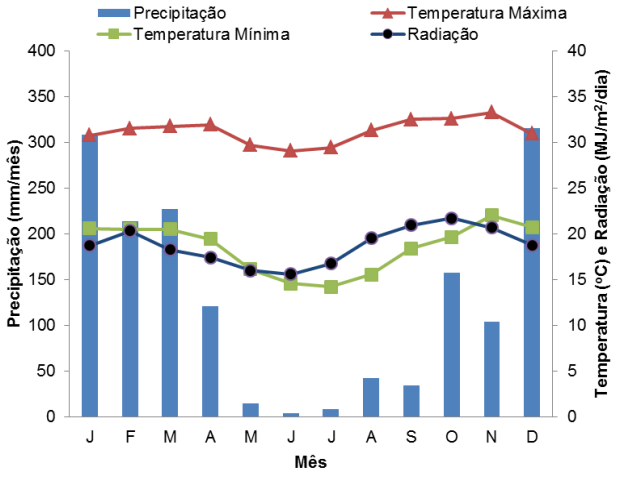


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM P, para o município de Votuporanga/SP.

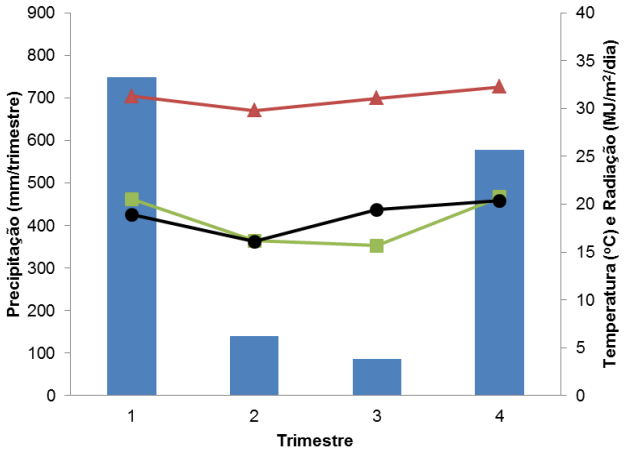


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM E, para o município de Uberaba/MG.

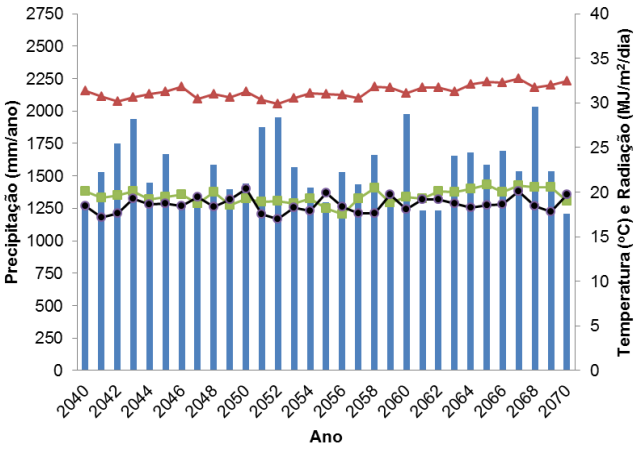
a)



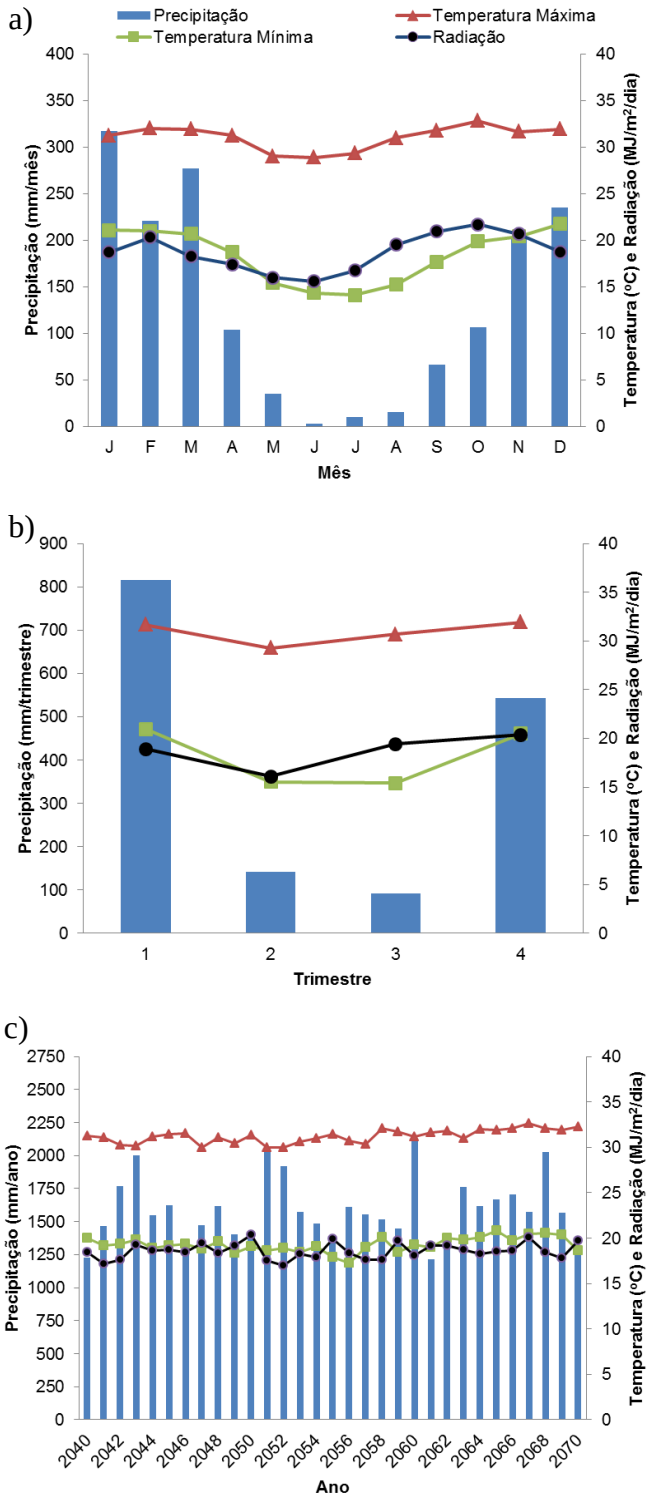
b)



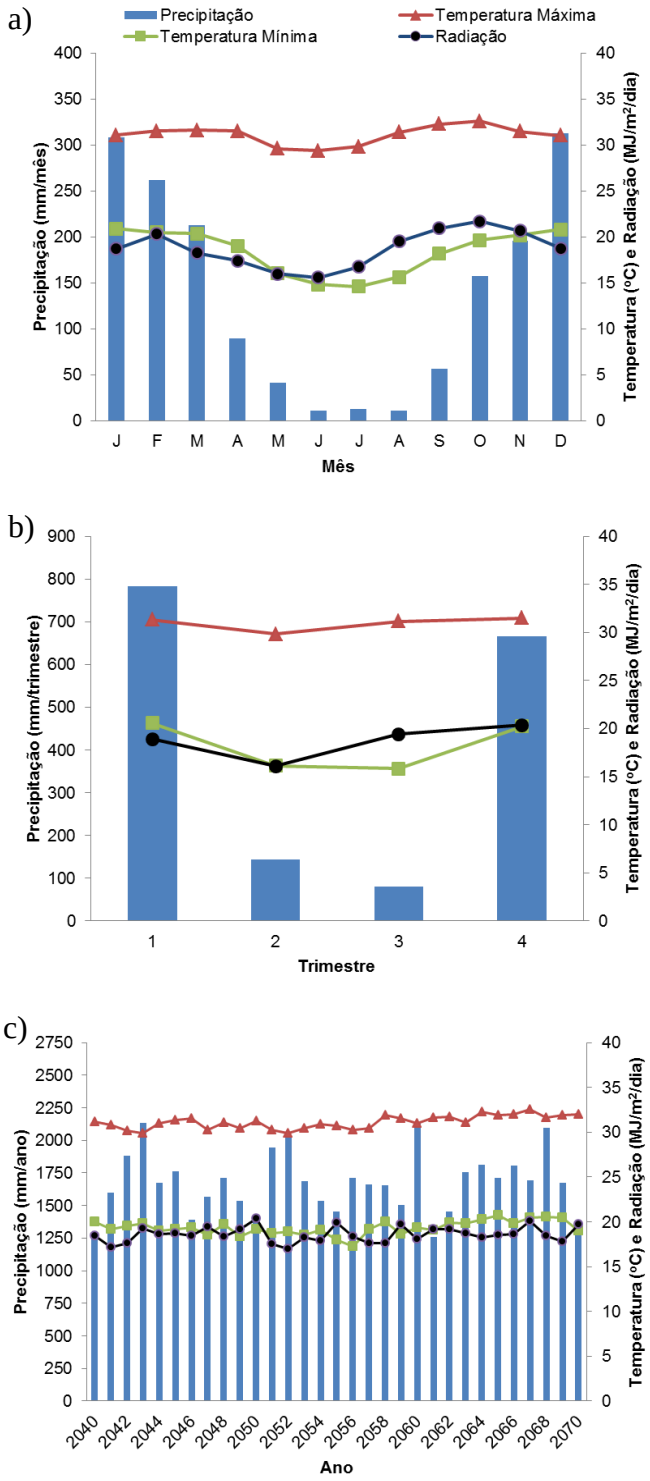
c)



a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM I, para o município de Uberaba/MG.

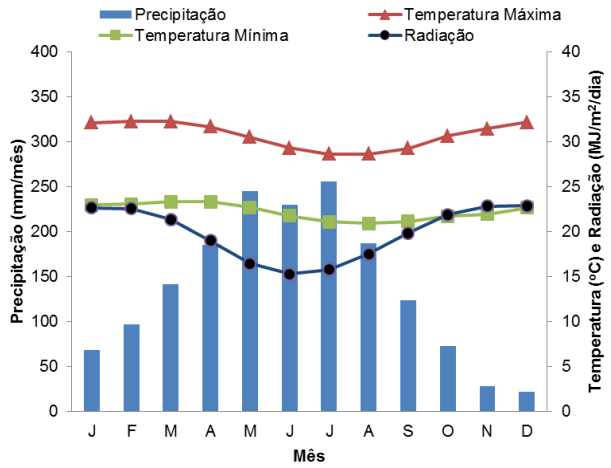


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM P, para o município de Uberaba/MG.

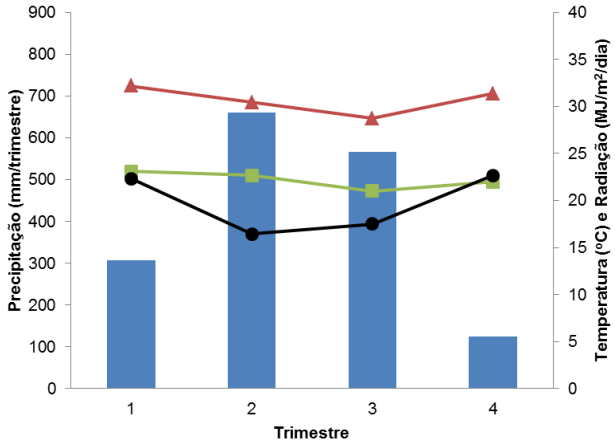


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM E, para o município de Maceió/AL.

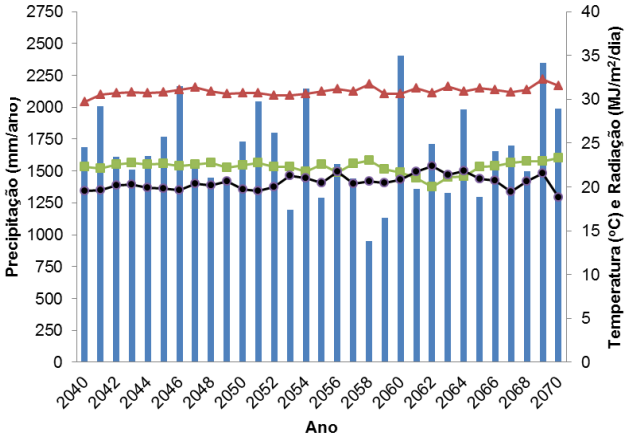
a)



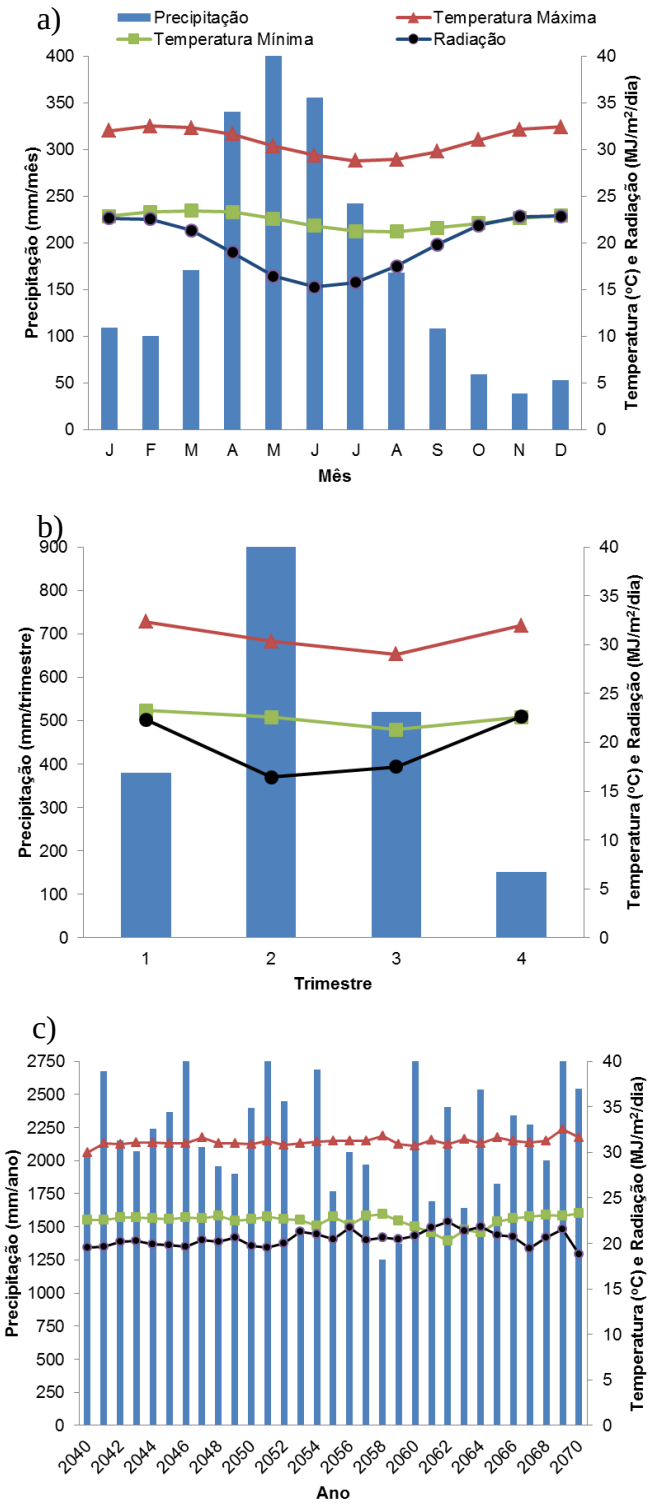
b)



c)

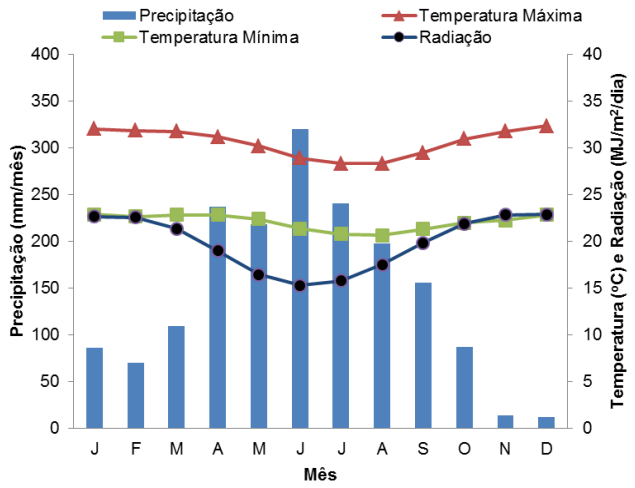


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM I, para o município de Maceió/AL.

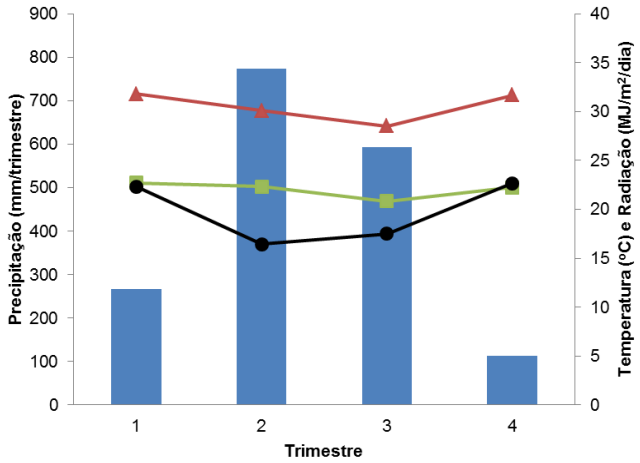
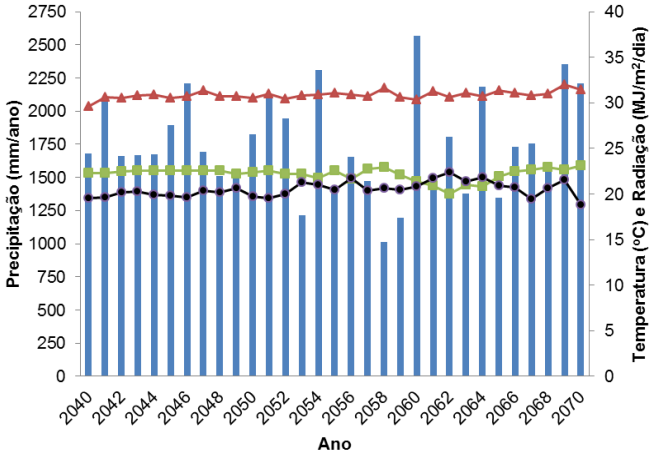


a) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação mensais; b) Precipitação, Temperatura Máxima, Mínima e Radiação trimestrais; jan, fev, mar (1); abr, maio, jun (2); jul, ago, set (3); out, nov, dez (4); c) Precipitação, Temperatura Máxima e Mínima, Radiação anuais. Série de 2040 a 2070 - Cenário B1 – GCM P, para o município de Maceió/AL.

a)



b)



c)